

32.1873
д. 735
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Ф. СКОРИНЫ

КАФЕДРА РАДИОФИЗИКИ

В.И.Богданович
В.Н. Мышковец

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Практическое пособие для студентов физического факультета
Гомельского государственного университета им.Ф.Скорины
Специальностей "Физика", "Физика с дополнительной
специализацией "Техническое творчество", "Физическая
электроника", АСОИ

(часть 3)

2. 3

Гомель 2000

№. N4

32,15+3
6735

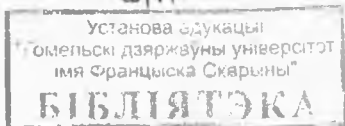
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Практическое пособие для студентов физического факультета Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины специальностей «Физика», «Физика с дополнительной специализацией «Техническое творчество», «Физическая электроника», АСОИ

(часть 3).



БН



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

В авторской редакции

Авторы – составители: Богданович В. И.,
Мышковец В. Н.

Рецензенты: Ефимчик М. К., Яковцев И. Н.

Рекомендовано к изданию научно – методическим советом
Гомельского государственного университета
им. Ф.Скорины

Практическое пособие «Электротехника» часть 3 включает в себя примеры решения задач по разделам курса «Нелинейные электрические цепи», «Магнитные цепи постоянного тока», «Электромагнитные устройства постоянного тока», «Электромагнитные устройства переменного тока», «Электрические машины переменного тока», «Электрические машины постоянного тока».

© Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

1. Нелинейные электрические цепи

1. 1. Нелинейные цепи постоянного тока

Задача 1.1. На рис. 1.1 приведен рабочий участок вольт - амперной характеристики полупроводникового кремниевого стабилитрона - прибора, применяемого для стабилизации напряжения. Определить статическое и дифференциальное сопротивление стабилитрона.

Решение.

Статическое сопротивление $R_{ст}$ для любой точки характеристики определяется как отношение напряжения к току:

$$R_{ст} = U_{ст} / I_{ст}$$

С ростом тока статическое сопротивление уменьшается, при этом напряжение на стабилитроне остаётся практически постоянным. Зависимость $R_{ст}$ (I), показана на рис. 1.2, сопротивление $R_{ст}$ стабилитрона на рабочем участке вольт - амперной характеристики изменяется от 27 до 4,56 кОм.

Для определения дифференциального сопротивления найдём по кривой $U_{ст}$ ($I_{ст}$) приращение напряжения ΔU и тока ΔI на рабочем участке:

$$\Delta U = U_A - U_B = 162 - 145 = 17 \text{ В,}$$

$$\Delta I = I_A - I_B = 40 - 5 = 35 \text{ мА.}$$

Дифференциальное сопротивление стабилитрона

$$R_{дифф} = \Delta U / \Delta I = 17 / (35 \cdot 10^{-3}) \approx 0,49 \text{ кОм.}$$

Задача 1.2. На рис. 1.3 представлена вольт - амперная характеристика нелинейного элемента. Определить сопротивления $R_{ст}$ и $R_{дифф}$ для точки а характеристики.

Решение.

$$R_{ст} = U / I = 20 / (1,5 \cdot 10^{-3}) \approx 13 \text{ к Ом, } R_{дифф} = 6,6 \text{ к Ом.}$$

Задача 1.3. Линейный элемент с сопротивлением $R=200$ Ом и нелинейный элемент (н.э.), вольт - амперная характеристика которого задана табл. 1.1, соединены последовательно и подключены к источнику питания с э. д. с. $E=200$ В (рис 1.4, а). Определить ток в цепи и напряжение на нелинейном элементе.

Решение.

Вспользуемся методом пересечения характеристик, т.е. графическим решением системы двух уравнений, выражающих связь между напряжением и током нелинейного элемента. Зависимость $U_2(I) = U_{ab}(I)$ выражается с одной стороны, вольт - амперной характеристикой н.э., заданной таблицей 1.1 (рис. 1.4, б), а с другой уравнением $U_2(I) = E - RI$, составленным по второму закону Кирхгофа. Последнее уравнение является уравнением внешней характеристики активного двухполюсника, к которому подключён нелинейный элемент. Эта прямая может быть построена по двум точкам с координатами $U_k = 0$, $I_k = E / R = 1$ А и $I_k = 0$, $U_k = E = 200$ В (рис. 1.4,б). Точка с пересечения характеристик определяет корни этой системы уравнений $I = 0,55$ А и $U = 85$ В. Прямую ab называют опрокинутой характеристикой нелинейного элемента, т.к. её можно построить по-другому: провести прямую из точки a под углом α к вертикали: $\text{tg } \alpha = R (m_i/m_u) = 200 \cdot 0,02 / 4 = 1$; $\alpha = 45^\circ$. Масштабы тока и напряжения равны: $m_i = 0,02$ А/мм, $m_u = 4$ В/мм.

Таблица 1.1

U, В	0	20	40	60	80
I, А	0	0,22	0,36	0,45	0,56

U, В	100	120	160	200	240
I, А	0,60	0,65	0,76	0,80	0,86

Задача 1.4. Для измерения температуры в одном из плеч моста, включен полупроводниковый резистор, представляющий собой нелинейный элемент с вольт - амперной характеристикой, заданной таблицей 1.2, напряжением источника питания $E=12$ В, сопротивлении плеч $R_2=R_4=1$ кОм, $R_3=4$ кОм, а сопротивление $R_5=2$ кОм. Определить ток I_1 в нелинейном элементе.

Решение.

Для определения тока I_1 воспользуемся методом эквивалентного генератора. Размыкаем ветвь ac и определяем напряжение U_{acx}

(рис. 1.5, б), предварительно находим токи I_{3x} и I_{5x} в резистивных элементах R_3 и $R_{5,3x}$

$$I_{3x} = U / (R_3 + (R_5 + R_2)R_4 / (R_5 + R_4 + R_2)) = 12 / ((4 + (2+1) \cdot 1 / (2+1+1)) \cdot 10^3) = 2,53 \text{ мА},$$

$$-I_{5x} = I_{3x} \cdot (R_4 / (R_4 + R_5 + R_2)) = -0,635 \text{ мА},$$

$$U_{acx} = R_3 I_{3x} + R_5 I_{5x} = 11,4 \text{ В}.$$

Определяем $R_{вх,ac}$

$$R_{вх,ac} = R_2(R_5 + (R_4 \cdot R_3) / (R_4 + R_3)) / ((R_2 + R_5 + (R_4 \cdot R_3) / (R_4 + R_3))) = 0,74 \text{ кОм}.$$

Таблица 1.2

U_1 , В	2	8	12	14	16
I_1 , мА	0,25	2	4,2	5,7	10,5

Эквивалентная схема (рис. 1.5, г) представляет собой последовательное соединение источника э.д.с. $E_{эк} = U_{acx}$ с сопротивлением $R_{эк} = R_{вх,ac}$ и нелинейного элемента $R(I_1)$.

Для определения тока I_1 воспользуемся методом пересечения характеристик (рис. 1.5, д) $I_1=2,7$ А.

1.2. Нелинейные цепи переменного тока

Задача 1.6. Найти закон изменения тока в схеме однополупериодного выпрямителя (рис. 1.6, а), если $R_H = 1 \text{ кОм}$, $U_{вх} = 20 \sin(\omega t)$, В.

Решение.

Сопротивление диода в проводящем направлении пренебрежимо мало, поэтому при $U_{вх} > 0$ можно пренебречь падением напряжения на диоде $U_d \approx 0$ и записать $U_H \approx U_{вх}$, следовательно,

$$i \approx U_{вх} / R_H = 20 \cdot \sin(\omega t) \text{ мА.}$$

При $U_{вх} < 0$, диод включён в непроводящем направлении, поэтому его сопротивление велико, а ток в цепи пренебрежимо мал ($i \approx 0$). Графики мгновенных значений напряжения и тока показаны на рис. 1.6, б.

Задача 1.7. Определить среднее значение тока i_H в схеме двухполупериодного выпрямителя (рис. 1.7, а), если $U_{вх} = 50 \sin(\omega t)$ В, $R_H = 2 \text{ кОм}$.

Кривая мгновенного тока показана на рис. 1.7, б.

Решение.

Пренебрегая сопротивлением диодов в проводящем направлении, можно записать

$$\begin{aligned} I_{H, \max} &\approx U_{вх, \max} / R_H = 2,5 \text{ мА,} \\ I_{H, \text{ср}} &= 1 / (T/2) \int (\text{от } 0 \text{ до } T/2) I_{H, \max} \cdot \sin(\omega t) dt = \\ &= 2 I_{H, \max} / 2 = 16 \text{ мА,} \end{aligned}$$

где T - период напряжения источника питания.

1.3 Выпрямители.

Задача 1.8. Составить схему мостового выпрямителя, используя один из четырех диодов: Д218, Д222, КД202Н, Д215Б. Мощность потребителя $P_d = 300 \text{ Вт}$, напряжение потребителя $U_d = 200 \text{ В}$.

Решение.

Параметры диодов берем из таблицы 1.3.

Таблица 1.3

Диодный	$I_{\text{доп}}, \text{A}$	$U_{\text{обр}}, \text{В}$
Д218	0,1	1000
Д222	0,4	600
КД202Н	1	500
Д215Б	2	200

Определяем ток потребителя:

$$I_d = P_d / U_d = 300/200 = 1,5 \text{ A.}$$

Определяем напряжение, действующее на диод в непроводящий период для мостовой схемы выпрямителя:

$$U_B = 1,57 U_d = 1,57 \cdot 200 = 314 \text{ В.}$$

Выбираем диод из условия

$$I_{\text{доп}} > 0,57 I_d > 0,5 \times 1,5 > 0,75 \text{ A, } U_{\text{обр}} > U_B > 314 \text{ В.}$$

Этим условиям удовлетворяет диод КД202Н

$$I_{\text{доп}} = 1,0 > 0,75 \text{ A;}$$

$$U_{\text{обр}} = 500 > 314 \text{ В.}$$

Составляем схему мостового выпрямителя (рис.1.8).

В этой схеме каждый из диодов имеет параметры диода КД202Н: $I_{\text{доп}} = 1,0 \text{ A}$ и $U_{\text{обр}} = 500 \text{ В}$.

Задача 1.9. Для питания постоянным током потребителя мощностью $P_d=250 \text{ Вт}$ при напряжении $U_d=100 \text{ В}$ необходимо собрать схему двухполупериодного выпрямителя, используя стандартные диоды типа Д243 Б.

Решение.

Выписываем параметры диода Д234Б из таблицы 1.3:

$$I_{\text{доп}} = 2 \text{ A; } U_{\text{обр}} = 200 \text{ В.}$$

Определяем ток потребителя:

$$I_d = P_d / U_d = 250/100 = 2,5 \text{ A.}$$

Определяем напряжение, действующее на диод в непроводящий период:

$$U_B = 3,14 U_d = 3,14 \cdot 100 = 314 \text{ В.}$$

Проверяем диод по параметрам $I_{\text{доп}}$ и $U_{\text{обр}}$. Для данной схемы диод должен удовлетворять следующим условиям $U_{\text{обр}} > U_B$ и $I_{\text{доп}} > 0,5I$. В данном случае первое условие не соблюдается, т.к. $200 < 314 \text{ В}$, т.е. $U_{\text{обр}} < U_B$. Второе условие соблюдается, т.к. $0,5I_d = 0,5 \cdot 2,5 = 1,25 < 2 \text{ А}$.

Составляем схему выпрямителя, чтобы выполнялось условие $U_{\text{обр}} > U_d$ необходимо два диода соединить параллельно, тогда $U_{\text{обр}} = 200 \cdot 2 = 400 > 314 \text{ В}$.

Задача 1.10. Для питания постоянным током потребителя мощностью $P_d = 300 \text{ Вт}$ при напряжении $U_d = 20 \text{ В}$, необходимо собрать схему однополупериодного выпрямителя, используя имеющиеся стандартные диоды Д242А.

Решение.

Параметры диода Д242А следующие

$$I_{\text{доп}} = 10 \text{ А}; U_{\text{обр}} = 100 \text{ В.}$$

Определяем ток потребителя:

$$I_d = P_d / U_d = 300 / 20 = 15 \text{ А.}$$

Определяем напряжение, действующее на диод в непроводящий период:

$$U_B = 3,14 U_d = 3,14 \cdot 20 = 63 \text{ В.}$$

Проверяем диод по параметрам $I_{\text{доп}}$ и $U_{\text{обр}}$. Для данной схемы диод должен удовлетворять условиям $U_{\text{обр}} > U_B$, $I_{\text{доп}} > I_d$. В данном случае второе условие не соблюдается, т.к. $10 < 15$, т.е. $I_{\text{доп}} < I_d$. Первое условие выполняется, т.к. $100 > 63 \text{ В}$.

Составляем схему выпрямителя. Чтобы выполнялось условие $I_{\text{доп}} > I_d$, надо два диода соединить параллельно, тогда $I_{\text{доп}} = 2 \cdot 10 = 20 > 15 \text{ А}$. Полная схема выпрямителя приведена на рис. 1.9.

Задача 1.11. Для составления схемы трехфазного выпрямителя на трех диодах заданы диоды Д243. Выпрямитель должен питать потребителя с $U_d = 150 \text{ В}$. Опре-

делить допустимую мощность потребителя и пояснить порядок составления схемы выпрямителя.

Решение.

Параметры диода

$$I_{\text{доп}} = 5 \text{ А} ; U_{\text{обр}} = 200 \text{ В.}$$

Определяем допустимую мощность потребителя.

Для трёхфазного выпрямителя $I_{\text{доп}} > (1/3) \cdot I_d$, т.е.

$P_d = 3U_d \cdot I_{\text{доп}} = 3 \cdot 150 \cdot 5 = 2250 \text{ Вт}$. Следовательно для данного выпрямителя $P_d \geq 2250 \text{ Вт}$.

Определяем напряжение, действующее на диод в непероводящий период

$$U_B = 2,1 \cdot U_d = 2,1 \cdot 150 = 315 \text{ В.}$$

Составляем схему выпрямителя. Проверяем диод по условию $U_{\text{обр}} > U_B$. В данном случае это условие не выполняется, т.к. $200 < 315 \text{ В}$. Чтобы условие выполнялось, необходимо в каждом плече два диода соединить последовательно, тогда

$U_{\text{обр}} = 200 \cdot 2 = 400 \text{ В}$ и $400 > 315 \text{ В}$. Полная схема выпрямителя приведена на рис. 1.10.

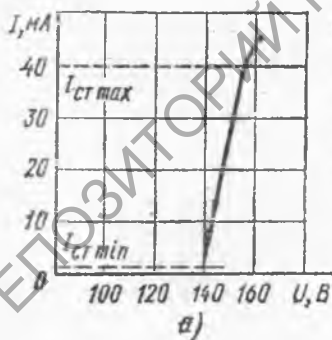


Рис. 1.1

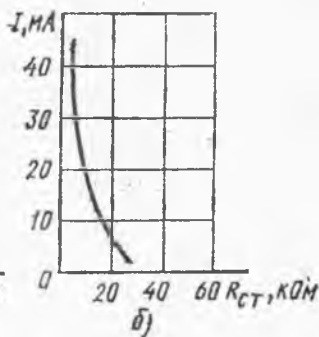


Рис. 1.2

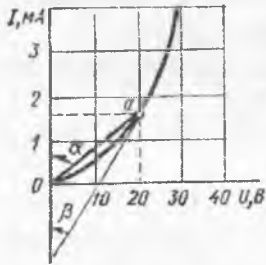


Рис. 1.3

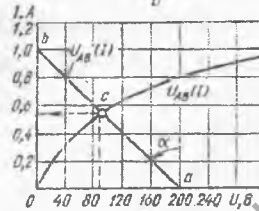
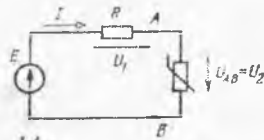


Рис. 1.4

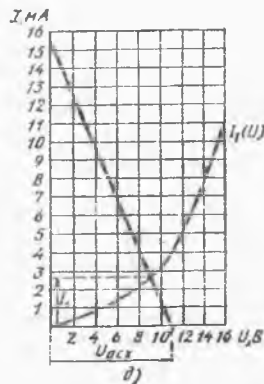
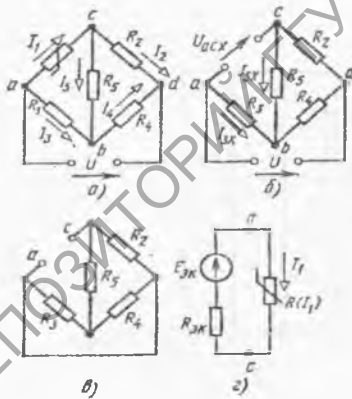
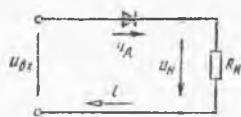
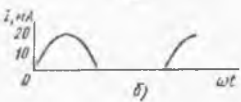
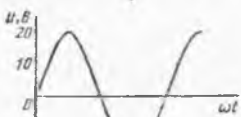


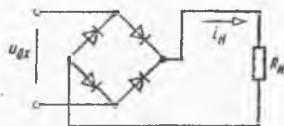
Рис. 1.5



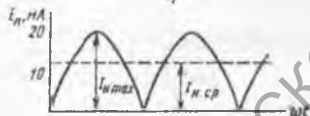
а)



б)



а)



б)

Рис. 1.6

Рис. 1.7

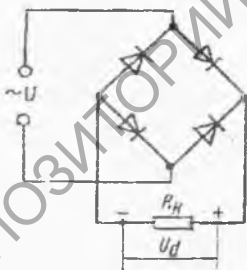


Рис. 1.8

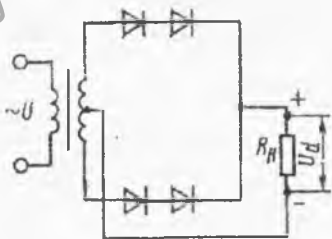


Рис. 1.9.

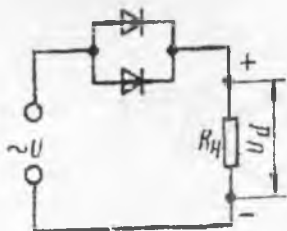


Рис. 1.10.

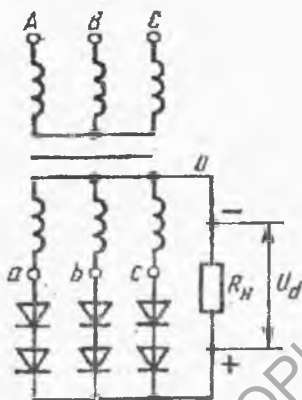


Рис. 1.11.

2. Магнитные цепи постоянного потока.

2.1 Применение закона полного тока для анализа магнитных цепей. Влияние ферромагнитных материалов.

Задача 2.1. На кольцевой замкнутый сердечник (рис.2.1) равномерно нанесена обмотка с числом витков $W=200$. Поперечное сечение кольца прямоугольное, наружный диаметр кольца $D=16$ см, внутренний диаметр $d = 10$ см, толщина $b = 4$ см. Определить ток в обмотке катушки, при котором магнитный поток в сердечнике $\Phi=12 \cdot 10^{-4}$ Вб, если материал сердечника: а) дерево; б) литая сталь; в) листовая электротехническая сталь марки 1512.

Решение.

Магнитная индукция в сердечнике из дерева и литой стали определяется как

$$B = \Phi/S = \Phi/((D-d)/(2b)) = \\ = 12 \cdot 10^{-4} / ((16-10)/(2 \cdot 4 \cdot 10^{-4})) = 1 \text{ Тл.}$$

Магнитная индукция в сердечнике из листовой стали 1512 (с учётом коэффициента заполнения стали $k_{з.с.} = 0,9$)

$$B^I = \Phi / (S \cdot k_{з.с.}) = 1,11 \text{ Тл.}$$

а) Напряжённость магнитного сердечника из дерева

$$H_0 = B / \mu_0 = 1 \text{ Тл} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \text{ Гн/м} = 8 \cdot 10^5 \text{ А/м.}$$

Ток в обмотке находим из уравнения

$$H = W \cdot I / l_{cp}$$

$$I = I_{cp} \cdot H_0 / W = 40,8 \times 10^2 \cdot 8 \cdot 10^5 / 200 = 1632 \text{ А.}$$

$$\text{где } l_{cp} = \pi D_{cp} = \pi \cdot (D+d) / 2 = 40,8 \text{ см.}$$

Обычно для катушек кольцевых сердечников плотность тока в обмотке с лакостойкой или хлопчатобумажной изоляцией допускается не выше

$J_{\text{внт.}} = 3 \text{ А/мм}^2$, поэтому для данного тока потребовался бы провод с лакостойкой изоляцией, сечением

$$Q = I / J_{\text{внт.}} = 1632/3 = 544 \text{ мм}^2.$$

В этом случае площадь окна намотки S_m при $W = 200$ должна быть равна (без учёта коэффициента заполнения меди $k_{з.м.}$)

$$S_m = 544 \cdot 10^{-2} \cdot 200 = 1088 \text{ см}^2.$$

Для данного размера сердечника площадь окна намотки (без учёта $k_{з.м.}$) составляет

$$S_m = \pi \cdot d^2 / 4 = 78,5 \text{ см}^2.$$

Следовательно, в этом сердечнике заданный поток получить невозможно.

б) Напряжённость магнитного поля в сердечнике из литой стали определяется по кривой намагничивания:

при $B = 1 \text{ Тл}$, $H_c = 750 \text{ А/м}$ ток в обмотке $I = 1,53 \text{ А}$.

в) Аналогично для сердечника из листовой электро-технической стали марки 1512:

при $B = 1,11 \text{ Тл}$, $H_c = 570 \text{ А/м}$,

ток в обмотке $I = 1,16 \text{ А}$.

Задача 2.2. Определить относительные магнитные проницаемости и магнитные сопротивления ферромагнитных сердечников задачи 2.1 и индуктивности их катушек.

Решение.

Для относительной магнитной проницаемости

$$\mu_r = B(\text{Тл}) / [\mu_0 (\text{Гн/м}) \cdot H(\text{А/м})]:$$

для литой стали $\mu_r = 1065$, для стали марки 1512 $\mu_r = 1560$.

Для магнитного сопротивления магнитопровода

$$R_m = Wl(A) / \Phi(B\delta) = l(\text{м}) / [\mu_0 (\text{Гн/м}) \cdot \mu_r \cdot S(\text{м}^2)] \text{ Ом/с:}$$

для литой стали $R_m = 255 \cdot 10^5 (1/\text{Ом}\cdot\text{с})$,

для стали марки 1512 $R_m = 1,93 \cdot 10^5 (1/\text{Ом}\cdot\text{с})$.

Для индуктивности катушки

$$L = (W\Phi) / I = (\mu_0 \mu_r \cdot W^2 S) / l = W^2 / R_m \text{ Гн:}$$

для литой стали $L = 157 \text{ мГн}$,

для стали марки 1512 $L = 207 \text{ мГн}$.

2.2. Магнитные цепи с зазором в магнитопроводе.

Задача 2.3. В сердечнике из литой стали (рис. 2.2) необходимо создать магнитную индукцию $B=1 \text{ Тл}$. Число витков равномерно намотанной на сердечник обмотки $W=200$, длина средней линии сердечника $l_{cp}=69 \text{ см}$, сечение $S=6 \text{ см}^2$. Как изменится ток и магнитное сопротивление магнитопровода, если в сердечнике сделать воздушный зазор $\delta=0.5 \text{ мм}$. Магнитный поток сердечника должен остаться без изменений. При расчете рассеяниями пренебречь и считать поле в воздушном зазоре однородным.

Решение.

Пренебрегая потоком рассеяния, считаем, что магнитная индукция в воздушном зазоре и в стали одинакова: $B_0 = B_c = 1 \text{ Тл}$. Напряжённость магнитного поля в магнитном зазоре

$$H_0 = B_0 / \mu_0 = 8 \cdot 10^5 B_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot 1,0 = 800 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Находим напряжённость магнитного поля в сердечнике для $B = 1 \text{ Тл}$ по кривой намагничивания стали $H_c \approx 750 \text{ А/м}$.

Магнитодвижущая сила обмотки: при отсутствии в сердечнике воздушного зазора

$$W \cdot I_1 = l_{cp} H_c = 0,69 \cdot 750 = 517,5 \text{ А}$$

при наличии в сердечнике воздушного зазора

$$W I_2 = l_{cp} H_c + \delta \cdot H_0 = 517,5 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 800 \cdot 10^3 = 917,5 \text{ А}$$

Токи в обмотке

$$I_1 = W I_1 / W = 517,5 / 200 = 2,58 \text{ А,}$$

$$I_2 = W I_2 / W = 917,5 / 200 = 4,58 \text{ А.}$$

Ток необходимо увеличить на $\Delta I = 4,58 - 2,58 \approx 2 \text{ А}$, т.е. почти в два раза.

Магнитное сопротивление магнитопровода

$$R_{mc} = l_{cp} / \mu_0 \mu_r = l_{cp} / BS / H_c = 8,65 \cdot 10^5 \text{ 1/(Ом}\cdot\text{с)}.$$

Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$R_\delta = \delta / \mu_0 \cdot S = 6,63 \cdot 10^5 \text{ 1/(Ом}\cdot\text{с)}.$$

Магнитное сопротивление магнитопровода с воздушным зазором

$$R_m = R_{mc} + R_\delta = 15,3 \cdot 10^5 \text{ 1/(Ом}\cdot\text{с)}.$$

Этот результат можно получить из соотношения

$$\begin{aligned} R_m = W I_2 / \Phi &= W I_2 / (BS) = 917,5 / (1,6 \cdot 10^{-4}) = \\ &= 15,3 \cdot 10^5 \text{ 1/(Ом}\cdot\text{с)}. \end{aligned}$$

Задача 2.4. На рис. 2.3 даны геометрические размеры магнитопровода цепи в миллиметрах, выполненного из электротехнической стали марки 1211. Требуется определить магнитодвижущую силу $F = WI$, которая необходима для создания магнитного потока $\Phi = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$, значение тока в катушке I , содержащей $W = 1000$ витков и индуктивность катушки L .

Решение.

Магнитную цепь делим на участки так, чтобы в пределах каждого материал и сечение магнитопровода оставались неизменными. В данном случае таких участков три. Контур, по которому составляем уравнение,

пользуясь законом полного тока, проходит по средней магнитной линии:

$$l_1 = 150 - 25 = 125 \text{ мм};$$

$$l_1 = l_2^I + l_2^{II} = 125 + 2 \cdot 107 \times 5 - 2 = 338 \text{ мм}.$$

Определяем магнитную индукцию в каждом участке цепи, для чего находим сечение магнитопровода

$$S_1 = 40 \cdot 50 = 2000 \text{ мм}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$S_2 = 50 \cdot 25 = 1250 \text{ мм}^2 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Магнитная индукция

$$B_1 = \Phi / S_1 = 1 \text{ Тл}, \quad B_2 = B_0 = \Phi / S_2 = 1,6 \text{ Тл}.$$

Напряжённость магнитного поля для ферромагнитных материалов определяем по кривым намагничивания $B = f(H)$, которые приводятся в справочной литературе. В данном случае для электротехнической стали марки 1211 имеем: $H_1 = 502 \text{ А/м}$ и $H_2 = 4370 \text{ А/м}$. Для воздушного зазора l_0 напряжённость магнитного поля определяется из равенства

$$H_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot B_0 = 8 \cdot 10^5 \cdot 1,6 = 1280 \text{ 000 А/м}$$

Искомая магнитодвижущая сила, равная произведению тока на число витков катушки, по которой он протекает, согласно закону полного тока

$$F = WI = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 l_0 = 502 \cdot 0,125 + 4370 \cdot 0,338 + 1280 \text{ 000} \cdot 2 \times 10^{-3} \approx 4000 \text{ А}.$$

Ток в катушке $I = F / W = 4 \text{ А}$.

Индуктивность катушки

$$L = \Psi / I = W\Phi / I = 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 4 = 0,5 \text{ Гн},$$

где Ψ - потокосцепление.

Задача 2.5. На рис. 2.4 изображен тороидальный магнитопровод, выполненный из электротехнической стали марки 1512. Заданы размеры $l = 30 \text{ см}$, $l_0 = 0,1 \text{ см}$, магнитодвижущая сила $F = WI = 1000$; $W = 1000$ витков. Требуется определить какой поток замыкается по магнитопроводу.

Решение.

Для её решения необходимо построить кривую зависимости магнитного потока от магнитодвижущей силы $\Phi = f(WI)$, а затем по заданной магнитодвижущей силе

определить графически магнитный поток Φ . Для построения зависимости $\Phi = f(WI)$ необходимо задаться несколькими значениями магнитного потока и для всех этих значений определить магнитодвижущую силу, т.е. решить несколько прямых задач (обычно достаточно 3-5 значений). Первое значение магнитного потока выбирается из расчёта, что магнитное сопротивление стали $R_{м ст} = 0$, а основное сопротивление представляет собой сопротивление воздушного зазора R_0 . Полученное значение потока будет несколько завышенным, поэтому далее задаёмся меньшим значением потока. Если пренебречь $R_{м ст}$, то закон полного тока для рассматриваемой цепи запишется в виде

$$WI = H_0 l_0$$

откуда $H_0 = WI / l_0 = 1000 / 10^{-3} = 10^6$ А/м.

Магнитная индукция

$$B_0 = H_0 / (8 \cdot 10^5) = 10^6 / (8 \cdot 10^5) = 1,25 \text{ Тл.}$$

$$\begin{aligned} \text{Магнитный поток } \Phi_0 &= B_0 S = 1,25 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = \\ &= 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.} \end{aligned}$$

Напряжённость магнитного поля определяется для $B = 1,25$ Тл по кривым намагничивания для стали марки 1512, которые приводятся в литературе.

В данном случае

$$H_{ст} = 600 \text{ А/м; } H_{ст} l_{ст} = 180 \text{ А;}$$

$$H_0 l_0 = 10^3 \text{ А, } WI = H_{ст} l_{ст} + H_0 l_0 = 180 + 10^3 = 1180 \text{ А.}$$

Результаты вычислений приведены далее

$$1) \Phi = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб; } B = 1,25 \text{ Тл; } H_{ст} = 600 \text{ А/м;}$$

$$H_{ст} l_{ст} = 180 \text{ А/м; } H_0 = 10^6 \text{ А/м; } H_0 l_0 = 10^3 \text{ А;}$$

$$WI = 1080 \text{ А.}$$

$$2) \Phi = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб; } B = 1,125 \text{ Тл; } H_{ст} = 300 \text{ А/м;}$$

$$H_{ст} l_{ст} = 90 \text{ А/м; } H_0 = 9 \cdot 10^5 \text{ А/м; } H_0 l_0 = 900 \text{ А;}$$

$$WI = 990 \text{ А.}$$

$$3) \Phi = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб, } B = 1,0 \text{ Тл, } H_{ст} = 200 \text{ А/м,}$$

$$H_{ст} l_{ст} = 60 \text{ А/м,}$$

$$H_0 = 8 \cdot 10^5 \text{ А/м, } H_0 l_0 = 800 \text{ А, } WI = 860 \text{ А.}$$

Для полученных значений строим зависимость

$\Phi = f(WI)$. По заданной магнитодвижущей силе находим $\Phi_{иск} = 4,53 \cdot 10^{-4}$ Вб.

Задача может быть решена с помощью построения так называемой опрокинутой характеристики. Для этого строится зависимость $\Phi = f(H_{ст}l_{ст})$ и в точке пересечения её с опрокинутой характеристикой (прямая линия), которая строится при $R_{м.ст} = 0$, находим значение $\Phi_{иск}$.

2.3. Электромагнитные устройства

Задача 2.6. Магнитопровод 1 и ярмо 2 электромагнита выполнены из стали одинакового сечения $S_c = 2,5 \text{ см}^2$ и имеют суммарную длину $l_c = 0,3 \text{ м}$. Определить силу F_c , с которой ярмо притягивается к магнитопроводу, если ток в обмотке $I = 1,8 \text{ А}$, число витков обмотки $W = 110$, длина воздушного зазора $\delta = 0,025 \text{ мм}$. Магнитная характеристика задана таблицей 2.1.

Примечание: по мере притяжения ярма зазор δ уменьшается и сила F возрастает, расчёт ведётся для заданного максимального зазора.

Таблица 2.1

В, Тл	0	0,4	0,67	0,87	1,0	1,1	1,2	1,3
H, А/м	0	100	200	300	400	500	600	700

Решение.

При изменении расстояния между магнитопроводом и ярмом происходит изменение энергии магнитного поля

$$dW_{эм} = d(LI^2/2) = I^2/2 dL,$$

которое должно быть равно работе сил, вызывающих перемещение $Fd\delta$, т.е. $dW_{эм} = Fd\delta$,

откуда $F = I^2/2 dL / d\delta$.

Ввиду малости воздушного зазора можно принять

$$dL / d\delta = L / \delta.$$

С помощью преобразований находим

$$L = \Psi_0 / I = \Phi_0 W / I = B_0 S_0 W / I \text{ или}$$

$$LI^2 = B_0 S_0 WI = B_0 S_0 H_0 \delta = B_0^2 S_0 \delta / \mu_0,$$

откуда $F = B_0^2 S_0 / (2\mu_0)$.

Выражая силу в ньютонах (Н), магнитную индукцию B_0 в теслах (Тл), сечение S в см^2 и подставляя значения магнитной постоянной $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, получаем расчётную формулу $F(H) = 40B_0^2(\text{Тл}) \cdot S_0(\text{см}^2)$.

Подставляя числовые значения заданных величин, вычисляем магнитодвижущую силу $WI = 1980$ А, строим вебер – амперную характеристику $\Phi_{\text{ст}}(WI)$ по заданной кривой намагничивания $B_{\text{ст}}(H_{\text{ст}})$ и далее опрокинутую характеристику воздушного зазора $\Phi(WI - H_0 \delta)$. Из пересечения характеристик находим, что индукция в воздушном зазоре $B_0 = 1,12$ Тл, тогда искомая сила притяжения $F = 40 \cdot 1,12^2 \cdot 5 = 251$ Н.

Задача 2.7. Рассчитать тяговую характеристику подъёмного электромагнита $F(\delta)$ для значений воздушного зазора $\delta = 1,2,3,4$ мм. При расчёте потоком рассеяния и магнитным сопротивлением пренебречь, магнитодвижущая сила катушки электромагнита $WI = 2500$ А. Размеры электромагнита указаны на рис. 2.5 в мм.

Решение.

Магнитодвижущая сила электромагнита расходуется на прохождение магнитного потока через воздушные зазоры, тело электромагнита и поднимаемую деталь

$$WI = 2 \cdot \delta \cdot H_0 + (l_m + l_2)H_0 + l_{m,d} \cdot H_0,$$

или в случае пренебрежения магнитными сопротивлениями участков в теле электромагнита и сопротивлением участка поднимаемой детали

$$WI = \delta_1 H_{01} + \delta \cdot H_{02} = R_{m0} \Phi = (R_{m01} + R_{m02}) \Phi,$$

где $R_{m01} = \delta_1 / (\mu_0 \cdot S_1)$ и $R_{m02} = \delta / (\mu_0 \cdot S_2)$ – магнитные сопротивления воздушных зазоров средней (S_2) и внешней (S_1) частей электромагнита.

Сила тяги электромагнита состоит из двух различных сил:

$$F = F_1 + F_2,$$

$$\text{где } F_1 = B_1^2 / 2\mu_0 \cdot S_1 \text{ и } F_2 = B_2^2 / 2\mu_0 \cdot S_2.$$

Магнитные индукции воздушных зазоров

$$B_1 = \Phi / S_1 = WI / ((R_{\text{мo1}} + R_{\text{мo2}}) S_1) = \\ = WI / ((\delta_1 / \mu_0 \cdot S_1 + \delta_2 / \mu_0 \cdot S_2) S_1).$$

$$B_2 = \Phi / S_2 = WI / ((R_{\text{мo1}} + R_{\text{мo2}}) S_2) = \\ = WI / (\delta_1 / \mu_0 \cdot S_1) S_2).$$

Получаем

$$F_1 = [WI / (\delta_1 / \mu_0 \cdot S_1 + \delta_2 / \mu_0 \cdot S_2) S_1]^2 \cdot S_1 / (2\mu_0) = \\ = W^2 I^2 \mu_0 / [2(\delta_1 / S_1 + \delta_2 / S_2)^2 \cdot S_1];$$

$$F_2 = [WI / (\delta_1 / \mu_0 \cdot S_1 + \delta_2 / \mu_0 \cdot S_2) S_2]^2 \cdot S_2 / 2\mu_0 = \\ = W^2 I^2 \mu_0 / [2(\delta_1 / S_1 + \delta_2 / S_2)^2 \cdot S_2].$$

Задавая значениями $\delta_1 = \delta_2 = 1, 2, 3, 4$ и подставляя значения площади средней S_2 и внешней S_1 частей электромагнита

$$S_1 = (D^2 - d^2) / (4 \cdot \pi) = 0,0867 \text{ м}^2,$$

$S_2 = d_1^2 / (4 \cdot \pi) = 0,081 \text{ м}^2$ получаем таблицу 2.2

Таблица 2.2

$\delta_1, \text{мм}$	1	2	3	4
$F_1 \cdot 10^4 \text{ Н}$	8	1,97	0,892	0,50
$F_2 \cdot 10^4 \text{ Н}$	8,54	2,055	0,960	0,537
$F \cdot 10^4 \text{ Н}$	16,54	4,025	1,852	1,035

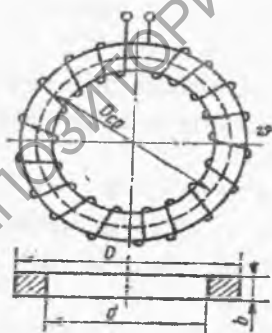


Рис. 2.1.

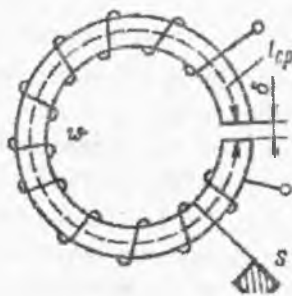


Рис. 2.2.

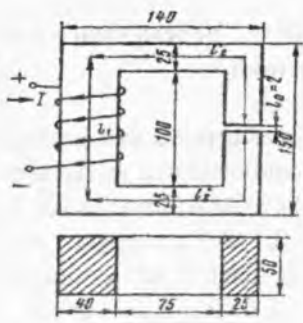


Рис. 2.3

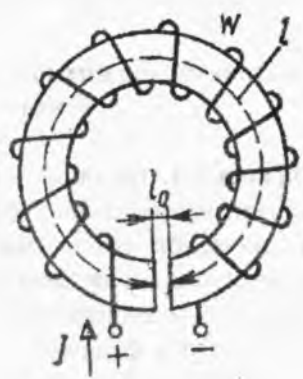


Рис. 2.4

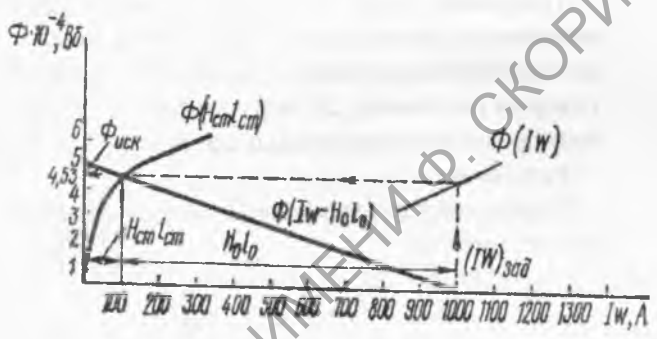


Рис. 2.5.

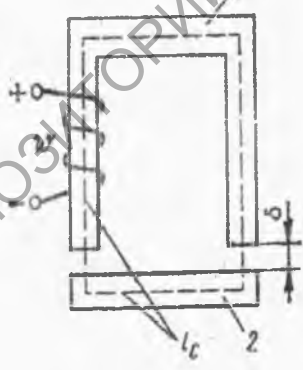


Рис. 2.6

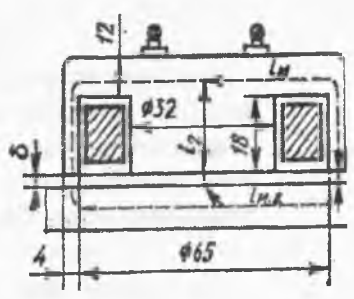


Рис.2.7

3. Электромагнитные устройства переменного магнитного потока.

Задача 3.1. На рис.3.1 даны геометрические размеры магнитопровода цели в мм, выполненного из электротехнической стали марки 1512. Магнитопровод набран из листов толщиной $d = 0,5$ мм. Толщина изоляции между листами $0,05$ мм. Удельный вес стали $\gamma = 7,8 \text{ г/см}^3$. Напряжение сети $U = 220 \text{ В}$, число витков $W = 1300$, частота $f = 50 \text{ Гц}$.

Требуется определить: 1) ток I_1 , параметры последовательной и параллельной схем замещения, если можно пренебречь активным сопротивлением обмотки и потоком рассеяния; 2) как изменится ток I^* , если в магнитопровode появился воздушный зазор $l_a = 0,1$ мм.

Решение.

Определяем длину средней магнитной линии и сечение магнитопровода

$$L_{\text{ст}} = 80 \cdot 2 + 120 \cdot 2 = 400 \text{ мм} = 40 \text{ см}; S = 30 \cdot 20 = 600 \text{ мм}^2 = 6 \text{ см}^2.$$

Считаем, что изоляция занимает 10% площади магнитопровода, т.е. $S_{\text{ст}} = 0,9S = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, находим значение максимальной магнитной индукции:

$$B_T = U_T / (w W S_{\text{ст}}) = 220 \cdot \sqrt{2} / (2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1300 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}) = 1,4 \text{ Тл}.$$

Находим активную и реактивную составляющие тока I (они определяются мощностью потерь и намагничивающей мощностью)

$$I_a = P_{\text{ст}} / U = P_{\text{ст}} / GU, \quad I_p = Q_{\text{ст}} / U = q_{\text{ст}} G / U.$$

Масса магнитопровода

$$G = \gamma l_{\text{ст}} S_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 40 \cdot 5,4 = 1,68 \text{ кг}.$$

По кривым зависимостей удельных активной и намагничивающей мощностей $p_{\text{ст}}$ (Вт) и $q_{\text{ст}}$ (Вар), которые приводятся в справочной литературе, находим

$$p_{\text{ст}} = 2,8 \text{ Вт/кг}; \quad q_{\text{ст}} = 26 \text{ Вар/кг};$$

тогда

$$P_{\text{ст}} = p_{\text{ст}} G = 2,8 \cdot 1,68 = 4,7 \text{ Вт}; \\ Q_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} G = 26 \cdot 1,68 = 43,8 \text{ Вар};$$

$$I_a = p_{ст}/U = 4,7/220 = 0,0214 \text{ A} = 21,4 \text{ mA};$$

$$I_p = Q_{ст}/U = 43,8/220 = 0,199 \text{ A} = 199 \text{ mA};$$

$$I = \sqrt{(I_a^2 + I_p^2)} = 201 \text{ mA}.$$

Параметры параллельной и последовательной схем замещения определяются так (рис. 3.2)

$$q_{ст} = I_a/U = 0,0214/220 = 0,0973 \cdot 10^{-3} \text{ 1/Ом};$$

$$v_{ст} = I_p/U = 0,199/220 = 0,905 \cdot 10^{-3} \text{ 1/Ом};$$

$$Z_{ст} = U/I = 220/0,201 = 1095 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi = I_a/I = 0,0214/0,201 = 0,106;$$

$$R_{ст} = Z_{ст} \cos \varphi = 1095 \cdot 0,106 = 116 \text{ Ом};$$

$$X_{ст} = \sqrt{(Z_{ст}^2 - R_{ст}^2)} = \sqrt{(1095^2 - 116^2)} = 1090 \text{ Ом}.$$

При появлении воздушного зазора I_b в магнитопроводе ток в катушке находим по формуле

$$I^* = \sqrt{(I_a^2 + (I_p + I_b)^2)},$$

$$\text{где: } I_b = H_b l_b / W = 8000 \text{ Вт} l_b / (\sqrt{2} W) =$$

$$= 8000 \cdot 1,4 \cdot 0,01 // (\sqrt{2} \cdot 1300) = 0,0615 \text{ A},$$

$$\text{тогда: } I^* = \sqrt{(0,0214^2 + (0,199 + 0,0615)^2)} = 0,261 \text{ A} =$$

$$= 261 \text{ mA}.$$

Задача 3. 2. Определить сопротивление R_0 и X_0 , схемы замещения катушки с ферромагнитным сердечником (рис. 3.3) по следующим данным: действующее значение напряжения на катушке 120 В; действующее значение тока 0,5 А; потери мощности в катушке, измеренные ваттметром 2 Вт; сопротивление обмотки, измеренное методом моста переменного тока 4 Ом. По-лем рассеяния пренебречь.

Решение.

Мощность потерь в катушке P , измеренная ваттметром, складывается из мощности потерь в меди обмотки P_m и в магнитопроводе P_c .

$$\text{Следовательно } P_c = 2 - 0,5^2 \cdot 4 = 1 \text{ Вт}.$$

Сопротивление R_0 в схеме замещения катушки определяется мощностью потерь в магнитопроводе:

$$P_0 = P_c / I^2 = 1 / 0,5^2 = 4 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление катушки

$$Z = U/I = 120/0,5 = 240 \text{ Ом},$$

а ее индуктивное сопротивление

$$X_0 = \sqrt{(Z^2 - (R + R_0)^2)} = \sqrt{(240^2 - (4+4)^2)} \approx 240 \text{ Ом.}$$

Задача 3.3. Построить в масштабе векторную диаграмму катушки с ферромагнитным сердечником, к зажимам которой подведено синусоидальное напряжение $U = 220\text{В}$. При токе $I = 0,25 \text{ А}$ мощность катушки равна 25 Вт . Число витков катушки $W = 500$, а активное сопротивление обмотки, измеренное мостом постоянного тока, равно 240 Ом . Потокосцеплением катушки пренебречь.

Решение.

Мощность потерь в обмотке

$$P_m = R^2 I = 240 \cdot 0,25^2 = 15 \text{ Вт.}$$

Мощность потерь в магнитопроводе

$$P_c = P - P_m = 25 - 15 = 10 \text{ Вт.}$$

Угол сдвига фаз φ между вектором напряжения катушки и вектором эквивалентного поля определяется по формуле

$$\cos \varphi = P/UI = 25/220 \cdot 0,25 = 0,45, \quad \varphi = 63^\circ$$

Откладываем в некотором масштабе вектор напряжения \dot{U} и под углом 63° к нему вектор тока $\dot{I}_{\text{эк}}$, модуль которого равен I (рис. 3.4). Вычитая из вектора \dot{U} вектор активного падения напряжения $R\dot{I}_{\text{эк}}$, находим вектор \dot{U}' , равный по значению и противоположный по направлению вектору э.д.с. \dot{E} ($U' = 220 \text{ В}$).

Вектор потока Φ_m отстаёт по фазе от вектора \dot{U}' на угол 90° , а его значение определяется по формуле

$$\Phi_m = E/(4,44fW) = U'/(4,44fW) = 208/4,44 \cdot 50 \cdot 500 = 1,88 \text{ Вб.}$$

Угол потерь δ , т.е. угол сдвига фаз между $\dot{I}'_{\text{эк}}$ и вектором Φ_m определяется из соотношения

$$\sin \delta = P_c / (U'I) = 10 / (208 \cdot 0,25) = 0,192; \quad \delta = 11^\circ.$$

Варианты задачи:

1) $U = 127 \text{ В}; I = 0,05 \text{ А}, P = 1,5 \text{ Вт}; W = 200,$

$$R = 300 \text{ Ом};$$

2) $U = 36 \text{ В}; I = 0,2 \text{ А}; P = 0,2 \text{ Вт}; W = 120; R = 250 \text{ Ом.}$

Задача 3.4. Определить параметры последовательной и параллельной схем замещения и построить векторные диаграммы для катушки включённой в сеть с напряжением $U = 120$ В, частотой $f = 50$ Гц. При отсутствии сердечника приборы в схеме (рис. 3.5, а) показали:

$$U = 120 \text{ В}, I = 14 \text{ А}, P = 100 \text{ Вт};$$

при наличии сердечника в той же катушке (рис. 3.5, б) приборы показали:

$$U = 120 \text{ В}, I = 8 \text{ А}, P = 120 \text{ Вт (принять } X_{\text{рас}} = 0).$$

Решение.

Схема 3.4, а.

Полное сопротивление катушки $Z_k = U/I = 8,55$ Ом,
активное сопротивление $R_k = P/I^2 = 0,51$ Ом,
индуктивное сопротивление катушки

$$x_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 8,5 \text{ Ом}.$$

На рис. 3.5, в представлена последовательная схема замещения катушки и соответствующая ей векторная диаграмма.

Параметры параллельной схемы замещения:

$$G = R/Z_k^2 = 0,0694 \text{ см} - \text{активная проводимость};$$

$B = x_L/Z_k^2 = 0,1157 \text{ см} - \text{реактивная проводимость};$

$$Y = 1/Z_k = 0,116 \text{ см} - \text{полная проводимость}.$$

На рис. 3.5, г представлены параллельная схема замещения и соответствующая ей векторная диаграмма.

Схема 3.5, б.

Полное сопротивление катушки $Z_{\text{эк}} = U/I = 150$ Ом,
активное сопротивление $R = 0,51$ Ом,

индуктивное сопротивление $x_0 = \sqrt{(Z_{\text{эк}}^2 - (R+R_0)^2)}$;

при этом

$$R+R_0 = P/I^2 = 1,87 \text{ Ом}, R_0 = 1,87 - 0,51 = 1,36 \text{ Ом}.$$

Тогда $x_0 = 14,9$ Ом.

Полное сопротивление $Z_0 = \sqrt{(R_0^2 + Y_0^2)} = 14,92$ Ом.

Составляющая напряжения U , уравновешивая действие э.д.с. E_1 , равна $U' = Z_0 I = 119$ В. Тангенс угла потерь в стали $\text{tg } \alpha = P_c/Q_c = R_0/x_0 = 0,091$; $\alpha = 5^\circ 12'$. Угол сдвига фаз напряжения U на катушке и поля i равен

$$\varphi = \arccos((R+R_0/Z_{\Sigma k}) = 83^\circ.$$

На рис. 3.5, д представлена последовательная схема замещения и векторная диаграмма для катушки с магнитопроводом.

Параметры параллельной схемы замещения катушки с магнитопроводом

$$G_0 = R_0/Z_0^2 = 0,0061 \text{ см},$$

$$B_0 = x_0/Z_0^2 = 0,00666 \text{ см}, I_0 = 1/Z_0 = 0,0736 \text{ см}.$$

На рис. 3.5, е представлены параллельная схема замещения катушки с магнитопроводом и соответствующая ей векторная диаграмма. Токи в ветвях схемы замещения равны

$$I_a = U' \cdot G_0 = 0,725 \text{ А}, I_p = U' B_0 = 7,85 \text{ А}.$$

3.1. Трансформаторы

Основными параметрами трансформатора являются:
 1. Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$. Это полная мощность (кВА), которую трансформатор, установленный на открытом воздухе, может непрерывно отдавать в течение всего срока службы при номинальном напряжении и при максимальной и среднегодовой температурах окружающего воздуха, равной соответственно 40 и 5 градусов.

Если указанные температуры отличаются от номинальных, то и номинальная мощность будет отличаться от указанной и в паспорте.

2. Номинальное первичное напряжение $U_{\text{ном1}}$. Это напряжение на которое рассчитана первичная обмотка трансформатора.

3. Номинальное вторичное напряжение $U_{\text{ном2}}$. Это напряжение на выводах вторичной обмотки трансформатора при холостом ходе и номинальном первичном напряжении. При нагрузке вторичное напряжение U_2 снижается из-за потерь в трансформаторе.

Например: если $U_{\text{ном2}} = 400 \text{ В}$, то при полной нагрузке трансформатора вторичное напряжение $U_2 = 380 \text{ В}$, т.к. 20 В теряется в трансформаторе.

4. Номинальный первичный и вторичный ток $I_{\text{ном1}}$, $I_{\text{ном2}}$. Это токи, вычисленные по номинальной мощности и номинальным напряжениям. Для однофазного трансформатора

$$I_{\text{ном1}} = S_{\text{ном}} / (U_{\text{ном2}} n); \quad I_{\text{ном2}} = S_{\text{ном}} / U_{\text{ном2}}$$

Для трёхфазного трансформатора

$$I_{\text{ном1}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном1}} n), \quad I_{\text{ном2}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном2}}),$$

η – к.п.д. трансформатора. На практике при определении токов принимают $\eta = 1,0$. Трансформаторы чаще всего работают с нагрузкой меньше номинальной, поэтому вводят понятие о коэффициенте нагрузки $K_{\text{н}}$. Если трансформатор с мощностью $S_{\text{ном}} = 1000$ кВА отдаёт потребителю мощность $S_2 = 950$ кВА, то $K_{\text{н}} = 950/1000 = 0,95$. Значение отдаваемой трансформатором активной и реактивной мощностей зависит от коэффициента мощности потребителя $\cos \varphi_2$. Например при $S_{\text{ном}} = 1000$ кВА, $K_{\text{н}} = 1,0$, $\cos \varphi_2 = 0,9$, отдаваемая активная мощность

$$P_2 = S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 = 1000 \times 0,9 = 900 \text{ кВт},$$

а реактивная $Q_2 = S_{\text{ном}} \sin \varphi_2 = 1000 \times 0,436 = 436$ кВар.

Если потребитель увеличит $\cos \varphi_2$ до 1,0, то $P_2 = 1000 \cdot 1,0 = 1000$ кВт, $Q_2 = 1000 \cdot 0 = 0$, т.е. вся отдаваемая мощность будет активной.

Отношение линейных напряжений в трёхфазных трансформаторах называют линейным коэффициентом трансформации, который равен отношению чисел витков обмоток, если они имеют одинаковые схемы соединения (Y/Y₀ и Δ/Δ). При других схемах коэффициент трансформации находят по формулам

$$K = U_{\text{ном1}} / U_{\text{ном2}} = \sqrt{3} W_1 / W_2 \quad (Y/\Delta);$$

$$K = U_{\text{ном1}} / U_{\text{ном2}} = W_1 / (\sqrt{3} W_2) \quad (\Delta/Y).$$

Для уменьшения установленной мощности трансформаторов и снижения потерь энергии в сетях производят компенсацию части реактивной мощности конденсаторами. Пусть реактивная мощность предприятия $Q = 5000$ кВар, а заданная системой мощность $Q_3 = 1000$ кВар. Тогда необходимо скомпенсировать с по-

мощью конденсаторов мощность до $Q_6 = Q - Q_3 = 5000 - 1000 = 4000 \text{ кВар}$. Для этого применяют комплекты конденсаторных установок, например УК – 0.38 – 450 Н мощностью 450 кВар. Суммарная мощность батареи 9 450 = 4050 кВар, что близко к необходимому значению 4000 кВар.

Задача 3.5. Трёхфазный трансформатор имеет следующие номинальные характеристики $S_{\text{ном}} = 1000 \text{ кВА}$, $U_{\text{ном1}} = 10 \text{ кВ}$, $U_{\text{ном2}} = 400 \text{ В}$, потери в стали $P_{\text{ст}} = 2,45 \text{ кВт}$, потери в обмотках $P_{\text{о, ном}} = 12,2 \text{ кВт}$. Первичные обмотки соединены в треугольник, вторичные - в звезду. Сечение магнитопровода $Q = 450 \text{ см}^2$, амплитуда магнитной индукции $B_m = 1,5 \text{ Тл}$. Частота тока в сети $f = 50 \text{ Гц}$. От трансформатора потребляется активная мощность $P_2 = 810 \text{ кВт}$ при $\cos \varphi_2 = 0,9$. Определить:

- 1) номинальные токи в обмотках и токи при фактической нагрузке;
- 2) числа витков обмоток;
- 3) к.п.д. трансформатора при номинальной и фактической нагрузках.

Решение.

Номинальные токи в обмотках:

$$I_{\text{ном1}} = S_{\text{ном}} \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном1}}) = (1000 \cdot 1000) / (1,73 \cdot 10\,000) = 58 \text{ А};$$

$$I_{\text{ном2}} = S_{\text{ном}} \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном2}}) = (1000 \cdot 1000) / (\sqrt{3} \cdot 400) = 1445 \text{ А}.$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

$$k_n = P_2 / (S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2) = 810 / (1000 \cdot 0,9) = 0,9.$$

Токи в обмотках при фактической нагрузке

$$I_1 = k_n I_{\text{ном1}} = 0,9 \cdot 58 = 52 \text{ А};$$

$$I_2 = k_n I_{\text{ном2}} = 0,9 \cdot 1445 = 1300 \text{ А}.$$

Фазные э.д.с., наводимые в обмотках. Первичные обмотки соединены в треугольник, а вторичные - в звезду, поэтому, пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке, считаем, что

$$E_{1\phi} \approx U_{\text{ном1}} = 1000 \text{ В}, \quad E_{2\phi} = U_{\text{ном2}} / \sqrt{3} = 230 \text{ В}.$$

Числа витков обеих обмоток находим из формулы

$$E_{1\phi} = 4,44 f W_1 \Phi_T = 4,44 f W_1 B_T Q,$$

откуда

$$W_1 = E_{1\phi} / (4,44 f B_T Q) = 10\,000 / (4,44 \cdot 50 \cdot 1,5 \cdot 0,045) = 667.$$

Здесь

$$Q = 450 \text{ см}^2 = 0,045 \text{ м}^2,$$

$$W_2 = W_1 E_{2\phi} / E_{1\phi} = 667 \cdot 230 / 10\,000 = 15,3.$$

К.п.д. трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{ном}} = (S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 \cdot 100\%) / (S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{ном}}) = \\ = (1000 \cdot 0,9 \cdot 100) / (1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 12,2) = 98,4\%;$$

К.п.д. трансформатора при фактической нагрузке

$$\eta = (k_{\text{ц}} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2) / (k_{\text{н}} S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + k_{\text{н}}^2 P_{\text{ном}}) \cdot 100\% = \\ = (0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9 \cdot 100\%) / (0,9 \cdot 1000 \cdot 0,9 + 2,45 + 0,9^2 \cdot 12,2) = \\ = 98,5\%.$$

Задача 3.6. Однофазный понижающий трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 500 \text{ В} \cdot \text{А}$ служит для питания ламп местного освещения металлорежущих станков. Номинальное напряжение обмоток

$U_{\text{ном1}} = 380 \text{ В}$, $U_{\text{ном2}} = 24 \text{ В}$. К трансформатору присоединены десять ламп накаливания мощностью 40 Вт каждая. Их коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 1,0$. Магнитный поток в магнитопроводе $\Phi_m = 0,005 \text{ Вб}$. Частота сети $f = 50 \text{ Гц}$. Потерями в трансформаторе пренебречь. Определить:

- 1) номинальные токи в обмотках;
- 2) коэффициент нагрузки трансформатора ;
- 3) токи в обмотках при действительной нагрузке;
- 4) число витков обмоток;
- 5) коэффициент трансформации.

Решение.

Номинальные токи в обмотках

$$I_{\text{ном1}} = S_{\text{ном}} / U_{\text{ном1}} = 500 / 380 = 1,32 \text{ А};$$

$$I_{\text{ном2}} = S_{\text{ном}} / U_{\text{ном2}} = 500 / 24 = 20,8 \text{ А}.$$

Коэффициент нагрузки трансформатора

$$k_{\text{н}} = P_2 / (S_{\text{ном}} \cos \varphi_2) = 10 \cdot 40 / (500 \cdot 1,0) = 0,8.$$

Токи в обмотках при действительной нагрузке

$$I_1 = k_n I_{\text{ном1}} = 0,8 \cdot 1,32 = 1,06 \text{ А};$$

$$I_2 = k_n I_{\text{ном2}} = 0,8 \cdot 20,8 = 16,6 \text{ А}.$$

При холостом ходе $E_1 \approx U_{\text{ном1}}$, $E_2 \approx U_{\text{ном2}}$

Число витков обмоток находим из формулы

$$E = 4,44 f W \Phi_m.$$

Тогда

$$W_1 = E_1 / (4,44 f \Phi_T) = 380 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,005) = 340 \text{ витков};$$

$$W_2 = E_2 / (4,44 f \Phi_T) = 24 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,005) = 22 \text{ витка}.$$

Коэффициент трансформации

$$K = E_1 / E_2 = W_1 / W_2 = 340 / 22 = 15,5.$$

Задача 3.7. Предприятие потребляет активную мощность $P = 1550 \text{ кВт}$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,72$. Энергосистема предписала уменьшить потребляемую реактивную мощность до 450 кВар . Определить: необходимую мощность конденсаторной батареи и выбрать ее тип; необходимую трансформаторную мощность и коэффициент нагрузки в двух случаях:

а) до установки батареи;

б) после установки батареи.

Выбрать тип трансформатора. Номинальное напряжение сети $U = 10 \text{ кВ}$.

Решение.

Необходимая трансформаторная мощность до установки конденсаторов

$$S_{\text{тр}} = P_2 / \cos \varphi_2 = 1550 / 0,72 = 2153 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Из таблицы выбираем трансформатор типа

ТМ- 2500/10 с номинальной мощностью $2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$.

Коэффициент нагрузки $K_n = 2153/2500 = 0,86$.

Необходимая предприятию реактивная мощность

$$Q = S_{\text{тр}} \sin \varphi_2 = 2153 \cdot 0,693 = 1492 \text{ кВар}.$$

Здесь $\sin \varphi_2 = 0,693$.

Необходимая мощность конденсаторной батареи

$$Q_6 = Q - Q_3 = 1492 - 450 = 1042 \text{ кВар}.$$

По таблице выбираем комплектные конденсаторные установки типа УК-0,38-540Н мощностью 540 кВар в количестве 2 штук. Общая реактивная мощность составит $Q_6' = 2 \cdot 540 = 1080$ кВар, что близко к необходимой мощности 1042 кВар.

Нескомпенсированная реактивная мощность

$$Q_{\text{нск}} = Q - Q_6' = 1492 - 1080 = 412 \text{ кВар.}$$

Необходимая трансформаторная мощность

$$S_{\text{тр}}' = \sqrt{(P_2^2 + Q_{\text{нск}}^2)} = \sqrt{(1550^2 + 412^2)} = 1604 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Принимаем к установке один трансформатор ТМ-1600/10 мощностью 1600 кВА. Его коэффициент нагрузки составит $k_n = 1604/1600 \approx 1,0$.

Таким образом, компенсация реактивной мощности позволила значительно уменьшить установочную трансформаторную мощность.

Задача 3.8. Определить параметры Г-образной схемы замещения (рис. 3.6) однофазного трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 8,8$ кВА, номинальным напряжением $U_{\text{ном1}} = 220$ В по данным опытов холостого хода и короткого замыкания $P_x = 50$ Вт, $I_x = 2$ А, $P_{\text{к.ном}} = 800$ Вт, $U_k = 32$ В.

Решение.

Номинальный первичный ток

$$I_{\text{ном1}} = S_{\text{ном}} / U_{\text{ном1}} = 8800/220 = 40 \text{ А.}$$

Из опыта холостого хода находим:

$$R_0 = P_x / I_x^2 = 50/4 = 12,5 \text{ Ом;}$$

$$Z_0 = U_{\text{ном1}} / I_x = 220/1 = 110 \text{ Ом;}$$

$$X_0 = \sqrt{(Z_0^2 - R_0^2)} = 109 \text{ Ом.}$$

Из опыта короткого замыкания определяем

$$R_k = R_{\text{к.ном}} / I_{\text{ном1}}^2 = 800/1600 = 0,5 \text{ Ом;}$$

$$Z_k = U_k / I_{\text{ном1}} = 32/40 = 0,8 \text{ Ом;}$$

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 0,625 \text{ Ом.}$$

Задача 3.9. Найти номинальные токи $I_{\text{ном1}}, I_{\text{ном2}}$, токи холостого хода I_x и сопротивления Z_0 и Z_k , к Г-образной схемы замещения трёхфазных трансформаторов, технические данные взять из таблицы 3.1, пара-

метры Z_0 и Z_K влияют на напряжение вторичной обмотки трансформатора, поэтому их значение необходимо при анализе работы трансформатора в разных режимах нагрузки.

Таблица 3.1

Харак. Тр-ра	$S_{2\text{ ном}}$ кВА	$U_{\text{ном}1}$ кВ	$U_{\text{ном}2}$ кВ	i_x %	u_x %	P_x Вт	P_K Вт	Способ со- един.
TSM 60/35	50	35	400	11,1	4,55	502	1200	Y/∇
TSM 560/6	560	6	400	4,58	4,27	1970	7000	Y/Y

Решение.

В паспорте трёхфазных трансформаторов приводятся номинальная мощность и мощность потерь всех трёх фаз: под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, а под минимальными токами – линейные токи независимо от соединения обмоток.

Номинальные токи трансформатора TSM 60/35

$$I_{\text{ном}1} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}1}) = 60 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3) = 0,99 \text{ А},$$

$$I_{\text{ном}2} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}2}) = 60 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 87,5 \text{ А}.$$

Ток холостого хода (первичной обмотки)

$$I_x = i_x \cdot I_{\text{ном}1} = 0,11 \cdot 0,99 = 0,1 \text{ А}.$$

Схема замещения трёхфазных трансформаторов составляется только для одной фазы, поэтому для расчёта её сопротивления нужно использовать фазные напряжения, токи и мощности. У трансформатора TSM 60/35 - первичная обмотка соединена звездой, а вторичная - треугольником, поэтому:

фазные напряжения

$$U_{\text{фном}1} = U_{\text{ном}1} / \sqrt{3} = 35 / \sqrt{3} = 20,2 \text{ кВ};$$

$$U_{\text{фном}2} = U_{\text{ном}2} = 400 \text{ В};$$

фазные токи

$$I_{\text{фном}1} = I_{\text{ном}1} = 0,99 \text{ А}; I_{\text{фном}2} = I_{\text{ном}2} / \sqrt{3} = 50,5 \text{ А}.$$

Активные сопротивления Γ - образной схемы замещения трансформатора

$$R_k = P_{\text{кномк}} / (3 \cdot I_{\text{фном1}}^2) = 1208 / (3 \cdot 0,99^2) = 410 \text{ Ом};$$

$$R_x = P_x / (3 \cdot I_x^2) = 502 / 3 \cdot 0,1^2 = 16800 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление Z_x находим с помощью формулы напряжения короткого замыкания

$$U_k = Z_k \cdot I_{\text{фном1ф}} / U_{\text{фном1ф}} = Z_k \cdot I_{\text{фном1ф}} \cdot 3 \cdot U_{\text{фном1ф}} / (3 \cdot U_{\text{фном1ф}}^2) \\ = Z_k S_{\text{ном}} / U_{\text{фном2ф}};$$

$$Z_k = U_k U_{\text{фном1ф}} / S_{\text{ном}} = 0,0455 (35 \cdot 10^3)^2 / 60 \cdot 10^3 = 928 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = 831 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление ветви холостого хода

$$Z_0 = U_{\text{фном1ф}} / I_x = 20,2 \cdot 10^3 / 0,1 = 202 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Реактивное сопротивление

$$X_0 = \sqrt{(Z_0^2 - R_0^2)} = \sqrt{(202^2 - 16,8^2)} \cdot 10^6 = 201 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Для трансформатора ТСМ 560/6 имеем:

$$I_{\text{ном1}} = 54 \text{ А}; I_{\text{ном2}} = 808 \text{ А};$$

$$I_x = 2,48 \text{ А}; R_k = 0,8 \text{ Ом}; R_0 = 106 \text{ Ом};$$

$$X_a = 2,63 \text{ Ом}; X_0 = 1400 \text{ Ом}.$$

Задача 3.10. Для трансформатора ТСМ 60/35, данные которого приведены в таблице 3.1, определить при половинной нагрузке ($\cos \varphi_n = 0,9$) напряжение на вторичной обмотке, к.п.д., ток и $\cos \varphi_1$ первичной обмотки.

Решение.

Для расчёта относительного изменения напряжения предварительно необходимо найти

$$\cos \varphi_n = P_k / Z_k = P_k / S_k = P_k / (\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном1}} \cdot u_k \cdot U_{\text{ном}}) = P_k / (S_{\text{ном}} \cdot U_k);$$

$$\cos \varphi_n = 1208 / (60 \cdot 10^3 \cdot 0,0455) = 0,422; \varphi_n = 64^\circ.$$

Относительное изменение напряжения определяется формулой:

$$\Delta U_2 \beta (U_{k_a} \cos \varphi_n + U_{k_p} \sin \varphi_n) = \beta U_k (\cos \varphi_n + \sin \varphi_k \sin \varphi_n) = \\ = \beta U_k \cos (\varphi - \varphi_k),$$

При $\cos \varphi_n = 0,9$, $\varphi_n = 26^\circ$.

Поэтому $\Delta U_2 = 0,0455 \beta \cos(26^\circ - 64^\circ) = 0,0358 \beta$.

При $\beta = 0,5$ напряжение на вторичной обмотке

$$U_2 = (1 - 0,5\Delta U_2)U_{\text{ном}2} = (1 - 0,5 \cdot 0,0358) \cdot 400 = 393 \text{ В.}$$

К.п.д. (при $\beta = 0,5$)

$$\eta = 1 - (\beta^2 P_{\text{ном.к}} + P_{\text{к}}) / (\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{п}} + \beta^2 P_{\text{кном}} + P_{\text{к}}) = \\ = 1 - 0,5^2 \cdot 1200 + 502 / (0,5 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,9 + 0,5^2 \cdot 1200 + 502) = \\ = 0,97.$$

Активная мощность первичной обмотки

$$P_1 = P_2 / \eta = (\beta S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{п}}) / \eta = 0,5 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,9 / 0,97 = \\ = 27,8 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Ток первичной обмотки

$$I_1 = S_{\text{ном}} / \sqrt{3} \times U_{\text{ном}1} = \sqrt{(P_1^2 + Q_1^2)} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}1}).$$

Если реактивные мощности, обусловленные полями рассеяния трансформатора не учитывать, то реактивная мощность первичной обмотки Q_1 будет равна сумме реактивных мощностей нагрузки Q_2 и намагничивания сердечника трансформатора $Q_0 \cong \sqrt{3} U_{\text{ном}1} I_{\text{х.р.}}$ (реактивная составляющая тока холостого хода, практически равна полному току $I_{\text{х}}$)

$$Q_1 = \beta S_{\text{ном}} \sin \varphi_{\text{п}} + \sqrt{3} U_{\text{ном}1} I_{\text{х}} = 0,5 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot 0,438 + \\ + \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 19,2 \cdot 10^3 \text{ Вар,}$$

следовательно

$$I_1 = \sqrt{((27,8 \cdot 10^3)^2 + (19,2 \cdot 10^3)^2)} / \sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3 = 0,535 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности нагруженного трансформатора

$$\cos \varphi_1 = P_1 / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}1} \cdot I_1) = 27,8 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,535) = \\ = 0,86.$$

Задача 3.11. Для трёхфазного трансформатора мощностью $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ соединение обмоток $Y \setminus Y_0 - \text{O}$, известно: номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{\text{ном}1} = 6000 \text{ В}$, напряжения холостого хода на вторичных обмотках трансформатора $U_{20} = 400 \text{ В}$, напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}} = 5,5 \%$, мощность короткого замыкания $P_{\text{к}} = 2400 \text{ Вт}$, мощность холостого хода $P_0 = 600 \text{ Вт}$, ток холостого хода $I_0 = 0,07 I_{\text{ном}1}$. Определить:

- 1) сопротивление обмоток трансформатора R_1, X_1, R_2, X_2 ;
- 2) эквивалентное сопротивление Z_0 (сопротивление намагничивающей цепи) и его составляющие R_0 и X_0 , которыми заземляется магнитная цепь трансформатора;
- 3) угол магнитных потерь δ . Построить характеристики трансформатора:
 - а) Зависимость $U_2 = f_1(-)$ напряжения U_2 от нагрузки (внешняя характеристика);
 - б) Зависимость $\eta = f_2(-)$ коэффициента полезного действия от нагрузки;
 - в) зависимость $\eta = f_2(-)$ к.п.д. от нагрузки; γ — коэффициент нагрузки трансформатора (коэффициент мощности нагрузки принять $\cos \varphi_2 = 0,75$).

Построить векторную диаграмму трансформатора при нагрузке, составляющей 0,8 от номинальной мощности трансформатора $S_{ном}$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$. Составить T-образную схему замещения трансформатора.

Решение.

Определяем номинальный ток первичной обмотки
 $I_{ном1} = S_{ном} / (\sqrt{3} \cdot U_{ном1}) = 100 \cdot 1000 / (\sqrt{3} \cdot 6000) = 9,6 \text{ A}.$

Определяем ток холостого хода и $\cos \varphi$:

$$I_0 = 0,07 I_{ном1} = 0,07 \cdot 9,6 = 0,67 \text{ A};$$

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} \cdot U_{ном1} \cdot I_0) = 600 / (\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 0,67) = 0,086,$$

$$\varphi_0 = 85^\circ.$$

Находим угол магнитных потерь $\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ.$

Сопротивления короткого замыкания:

$$Z_k = U_{к.ф.} / I_{к.ф.} = 0,055 \cdot 6000 / (\sqrt{3} \cdot 9,6) = 19,6 \text{ Ом};$$

$$R_k = P_k / 3 I_k^2 = 2400 \cdot 3 / 3 \cdot 9,6^2 = 8,7 \text{ Ом},$$

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)} = \sqrt{(19,6^2 - 8,7^2)} = 17,9 \text{ Ом}.$$

Сопротивление первичной обмотки:

$$R_1 = R_2' = R_k / 2 = 8,7 / 2 = 4,35 \text{ Ом};$$

$$X_{d1} = X_{d2}' = X_k / 2 = 17,9 / 2 = 8,95 \text{ Ом}.$$

Сопротивление вторичной обмотки:

$$R_2 = R_2'' / n^2 = 4,35 / 225 = 0,0193 \text{ Ом};$$

$$X_{d2} = X_{d2}'/n_2 = 8,95/225 = 0,0398 \text{ Ом};$$

$$\text{где } n = U_{\text{ном1}}/U_{z0} = 6000/400 = 15.$$

Определяем сопротивление намагничивающей цепи:

$$Z_0 = U_{\text{н.ф.}} / I_{0\phi} = 6000/\sqrt{(3 \cdot 0,67)} = 5180 \text{ Ом};$$

$$R_0 = P_0/3 \cdot I_0^2 = 600/3 \cdot 0,67^2 = 447 \text{ Ом};$$

$$X_0 = \sqrt{(Z_0^2 - R_0^2)} = \sqrt{(5180^2 - 447^2)} = 5160 \text{ Ом}.$$

Для построения внешней характеристики $U_2 = f_1(\beta)$, находим потерю во вторичной обмотке трансформатора $\Delta U_2, \% = \beta(u_a \% \cos \varphi_2 + u_p \% \sin \varphi_2)$,

где $u_a \%$, $u_p \%$ - активные и реактивные падения напряжений.

$$u_a \% = u_k \% \cos \varphi_k; \quad \cos \varphi_k = R_k / Z_k;$$

$$u_a \% = 5,5 \cdot 8,7 / 19,9 = 2,4 \%;$$

$$u_p \% = \sqrt{((u_k \%)^2 - (u_a \%)^2)} = \sqrt{((5,5)^2 - (2,4)^2)} = 4,95 \%.$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$U_2 = U_{z0} / 100(100 - \Delta U_2 \%).$$

Задаваясь разными значениями β , определяем напряжение U_2 (таблица 3.2):

Таблица 3.2

β	$\Delta U_2 \%$	$U_2, \text{В}$	η
0,01	-	-	0,555
0,025	-	-	0,757
0,05	-	-	0,757
0,1	0,507	397,97	0,924
0,2	1,014	395,94	0,956
0,3	1,521	393,92	0,965
0,4	2,028	391,89	0,967
0,5	2,535	389,86	0,969
0,6	3,042	287,83	0,969
0,7	3,549	385,80	0,969
0,8	383,78	383,78	0,964
0,9	383,78	385,80	0,963
1,0	5,070	379,72	0,962

Для построения зависимости $\eta = f_2(\beta)$, расчёт к.п.д. производим по формуле

$$\eta = \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 / (\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k).$$

Результаты расчета сведены в таблице.

3.2. Полученные характеристики показаны на рис. 3.7.

Определяем, при какой нагрузке трансформатор имеет максимальный КПД:

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{P_0 / P_k} = \sqrt{600/2400} = 0,5; \quad \eta_{\text{max}} = 0,969.$$

Построение векторной диаграммы (рис. 3.8) начнем с вектора фазного напряжения $\dot{U}_{2\text{ф}} = U_2$ значение, которого для $\beta = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$ равно

$$U_{2\text{ф}} = 383,78/\sqrt{3} = 220 \text{ В}.$$

Приведенное значение вторичного напряжения

$U_{2\text{ф}} = U_{2\text{ф}} n = 222 \cdot 15 = 3330 \text{ В}$. Вектор тока $I_{2\text{ф}}$ отстаёт по фазе от вектора $\dot{U}_{2\text{ф}}$ на заданный угол φ_2 и равен $I_2 = 0,8 I_{2\text{ном}} = 0,8 S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}2}) = 0,8 \cdot 100 \cdot 1000 / (1,73 \cdot 400) = 115,6 \text{ А}$;

$$I_2' = I_2 / n = 115,6 / 15 = 7,72 \text{ А}.$$

Падение напряжения на вторичной обмотке

$$R_2 I_2' = 4,35 \cdot 7,72 = 33,6 \text{ В}; \quad X_{d2} I_2' = 8,95 \cdot 7,72 = 68,3 \text{ В}.$$

Электродвижущую силу \dot{E}_2 находим из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = U_2 + R_2 I_2' + jX_{d2} I_2'$$

Вектор магнитного потока Φ_m опережает вектор \dot{E}_2 на 90° , а ток холостого хода I_0 опережает магнитный поток Φ_m на угол потерь δ . Ток в первичной обмотке трансформатора \dot{I}_1 получаем из уравнений магнитодвижущих сил

$$\dot{I}_1 = I_0 + (-I_2'),$$

где $I_2' = I_2 / n$.

Вектор напряжения первичной обмотки трансформатора \dot{U}_1 определяем из уравнения электрического состояния, составленного по второму закону Кирхгофа для первичной цепи

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_{d1} \dot{I}_1.$$

Током холостого хода можно пренебречь и принять $I_1 = I_2$ или определить I_1 по диаграмме. Тогда падения напряжения в первичной обмотке будут:

$$R_1 I_1 = 4,35 \cdot 7,76 = 33,8 \text{ В}; \quad X_{d1} I_1 = 8,95 \cdot 7,76 = 69,4 \text{ В}.$$

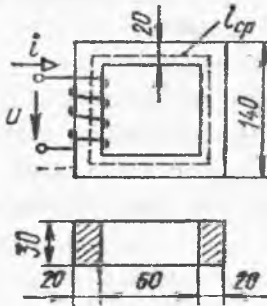


Рис. 3.1

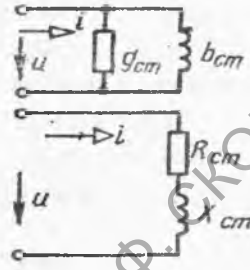


Рис. 3.2

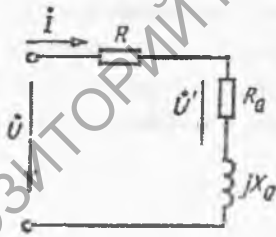


Рис. 3.3

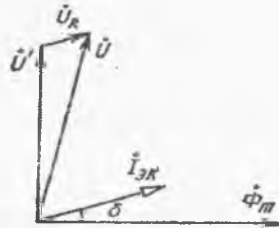


Рис. 3.4

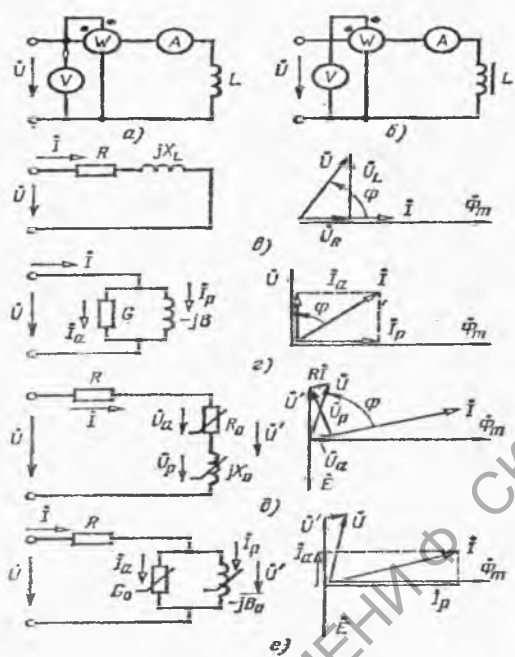


Рис. 3.5

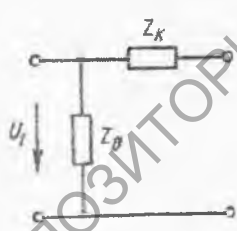


Рис. 3.6

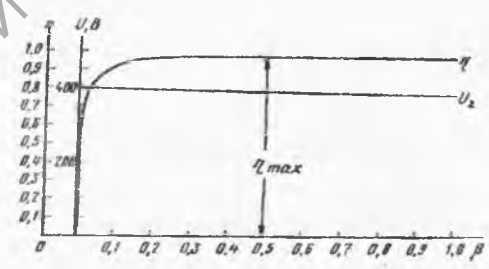


Рис. 3.7

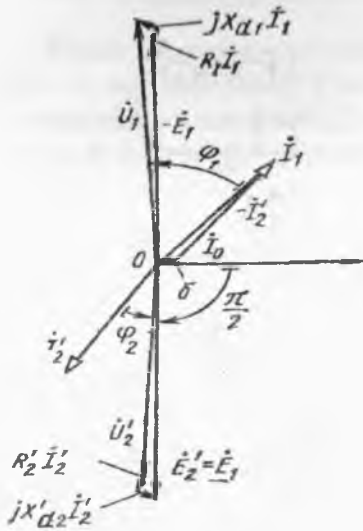


Рис. 3.8

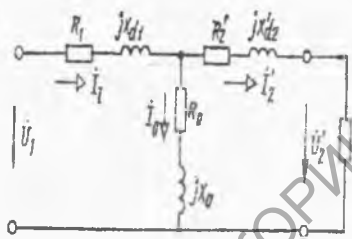


Рис. 3.9

4. Электрические машины переменного тока

4.1 Асинхронные электрические машины

Асинхронные машины характеризуются скольжением $S = (n_1 - n_2) / n_1$,

где n_1 – частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения), об/мин, n_2 – частота вращения ротора, об/мин.

Частота вращения ротора

$$U_2 = 60 \cdot f_1 / p(1-S),$$

где f_1 – частота переменного напряжения сети; p – число пар полюсов машины.

Вращающееся магнитное поле пересекает обмотки статора и ротора, и индуцирует в них э.д.с., действующие значения которых при неподвижном роторе равны

$E_1 = 4,44 K_{w1} f_1 W_1 \Phi_T$; $E_2 = 4,44 K_{w2} f_2 W_2 \Phi_T$,
 где W_1, W_2 – число последовательно соединённых
 витков обмоток фаз статора и ротора;
 K_{w1}, K_{w2} – обмоточные коэффициенты статора и ро-
 тора;

Φ_m – амплитудное значение магнитного потока вра-
 щающегося поля, Вб.

Э.д.с. индуцируется в обмотке вращающегося рото-
 ра $E_{2s} = 4,44 K_{w2} S f_1 W_2 \Phi_m = S E_2$.

Ток во вращающемся роторе определяется так

$$I_{2s} = E_{2s} / (\sqrt{R_2^2 + (X_2 S)^2}),$$

где R_2 – активное сопротивление обмотки неподвиж-
 ного ротора; X_2 – индуктивное сопротивление рассея-
 ния неподвижного ротора.

Вращающийся момент (Н.м.) асинхронного двига-
 теля рассчитывается по формуле

$$M = K_d I_{2s} \Phi_T \cos \varphi_{2s},$$

где K_d – постоянный коэффициент, определённый
 конструктивными данными двигателя;

φ_{2s} – угол сдвига фаз между током ротора и его э.д.с.

К.п.д. асинхронного двигателя

$$\eta = P_1 / P_2 \cdot 100 \% = (P_1 - \Sigma P) / P_1 \cdot 100 \%,$$

где P_2 – полезная мощность на валу двигателя (Вт); P_1
 – мощность, подводимая к двигателю (Вт);

ΣP – суммарная мощность потерь в двигателе (Вт).

Механическая характеристика $n_2 = f(M)$ при

$U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ является основной характери-
 стикой асинхронных электрических машин.

Обозначение типа электродвигателя расшифровыва-
 ется так:

(А) – порядковый номер серии; А – асинхронный; Х –
 алюминиевая оболочка и чугунные щиты (отсутствие Х
 означает, что корпус выполнен из чугуна); В – двига-
 тель встроен в оборудование; Н – исполнение защи-
 щённое IP23, для закрытых двигателей исполнения
 IP44 обозначение защиты не приводится; Р – двига-
 тель с повышенным пусковым моментом; С – сельско-

хозяйственного назначения; цифра после буквенного обозначения показывает частоту оси вращения в мм (100, 112, и т.д.); буквы S, M, L – после цифр – установочные размеры по длине корпуса (S – станина самая короткая, M – промежуточная, L – самая длинная), цифра после размера – число полюсов, буква У – климатическое исполнение, последняя цифра – категория размещения.

В обозначениях типов двухскоростных двигателей после установочного размера указывают через дробь оба числа полюсов.

Задача 4.1. Трёхфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором типа 4AP 160 S6 У3 имеет номинальные данные: мощность $P_{\text{ном}} = 11$ кВт, напряжение $U_{\text{ном}} = 380$ В; частота вращения ротора $n_2 = 975$ об/мин; к.п.д. = 0,855; коэффициент мощности $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,83$; кратность пускового тока $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}} = 7$; кратность пускового момента $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 2,0$; способность к перегрузке $M_{\text{пmax}} / M_{\text{ном}} = 2,2$; частота тока в сети $f_1 = 50$ Гц. Определить:

- 1) потребляемую мощность;
- 2) номинальный, пусковой и максимальный моменты;
- 3) номинальный и пусковой токи;
- 4) номинальное скольжение;
- 5) частоту тока в роторе;
- 6) суммарные потери в двигателе.

Расшифровать его условное обозначение. Можно ли осуществить пуск двигателя при номинальной нагрузке, если напряжение в сети при пуске снизилось на 20%.

Решение.

1. Мощность, потребляемая из сети

$$P_1 = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 11 / 0,855 = 12,86 \text{ кВт.}$$

2. Номинальный момент, развиваемый двигателем

$$M = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n_2 = 9,55 \cdot 11 \cdot 1000 / 975 = 107,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

3. Максимальный и пусковой моменты

$$M_{\text{пmax}} = 2,2 M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 107,7 = 237,14 \text{ Н}\cdot\text{м,}$$

$$M_n = 2M_{ном} = 2 \cdot 107,7 = 215,4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

4. Номинальный и пусковой токи:

$$I_{ном} = P_{ном} \cdot 1000 / (\sqrt{3} U_{ном} \eta_{ном} \cos \varphi_{ном}) =$$

$$= 11 \cdot 1000 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,855 \cdot 0,83) = 23,6 \text{ А};$$

$$I_n = 7,0 \cdot I_{ном} = 7,0 \cdot 23,6 = 215,4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

5. Частота тока в роторе

$$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,025 = 1,25 \text{ Гц.}$$

6. Номинальное скольжение

$$s_{ном} = n_1 - n_2 / n_1 = 1000 - 975 / 1000 = 0,025 = 2,5\%.$$

7. Условное обозначение 4A160S6Y3 расшифровывается так: двигатель четвёртой серии, асинхронный с повышенным скольжением (буква Р), высота оси вращения 160 мм, размеры корпуса по длине S (самый короткий), шестиполюсный, для умеренного климата, третья категория размещения.

8. При снижении напряжения в сети на 20% на выводах двигателя остаётся напряжение $0,8U_{ном}$. Так как момент двигателя пропорционален квадрату напряжения, то

$$M_n / M_{ном} = (0,8U_{ном})^2 / U_{ном}^2 = 0,64;$$

$$M_n = 0,64M_{ном} = 138 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

что больше $M_{ном} = 107,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Таким образом, пуск двигателя возможен.

Задача 4.2. Каждая фаза обмотки статора трёхфазного асинхронного двигателя с фазным ротором имеет число витков $W_1 = 150$ и обмоточный коэффициент $k_{01} = 0,97$. Амплитуда вращающего магнитного потока $\Phi_m = 0,006 \text{ Вб}$. Частота тока в сети $f_1 = 50 \text{ Гц}$. Активное сопротивление фазы ротора $R_2 = 0,4 \text{ Ом}$, индуктивное сопротивление фазы неподвижного ротора $x_2 = 4,2 \text{ Ом}$. При вращении ротора с частотой $n_2 = 980 \text{ об/мин}$ в фазе ротора наводится э.д.с. $E_{2s} = 10 \text{ В}$. Определить:

- 1) э.д.с. E_1 в фазе обмотки статора;
- 2) э.д.с. в фазе обмотки подвижного ротора;
- 2) ток в фазе ротора при нормальной работе I_2 и при пуске I_{2n}

Решение.

1. Э.д.с. в фазе статора

$$E_1 = 4,44 \cdot k_{01} \cdot W_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 0,97 \cdot 150 \cdot 50 \cdot 0,06 = 194 \text{ В.}$$

2. При $n_2 = 980$ об/мин частота вращения поля p_1 может быть только об/мин и скольжение ротора

$$S = n_1 - n_2/n_1 = 1000 - 980 / 1000 = 0,02.$$

3. Э.д.с. в фазе неподвижного ротора определяем из формулы $E_{2s} = E_2 S$, откуда

$$E_2 = E_{2s} / S = 10 / 0,02 = 500 \text{ В.}$$

4. Ток в фазе ротора при пуске

$$I_{2n} = E_2 / \sqrt{(R_2^2 + x_2^2)} = 500 / \sqrt{(0,4^2 + 4,2^2)} = 119 \text{ А.}$$

5. Индуктивное сопротивление фазного ротора при скольжении

$$S = 0,02; X_{2s} = X_2 S = 4,2 \cdot 0,02 = 0,084 \text{ Ом.}$$

6. Ток в фазе вращающегося ротора

$$I_2 = E_{2s} / \sqrt{(R_2^2 + x_{2s}^2)} = 10 / \sqrt{(0,4^2 + 0,084^2)} = 24,4 \text{ А.}$$

Задача 4.3. Номинальная мощность трёхфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором $P_{\text{ном}} = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 380$ В, номинальная частота вращения ротора $n_{\text{ном}} = 1420$ об/мин, номинальный к. п. д. $\eta = 0,84$ и номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,85$. Кратность пускового тока $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 6,5$, а перегрузочная способность двигателя $\lambda = 1,8$. Определить:

- 1) потребляемую мощность;
- 2) номинальный и максимальный (критический) вращающие моменты;
- 3) пусковой ток;
- 4) номинальное и критическое скольжение.

Решение.

Потребляемая мощность

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 10 / 0,84 = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты:

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9550 \cdot 10 / 1420 = 67,3 \text{ Нм;}$$

$$M_{\text{max}} = \lambda M_{\text{ном}} = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н·м.}$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{I ном}} / (\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}) = 11,9 \cdot 1000 / (1,73 \cdot 380 \cdot 0,84) = 21,2 \text{ A};$$

$$I_{\text{пуск}} = 6,5 I_{\text{ном}} = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ A}.$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$S_{\text{ном}} = (n_0 - n_{\text{ном}}) / n_0 = (1500 - 1420) / 1500 = 0,053;$$

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} (\lambda + \sqrt{(\lambda^2 - 1)}) = 0,053 (1,8 + \sqrt{(1,8^2 - 1)}) = 0,175.$$

Задача 4.4. Трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, сопротивление фаз обмоток которого $R_1 = 0,48 \text{ Ом}$, $R_2 = 0,02 \text{ Ом}$, $X_1 = 2,24 \text{ Ом}$, $X_2 = 0,08 \text{ Ом}$, соединён треугольником и работает при напряжении $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ с частотой $f = 50 \text{ Гц}$. Число витков на фазу обмоток $W_1 = 187$, $W_2 = 36$, число пар полюсов $p = 3$. Определить:

- 1) пусковые токи статора и ротора, пусковой вращающий момент, коэффициент мощности при пуске двигателя с замкнутым накоротко ротором;
- 2) токи ротора и статора, вращающий момент при работе двигателя со скольжением $S = 0,03$;
- 3) критическое скольжение и критический (максимальный) момент;
- 4) величину сопротивления фазы пускового реостата для получения пускового момента, равного максимальному а также пусковые токи статора и ротора при этом сопротивлении.

Решение.

Для приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора определяем коэффициент трансформации

$$n_1 = W_1 / W_2 = 187 / 36 = 5,2.$$

Приведенные значения сопротивлений роторной обмотки:

$$R_2 = R_n n^2 = 0,02 \cdot 5,2^2 = 0,54 \text{ Ом}; \quad X_2 = x_2 n^2 = 0,08 \cdot 5,2^2 = 2,16 \text{ Ом}.$$

Сопротивление короткого замыкания:

$$R_k = R_1 + R_2 = 0,48 + 0,54 = 1,0 \text{ Ом};$$

$$X_k = X_1 + X_2' = 2,24 + 2,16 = 4,4 \text{ Ом};$$

$$Z_k = \sqrt{(R_k^2 + X_k^2)} = \sqrt{(1,0 + 4,4^2)} = 4,51 \text{ Ом}.$$

Пусковые токи, пусковой момент и $\cos \varphi_{\text{пуск}}$ при пуске двигателя с замкнутым накоротко ротором:

$$I_{1\text{пуск}} = U_{\phi} / Z_k = 220 / 4,51 = 48,8 \text{ А};$$

$$I_{2\text{пуск}} = n \cdot I_{1\text{пуск}} = 5,2 \cdot 48,8 = 254 \text{ А};$$

$$M_{\text{пуск}} = 3 \cdot R_2 \cdot I_{2\text{пуск}}^2 / \Omega_0 = 3 \cdot 0,02 \cdot 254^2 = 37 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$\text{где } \Omega_0 = 2\pi n_0 / 60; n_0 = 60 f_1 / p.$$

Определяем коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\text{пуск}} = R_k / Z_k = 1,0 / 4,51 = 0,222.$$

Токи и вращающий момент при работе двигателя со

$$\text{скольжением } S = 0,03: Z = \sqrt{((R_1 + R_2/S)^2 + (X_1 + X_2')^2)} = \\ = \sqrt{((0,46 + 0,54/0,03)^2 + 4,4^2)} = 18,9 \text{ Ом};$$

$$I_1 = U_{\phi} / Z = 220 / 18,9 = 11,6 \text{ А};$$

$$I_2 = n I_1 = 5,2 \cdot 11,6 = 60,3 \text{ А};$$

$$M = 3 \cdot (R_2/S) \cdot I_2^2 / \Omega_0 = 3 \cdot 0,02 / 0,03 \cdot 60,3^2 / 104,5 = \\ 70 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критическое скольжение и критический (максимальный) момент:

$$S_{\text{кр}} = R_2' / \sqrt{(R_1^2 + X_k^2)} = 0,54 / \sqrt{(0,46^2 + 4,4^2)} = \\ 0,122;$$

$$M_{\text{max}} = 3 U_{\phi}^2 / 2 \Omega_0 [R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_k^2)}] = \\ = 3 \cdot 220^2 / 2 \cdot 104,5 [0,46 + \sqrt{(0,46^2 + 4,4^2)}] = 141 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Определяем сопротивление пускового реостата. Известно, что пусковой вращающий момент достигает максимального значения при условии, что

$$S_{\text{кр}} = (R_2 + R_p) / X_k = 1,0,$$

где R_p – приведенное значение пускового реостата.

$$R_p = X_k' - R_2' = 4,4 - 0,54 = 3,86;$$

$$R_p = R_p / n^2 = 3,86 / 5,2^2 = 0,143 \text{ Ом}.$$

Пусковые токи при пуске двигателя с реостатом

$$Z_{\text{пуск}} = \sqrt{(R_k + R_p) + X_k^2} = \sqrt{((1 + 3,86)^2 + 4,4^2)} = 6,55 \text{ Ом};$$

$$I_{1\text{пуск}} = U_{\phi} / Z_{\text{пуск}} = 220 / 6,55 = 33,6 \text{ А};$$

$$I_{2\text{пуск}} = n I_{1\text{пуск}} = 5,2 \cdot 33,6 = 174,7 \text{ А}.$$

4.2. Синхронные электрические машины

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращающегося магнитного поля статора и определяется следующим образом $n = 60f/p$, где f – частота напряжения сети.

Действующее значение э.д.с., индуцируемой в одной фазе статора при холостом ходе

$$E_x = 4,44 f W_1 K_{w1} \Phi_m,$$

где Φ_m – амплитудное значение магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения ротора Вб, W_1 – число витков одной фазы статора, включённых последовательно, K_{w1} – обмоточный коэффициент статора.

Мощность, отдаваемая трёхфазным генератором при симметричной нагрузке, определяется из выражения

$$P_2 = P_{эм} - P_3 = P_{эм} - 3R_1 I^2,$$

где $P_{эм}$ – электромагнитная мощность, Вт; P_3 – мощность электрических потерь в обмотке статора, Вт; R_1 – активное сопротивление обмотки фазы статора, Ом.

Вращающий момент (Нм) генератора имеет вид $M = P_{эм} / \omega$, где ω – угловая частота вращения генератора (рад / с).

К.п.д. трёхфазного генератора

$$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100\% = P_2 / (P_1 + \Sigma P) \cdot 100\%,$$

где P_1 – мощность, подводимая к генератору от двигателя, Вт; P_2 – полезная мощность, отдаваемая генератором; Вт; ΣP – суммарная мощность потерь, Вт.

К.п.д. синхронного двигателя

$$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100\% = (P_1 - \Sigma P) / P_1 \cdot 100\%,$$

где P_1 – мощность, потребляемая двигателем от сети; P_2 – полезная мощность на валу двигателя; ΣP – суммарная мощность потерь в двигателе.

Синхронные электрические машины имеют следующие характеристики:

- внешнюю $U = f(I)$ при $I_b = \text{const}$ и $n = \text{const}$;
- регулирующую $I_b = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $U = \text{const}$.

Задача 4.5. Определить номинальный момент $M_{\text{ном}}$, линейный ток I статора, номинальный к.п.д., активную мощность P , реактивную мощность Q , потребляемые из сети шестиполосным синхронным двигателем. Если номинальные данные двигателя номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 990$ кВт, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos \varphi = 0,8$ (опережение), отношение $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,2$, синхронное сопротивление $X = 42$ Ом, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1000$ об/мин.

Решение.

Номинальная угловая скорость ротора трёхфазного синхронного двигателя (ТСД)

$$\Omega_{\text{ном}} = 2 \cdot \pi n_{\text{ном}} / 60 = \omega / p = 314 / 3 = 105 \text{ рад/с}$$

Номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \Omega_{\text{ном}} = (990 \cdot 10^3) / 105 = 9,43 \cdot 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Номинальный линейный ток статора, обмотка которого обычно включается по схеме “звезда”

$$I = P_{\text{ном}} / (\eta_{\text{ном}} \sqrt{3} \cos \varphi_{\text{ном}}) = 990 \cdot 10^3 / (\eta_{\text{ном}} \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,8)$$

Для определения $\eta_{\text{ном}}$ необходимо определить ток I .

Уравнение угловой характеристики имеет вид:

$$M = 3U_{\text{фном}} E_0 / (\Omega_{\text{ном}} X \sin \theta) = M_{\text{max}} \sin \theta$$

Находим $M_{\text{max}} = 2,2 M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 9,43 \cdot 10^3 = 20,75 \cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

При номинальной нагрузке:

$$\sin \theta_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} / M_{\text{max}} = 0,45;$$

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ном}} &= 27^\circ E_0 = M_{\text{max}} \cdot \Omega_{\text{ном}} \cdot X / (3 \cdot U_{\text{фном}}) = \\ &= 20,75 \cdot 10^3 \cdot 105 \cdot 42 / (3 \cdot 6 \cdot 10^3 / \sqrt{3}) = 8,8 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

Определяем:

$$E_0 \sin \theta = 8,8 \cdot 0,45 = 4 \text{ кВ}; \quad E_0 \cos \theta = 7,83 \text{ кВ};$$

$$E_0 \cos \theta - U_{\text{фном}} = 7,83 - 3,46 = 4,38 \text{ кВ};$$

$$XI = \sqrt{(E_0 \sin \theta)^2 + (E_0 \cos \theta - U_{\text{фном}})^2} = 5,94 \text{ кВ}.$$

Зная значения $X = 42$ Ом, получаем

$$I = 5940 / 42 = 141,4 \text{ А}.$$

Определяем

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ном}} &= P_{\text{ном}} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} I \cos \varphi_{\text{ном}} = \\ &= 990 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \times 141,4 \cdot 0,8 = 0,842. \end{aligned}$$

Вычисляем

$$P = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 1176 \text{ кВт}; \quad Q = P \operatorname{tg} \varphi_{\text{ном}} = 88 \text{ кВар}.$$

Задача 4.6. Найти ток, коэффициент мощности, активную и реактивную мощность турбо генератора при возбуждении $I_B = 500$ А, когда момент на валу $M = 150\,000$ Нм. Паспортные данные генератора: $P_{\text{ном}} = 100\,000$ кВт; $U_{\text{ном}} = 15,75$ кВ; $X = 3,1$ Ом; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$. В режиме холостого хода при $E_0 = U_{\text{фном}}$ ток возбуждения $I_{B0} = 294$ А, частота вращения $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин.

Решение.

Фазную э.д.с. E_0 в заданном режиме определяем из условия пропорциональной зависимости её от тока возбуждения

$$E_0 / U_{\text{фном}} = I_B / I_{B0},$$

откуда

$$E_0 = U_{\text{ном}} I_B / (\sqrt{3} I_{B0}) = 15,75 \cdot 500 / (\sqrt{3} \cdot 294) = 15,46 \text{ кВ.}$$

Угол рассогласования θ определяем из уравнения угловой характеристики

$$\sin \theta = M \cdot \Omega \cdot X / (3 \cdot U_{\text{фном}} \cdot E_0) = 150 \cdot 10^3 \cdot 314 \cdot 3,1 / (3 \cdot 9,1 \cdot 10^3 \cdot 15,46 \cdot 10^3) = 0,347; \theta = 20,3^\circ;$$

$$XI = \sqrt{((E_0 \sin \theta)^2 + (E_0 \cos \theta - U_{\text{фном}})^2)} = 7,5 \text{ кВ;}$$

$$I = XI / X = 7,5 / 3,1 = 2,42 \text{ кА.}$$

По мощности определяем активную составляющую тока и коэффициент мощности:

$$P = \Omega M = 314 \cdot 150 \cdot 10^3 = 47,2 \text{ мВт;}$$

$$I_a = P / (3 U_{\text{фном}}) = 47,2 \cdot 10^6 / (3 \cdot 9,1 \cdot 10^3) = 1,73 \text{ кА;}$$

$$\cos \varphi = I_a / I = 1,73 \cdot 10^3 / (2,42 \cdot 10^3) = 0,715.$$

Реактивная мощность

$$Q = 3 U_{\text{фном}} I \sin \varphi = 3 \cdot 9,1 \cdot 2,42 \cdot 0,7 = 46,2 \text{ МВар.}$$

Задача 4.7. Трёхфазный генератор, развивающий активную мощность $P = 35 \cdot 10^3$ кВт, подключён к шинам станции с напряжением $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ. Синхронное сопротивление машины $X = 3,2$ Ом, синхронная частота вращения ротора 3000 об/мин. Изменением поля возбуждения коэффициент мощности установлен сначала равным единице, а затем = 0,7 при индуктивном характере тока статора. Построить угловые характери-

стики и отметить на них точки, соответствующие заданным режимам. Построить векторные диаграммы генераторов. Определить реактивную мощность, отдаваемую машиной в сеть.

Решение.

Первый режим. При $\cos \varphi = 1$, векторы $U_{\text{фном}}$ и jXI будут взаимно перпендикулярными, поэтому:

$$I = P / (\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi) = 35 / (\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 1) = 1,92 \text{ кА};$$

$$E_0 = \sqrt{(U_{\text{фном}})^2 + (XI)^2} = \sqrt{(6,06)^2 + (3,2 \cdot 1,92)^2} = 8,63 \text{ кВ};$$

$$\sin \theta = XI / E_0 = 3,2 \cdot 1,92 / 8,63 = 0,711, \theta = 45^\circ.$$

Векторная диаграмма имеет вид рис.4.1.

Максимальный электромагнитный момент

$$M_{\text{max}} = 3 E_0 U_{\text{фном}}$$

$$/(X\Omega) = 3 \cdot 8,63 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^3 / (3,2 \cdot 314) = 156 \cdot 10^3 \text{ Нм}.$$

По известной амплитуде строим угловую характеристику $M(\theta) = M_{\text{max}} \sin \theta$ (кривая 1) и отмечаем т. А для которой $\theta = 45^\circ$.

Реактивная мощность при заданном $\cos \varphi = 1$, равна $Q=0$.

Второй режим. При $\cos \varphi = 0,7$ угол $\varphi = 45^\circ$ и ток

$$I = 35 / (\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,7) = 2,74 \text{ кА}.$$

Построение векторной диаграммы начинаем с векторов напряжения $U_{\text{фном}}$ и тока I . Затем к вектору $U_{\text{фном}}$ пристраиваем вектор падения напряжения jXI и находим значение э.д.с. $E_0 = 13,8 \text{ кВ}$.

Угловую характеристику 2 строим по максимальному значению момента

$$M_{\text{max}} = 3 E_0 U_{\text{фном}} / (X\Omega) = 3 \cdot 13,8 \cdot 10^3 \cdot 6,06 \cdot 10^3 / (3,2 \cdot 314) = 250 \cdot 10^3 \text{ Нм}.$$

Для определения рабочей точки (точка В) и угла θ воспользуемся соотношением

$$\sin \theta = M / M_{\text{max}} = P / \Omega M_{\text{max}} = 35 \cdot 10^6 / 136 \cdot 250 \cdot 10^3 = 0,445;$$

$$\theta = 26,5^\circ.$$

Реактивная мощность

$$Q = 3 U_{\text{фном}} I \sin \varphi = 3 \cdot 6,06 \cdot 2,74 \cdot 0,71 = 35,6 \text{ мВар}.$$

5. Электрические машины постоянного тока

Напряжение на выводах U , э.д.с. E , падение напряжения в обмотке якоря $I_a R_a$:

для генератора $E = U + I_a R_a$.

для двигателя $U = E + I_a R_a$.

1. Электромагнитный или полный момент развиваемый двигателем

$$M_{эм} = P / (2 \cdot \pi \cdot a) \cdot N \Phi I_a \text{ (Вб)} \text{ или } E = p n / 60 a \cdot N \Phi,$$

откуда $\Phi = 60 a / p \cdot n \cdot E$,

тогда $M_{эм} = 60 E I_a / 2 \cdot \pi \cdot n = E I_a / (\pi \cdot n / 30) = E I_a / w = P_{эм} / w$.

Здесь $P_{эм} = E I_a$ - электромагнитная мощность, Вт, w - угловая скорость вращения, рад/с.

2. Полезный номинальный момент (по валу):

$$M_{ном} = P_{ном} / w_{ном} = P_{ном} / (2 \cdot \pi \cdot n_{ном} / 60) = 60 P_{ном} / 2 \cdot \pi \cdot n_{ном} = \\ = (9,55 P_{ном} / n_{ном}) \text{ Нм}.$$

Задача 5.1. Генератор с независимым возбуждением (рис.5.1) работает в номинальном режиме при напряжении на выводах $U_{ном} = 220$ В. Сопротивление обмотки якоря $R_a = 0,2$ Ом, сопротивление нагрузки $R_n = 2,2$ Ом, сопротивление обмотки возбуждения $R_b = 550$ Ом. Напряжение для питания обмотки возбуждения

$U_b = 110$ В. Номинальная частота вращения якоря $n_{ном} = 1200$ об/мин. Определить:

1) э.д.с. генератора;

2) силу тока, отдаваемую потребителю;

3) силу тока в обмотке возбуждения;

4) полезную мощность, отдаваемую генератором;

5) электромагнитный момент, преодолеваемый приводным двигателем.

Решение.

Ток, отдаваемый в нагрузку

$$I_n = U_{ном} / R_n = 220 / 2,2 = 100 \text{ А.}$$

Ток в обмотке возбуждения

$$I_b = U_b / R_b = 110 / 55 = 2 \text{ А.}$$

Ток в обмотке якоря

$$I_{\text{я}} = I_{\text{н}} + I_{\text{в}} = 100 + 2 = 102 \text{ А.}$$

Э.д.с. генератора

$$E = U_{\text{ном}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 220 + 102 \cdot 0,2 = 240,4 \text{ В.}$$

Полезная мощность, отдаваемая генератором

$$P_2 = U_{\text{фном}} I_{\text{н}} = 220 \cdot 100 = 22 \text{ кВт.}$$

Электромагнитная мощность и электромагнитный момент $P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}} = 240,4 \cdot 102 = 24600 \text{ Вт} = 24,6 \text{ кВт};$

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \omega_{\text{ном}} = P_{\text{эм}} / (2 \cdot \pi \cdot n_{\text{ном}} / 60) = \\ = 24600 / (3,14 \cdot 1200 / 60) = 392 \text{ Нм.}$$

Задача 5.2. Генератор независимого возбуждения имеет следующие номинальные данные номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 200 \text{ кВт}$, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 2850 \text{ об/мин}$. Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии $R_{\text{я}} = 0,02 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 180 \text{ Ом}$. Определить момент, который развивает приводной двигатель для обеспечения номинальной работы генератора, и кпд генератора (потери в щелочном контакте, механическими и магнитными потерями пренебречь).

Решение.

Записывая уравнения электрического состояния для якорной цепи

$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

и умножая его правую и левую части на значение тока $I_{\text{я}}$, получаем уравнение энергетического баланса цепи якоря генератора

$$UI_{\text{я}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 \text{ или } P_{\text{эл}} = P_{\text{эм}} - \Delta P_{\text{эл}},$$

где $P_{\text{эл}}$ — выходная мощность генератора, которая для номинальной нагрузки указывается в паспортных данных машины в виде $P_{\text{ном}}$;

$P_{\text{эм}}$ — электромагнитная мощность, которая равна механической мощности $P_{\text{мех}}$ приводного двигателя D и определяется моментом M на валу двигателя и частотой вращения n вала, соединяющего двигатель и генератор;

$\Delta P_{\text{эл}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$ – электрические потери в якоре генератора.

Таким образом, для определения момента $M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм}} / n_{\text{ном}}$, необходимо найти мощность

$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я, ном}}$, т.е. номинальный ток обмотки

$$I_{\text{я, ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 200\,000 / 230 = 870 \text{ А}$$

и э.д.с.

$$E_{\text{я}} = U_{\text{ном}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 230 + 0,02 \cdot 870 = 247,4 \text{ В.}$$

Тогда

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot E_{\text{я}} I_{\text{я, ном}} / n_{\text{ном}} = \\ = 9,55 \cdot 247,4 \cdot 870 / 2850 = 721 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

К.п.д.

$$\eta = P_2 / P_1 = P_{\text{ном}} / P_{\text{эм}} = 200 / 215,24 = 0,93,$$

Задача 5.3. Генератор с параллельным возбуждением (рис.5. 2) рассчитан на напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ и имеет сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,08 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 55 \text{ Ом}$. Генератор нагружен на сопротивление $R_{\text{н}} = 1,1 \text{ Ом}$. К.п.д. генератора $\eta_{\text{ген}} = 0,85$. Определить:

- 1) токи в обмотке возбуждения $I_{\text{в}}$, в обмотке якоря $I_{\text{я}}$ и в нагрузке $I_{\text{н}}$;
- 2) э.д.с. генератора E ;
- 3) полезную мощность P_2 ;
- 4) мощность двигателя для вращения генератора P_1 ;
- 5) электрические потери в обмотках якоря $P_{\text{я}}$ и возбуждения $P_{\text{в}}$;
- 6) суммарные потери в генераторе;
- 7) электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$.

Решение.

Токи в обмотке возбуждения, нагрузке и якоре

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 220 / 55 = 4 \text{ А};$$

$$I_{\text{н}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{н}} = 220 / 1,1 = 200 \text{ А};$$

$$I_{\text{я}} = I_{\text{в}} + I_{\text{н}} = 4 + 200 = 204 \text{ А.}$$

Э.д.с. генератора

$$E = U_{\text{ном}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 200 + 204 \cdot 0,08 = 236,3 \text{ В.}$$

Полезная мощность

$$P_2 = U_{\text{ном}} I_{\text{н}} = 220 \cdot 200 = 44\,000 \text{ Вт} = 44 \text{ кВт.}$$

Мощность приводного двигателя для вращения генератора $P_1 = P_2 / \eta_{\text{г}} = 44 / 0,85 = 52 \text{ кВт.}$

Электрические потери в обмотке якоря и возбуждения:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = 204 \cdot 0,08 = 3,32 \text{ кВт;}$$

$$P_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 4^2 \cdot 55 = 0,88 \text{ кВт.}$$

Суммарные потери мощности в генераторе

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = 52 - 44 = 8 \text{ кВт.}$$

Электромагнитная мощность, развиваемая генератором $P_{\text{эм}} = E I_{\text{я}} = 236,3 \cdot 204 = 48,3 \text{ кВт}$

Задача 5.4. Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением (рис 5..3) рассчитан на номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 10 \text{ кВт}$ и номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$. Частота вращения якоря $n = 3000 \text{ об/мин}$. Двигатель потребляет из сети ток $I = 63 \text{ А}$. Сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 85 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,3 \text{ Ом}$. Определить:

- 1) потребляемую мощность из сети P_1 ;
- 2) кпд двигателя;
- 3) полезный вращающий момент M ;
- 4) ток якоря $I_{\text{я}}$;
- 5) противо-э.д.с. в обмотке якоря $E_{\text{я}}$;
- 6) суммарные потери в двигателе;
- 7) потери в обмотках якоря $P_{\text{я}}$ и возбуждения $P_{\text{в}}$.

Решение.

Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_1 = U_{\text{ном}} I = 220 \cdot 63 = 13900 \text{ Вт} = 13,9 \text{ кВт.}$$

К.п.д. двигателя

$$\eta_{\text{дв}} = P_{\text{ном}} / P_1 = 10 / 13,9 = 0,72.$$

Полезный вращающий момент (на валу)

$$M = 9,55 \cdot P_{\text{ном}} / n = 9,55 \cdot 10 \cdot 1000 / 3000 = 31,9 \text{ Н·м.}$$

Для определения тока якоря предварительно находим ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 220 / 85 = 2,6 \text{ А.}$$

Ток якоря

$$I_{\text{я}} = I - I_{\text{в}} = 6,3 - 2,6 = 60,4 \text{ А.}$$

Противо – э.д.с. обмотки якоря

$$E = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 220 - 60,4 \cdot 0,3 = 202 \text{ А.}$$

Суммарные потери в двигателе

$$\Sigma P = P_1 - P^2 = 13,9 - 10 = 3,9 \text{ кВт.}$$

Потери в обмотках якоря и возбуждения:

$$P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} = 60,4^2 \cdot 0,3 = 1190 \text{ Вт;}$$

$$P_{\text{в}} = U_{\text{ном}} I_{\text{в}} = 220 \cdot 2,6 = 572 \text{ Вт.}$$

Задача 5.5. Четырех полюсный двигатель с параллельным возбуждением (рис. 5.3) присоединён к сети с $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$ и потребляет ток $I = 157 \text{ А}$. На якоре находится обмотка с сопротивлением $R_{\text{я}} = 0,0427 \text{ Ом}$ и числом проводников $N = 360$, образующих четыре параллельных ветви ($a = 2$). Сопротивление обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 21,8 \text{ Ом}$. Магнитный поток полюса $\Phi = 0,008 \text{ Вб}$. Определить:

- 1) токи в обмотках возбуждения $I_{\text{в}}$ и якоря $I_{\text{я}}$;
- 2) противо – э.д.с. E_i ;
- 3) электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$;
- 4) электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$;
- 5) частоту вращения якоря n ;
- 6) потери мощности в обмотках якоря $P_{\text{я}}$ и возбуждения $P_{\text{в}}$.

Решение.

Ток в обмотках возбуждения и якоря:

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 110 / 21,8 = 5,05 \text{ А;}$$

$$I_{\text{я}} = I - I_{\text{в}} = 157 - 5,05 = 151,95 \text{ А.}$$

Противо – э.д.с. в обмотке якоря

$$E = U_{\text{ном}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 110 - 151,95 \cdot 0,0427 = 103,5 \text{ В.}$$

Электромагнитный момент

$$M_{\text{эм}} = P / (2 \cdot \pi \cdot a) \cdot \Phi \cdot N \cdot I_{\text{я}} = \\ = 2 / (2 \cdot 3,14 \cdot 2) \cdot 0,008 \cdot 360 \cdot 151,95 = 69,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E I_{\text{я}} = 103,5 \cdot 151,95 = 15,727 \text{ кВт,}$$

Зная $P_{\text{эм}}$, можно найти электромагнитный момент по формуле

$$M_{эм} = P_{эм}/\omega = P_{эм} / (2 \cdot \pi \cdot n/60) = 69,7 \text{ Нм},$$

что и было получено выше.

Здесь частота вращения якоря

$$n = 60 \cdot a \cdot E / p \cdot N \cdot \Phi = 60 \cdot 2 \cdot 103,5 / 2 \cdot 360 \cdot 0,008 = \\ = 2156 \text{ об/мин.}$$

Потери мощности в обмотках якоря и возбуждения:

$$P_{я} = I_{я}^2 R_{я} = 151,95^2 \cdot 0,00427 = 986 \text{ Вт};$$

$$P_{в} = U_{ном} I_{в} = 110 \cdot 5,5 = 555,5 \text{ Вт.}$$

Задача 5.6. Электродвигатель постоянного тока с последовательным (рис. 5.4) возбуждением присоединён к цепи с напряжением $U_{ном} = 110 \text{ В}$ и вращающимся с частотой $n = 1500 \text{ об/мин}$, двигатель развивает полезный момент (на валу) $M = 120 \text{ Нм}$, кпд двигателя – 0,84. Суммарное сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_a + R_{пс} = 0,02 \text{ Ом}$. Определить:

- 1) полезную мощность P_2 ;
- 2) потребляемую мощность P_1 ;
- 3) потребляемый ток из сети I ;
- 4) сопротивление пускового реостата, при котором пусковой ток ограничивается до $2,5 I$;
- 5) противо – э.д.с. в обмотке якоря.

Решение.

Полезную мощность двигателя определяем из формулы полезного момента

$$P_2 = M \cdot n / 9,55 = 120 \cdot 1500 / 9,55 = 18,85 \text{ кВт.}$$

Потребляемую мощность из сети

$$P_1 = P_2 / \eta_{дв} = 18,85 / 0,84 = 22,44 \text{ кВт.}$$

Ток, потребляемый из сети

$$I = P_1 / U_{ном} = 22,44 \cdot 1000 / 110 = 204 \text{ А.}$$

Необходимое сопротивление пускового реостата

$$R_p = U_{ном} / (2,5 I) - (R_a + R_{пс}) = 110 / (2,5 \cdot 204) - 0,02 = \\ = 0,196 \text{ Ом.}$$

Противо-э.д.с. в обмотке якоря

$$E = U_{ном} - I(R_a + R_{пс}) = 110 - 204 \cdot 0,02 = 105,9 \text{ В.}$$

Задача 5.7. Дан генератор параллельного возбуждения с номинальными данными:

$P_{\text{ном}} = 5,2 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$ и частотой вращения

$n = 2860 \text{ об/мин}$. Сопротивление обмотки якоря

$R_{\text{я}} = 0,75 \text{ Ом}$, сопротивление цепи возбуждения

$R_{\text{в}} = 1540 \text{ Ом}$, механические и магнитные потери составляют 4% от номинальной мощности генератора.

Определить момент на валу первичного двигателя.

Решение.

Номинальный ток нагрузки

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 5,2 \cdot 100 / 230 = 22,6 \text{ А.}$$

Ток возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 230 / 154 = 1,5 \text{ А.}$$

Ток якоря при номинальной нагрузке

$$I_{\text{яном}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 22,6 + 1,5 = 24,1 \text{ А.}$$

Э.д.с. генератора

$$E = U_{\text{ном}} + R_{\text{я}} I_{\text{яном}} = 230 + 0,75 \cdot 24,1 = 248 \text{ В.}$$

Потери в обмотке якоря и в цепи возбуждения:

$$\Delta P_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{яном}}^2 = 0,75 \cdot 24,1^2 = 435 \text{ Вт;}$$

$$\Delta P_{\text{в}} = R_{\text{в}} I_{\text{в}}^2 = 154 \cdot 1,5^2 = 346 \text{ Вт.}$$

Сумма механических и магнитных потерь

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м}} = 4/100 \cdot 5,2 \cdot 10^3 = 208 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери при номинальной нагрузке

$$\Sigma \Delta P = 435 + 345 + 208 = 989 \text{ Вт} = 0,989 \text{ кВт.}$$

Мощность на валу первичного двигателя

$$P_{\text{мех ном}} = \Sigma \Delta P + P_{\text{ном}} = 0,989 + 5,2 = 6,2 \text{ кВт.}$$

К.п.д. генератора при номинальной нагрузке

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (P_{\text{мех ном}} \cdot 100) = 5,2 / (6,189 \cdot 100) = 84 \text{ \%}.$$

Момент на валу первичного двигателя при номинальной нагрузке генератора

$$M_{\text{дв}} = 9550 P_{\text{мех ном}} / n_{\text{ном}} = 9550 \cdot 6,189 / 2860 = 20,7 \text{ Н·м.}$$

Задача 5.8. Двигатель параллельного возбуждения, присоединённый к сети с напряжением $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_{\text{ном}} = 20,5$

А, при холостом ходе - $I_0 = 2,35$ А. Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,75$ Ом, а в цепи возбуждения $R_{\text{в}} = 258$ Ом. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1025$ об/мин. Определить:

- 1) номинальную мощность двигателя (на валу);
- 2) номинальный к.п.д.;
- 3) номинальный вращающий момент;
- 4) пусковой ток при пуске двигателя без пускового реостата;
- 5) сопротивление пускового реостата для условия $I_{\text{пуск}} = 2,5 I_{\text{ном}}$ и пусковой момент при пуске двигателя с реостатом. При решении принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

Решение.

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - \Sigma P,$$

где ΣP – потери в двигателе; $P_{1\text{ном}}$ – потребляемая мощность.

$$P_{1\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 220 \cdot 20,5 = 4,51 \text{ кВт.}$$

Для определения потерь в цепи якоря и цепи возбуждения надо узнать ток в цепи якоря $I_{\text{я ном}}$ и ток возбуждения $I_{\text{в}}$:

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{в}} = 220 / 258 = 0,85 \text{ А;}$$

$$I_{\text{я ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А.}$$

Потери в обмотке якоря и цепи возбуждения

$$\Delta P_{\text{я ном}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я ном}}^2 = 0,75 \cdot 19,65^2 = 290 \text{ Вт;}$$

$$\Delta P_{\text{в}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}^2 = 258 \cdot 0,85^2 = 186 \text{ Вт.}$$

Магнитные и механические потери

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м}} = P_0 - \Delta P_{\text{я0}} - \Delta P_{\text{в}},$$

$$\text{где } P_0 = U_{\text{ном}} I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ Вт.}$$

$\Delta P_{\text{я0}}$ – потери в обмотке якоря при холостом ходе двигателя

$$\Delta P_{\text{я0}} = R_{\text{я}} (I_0 - I_{\text{в}})^2 = 0,75 (2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт;}$$

$$\Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{м}} = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт;}$$

$$\Sigma \Delta P = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт;}$$

$$P_{\text{ном}} = 4510 - 805,3 = 3710 \text{ Вт} = 3,71 \text{ кВт.}$$

Номинальный к.п.д.

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}} \cdot 100 = 3,71 / 4,5 \cdot 100 = 82,2 \%$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9550 \cdot 3,71 / 1025 = 34,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Пусковой ток двигателя при пуске реостата

$$I_{\text{пуск}} = U_{\text{ном}} / R_{\text{я}} = 220 / 0,75 = 293 \text{ А}$$

Сопротивление пускового реостата определяется из равенства

$$I_{\text{пуск}} = 2,5 I_{\text{я.ном}} = U_{\text{ном}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{р}}),$$

откуда

$$R_{\text{р}} = U_{\text{ном}} / (2,5 I_{\text{я.ном}}) - R_{\text{я}} = 220 / (2,5 \cdot 19,65) - 0,75 = 3,73 \text{ Ом}$$

Определяем пусковой момент двигателя при пуске с реостатом. Известно, что вращающий момент двигателя определяется уравнением $M_{\text{вр}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}}$. Для режима номинальной нагрузки $M_{\text{ном}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я.ном}}$, а для пускового режима $M_{\text{пуск}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{пуск}}$.

Полагая магнитный поток в двигателе постоянным, возьмём отношение моментов

$$M_{\text{ном}} / M_{\text{пуск}} = I_{\text{я.ном}} / I_{\text{пуск}}$$

откуда

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \cdot (I_{\text{пуск}} / I_{\text{я.ном}}) = 34,6 \cdot 2,5 \cdot 19,65 / 19,65 = 86,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Задача 5.9. Двигатель последовательного возбуждения работает от сети с напряжением $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$. Номинальный вращающий момент двигателя и номинальная частота вращения равны $M_{\text{ном}} = 75 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $n_{\text{ном}} = 1020 \text{ об/мин}$, сопротивление обмоток якоря и возбуждения $R_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$, $R_{\text{в}} = 0,3 \text{ Ом}$. Номинальный к.п.д.

$\eta_{\text{ном}} = 81,5\%$. Определить:

- 1) мощность на валу двигателя и мощность, потребляемую из сети при номинальной нагрузке;
- 2) ток двигателя;
- 3) противо-э.д.с. и электромагнитную мощность (мощность, передаваемую на якорь);
- 4) потери в двигателе при номинальной нагрузке и сопротивление пускового реостата, при пусковой ток превышает номинальный в два раза.

Решение.

Номинальная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}} / 9550 = 75 \cdot 1020 / 9550 = 8 \text{ кВт.}$$

Потребляемая мощность

$$P_{\text{ном1}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 8 / 0,815 = 9,8 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном1}} / U_{\text{ном}} = 9,8 \cdot 1000 / 220 = 44,5 \text{ А.}$$

Полученный ток является током якоря и возбуждения

$$I_{\text{я.ном}} = I_{\text{в}} = 44,5 \text{ А.}$$

Противо-э.д.с., наводимая в обмотке якоря

$$E = U_{\text{ном}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) I_{\text{ном}} = 220 - (0,4 + 0,3) \cdot 44,5 = 188,8 \text{ В.}$$

Электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E I_{\text{я.ном}} = 188,8 \cdot 44,5 = 8400 \text{ Вт} = 8,4 \text{ кВт.}$$

Магнитные и механические потери

$$\Delta P_{\text{м}} \neq \Delta P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{ном}} = 8,4 - 8,0 = 0,4 \text{ кВт.}$$

Потери в обмотке якоря и в обмотке возбуждения:

$$\Delta P_{\text{я.ном}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я.ном}}^2 = 0,4 \cdot 44,5^2 = 792 \text{ Вт.}$$

$$\Delta P_{\text{в}} = R_{\text{в}} \cdot I_{\text{в}}^2 = 0,3 \cdot 44,5^2 = 595 \text{ Вт.}$$

Суммарные потери в двигателе

$$\Sigma \Delta P_{\text{ном}} = 400 + 792 + 595 = 1,787 \text{ кВт.}$$

Проверим полученный результат

$$\Sigma \Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном1}} - P_{\text{ном}} = 9,8 - 8,0 = 1,8 \text{ кВт.}$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{р}} = U_{\text{ном}} / (2 \cdot I_{\text{я.ном}}) - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}}) = \\ = 220 / (2 \cdot 44,5) - 0,7 = 1,77 \text{ Ом.}$$

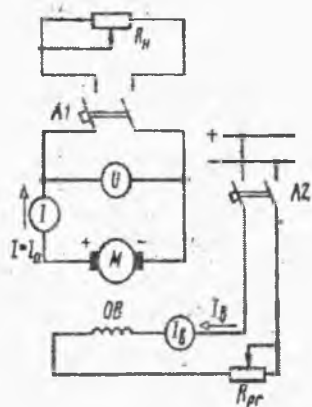


Рис. 5.1

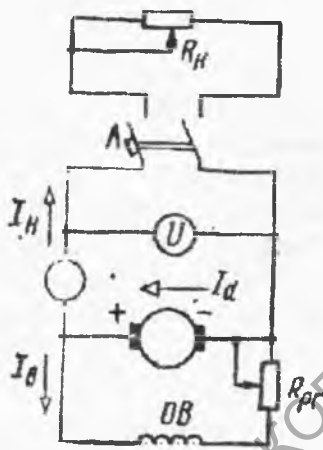


Рис. 5. 2

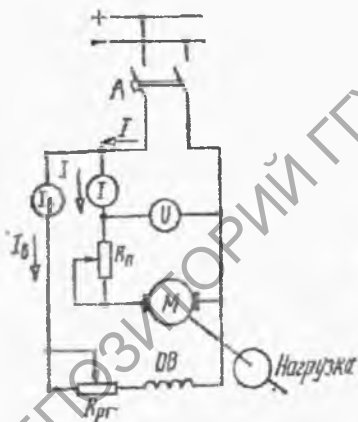


Рис.5.3

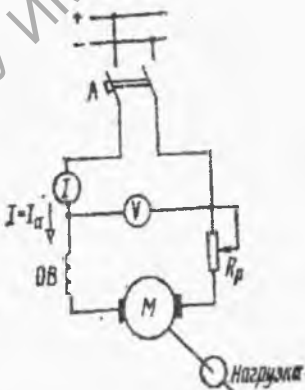


Рис. 5.4

Литература

1. Бокалов В.П. и др. Основы теории электрических цепей и электроники. М. Радио и связь, 1989г.
2. Электротехника под ред. В.Г. Герасимова. М. Высшая школа, 1985г.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. М. "Энергоатомиздат", 1983г.
4. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электроники. Часть 1, М. Радио.
5. А.И.Иванов - Цыганов Электротехнические устройства радиосистем. М. "Высшая школа", 1979г.
6. Сборник задач по электротехнике и основам электроники. Под ред. В.Г. Герасимова. М. Высшая школа, 1987г.
7. О.Н.Веселовский, Л.М.Браславский. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры. М., "Высшая школа", 1977г.
8. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М. Высшая школа.
9. Сборник задач по общей электротехнике под ред. В.С.Пантюшина. Изд-во "Высшая школа", 1973г.
10. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. Под ред. Л.А.Бессонова, М., "Высшая школа", 1980г.

Содержание

1. Нелинейные электрические цепи.....	3
1.1. Нелинейные цепи постоянного тока.....	3
1.2. Нелинейные цепи переменного тока.....	6
1.3. Выпрямители.....	6
2. Магнитные цепи постоянного потока.....	12
2.1. Применение закона полного тока для анализа магнитных цепей. Влияние ферромагнитных материалов.....	12
2.2. Магнитные цепи с зазором в магнитопроводе.....	14
2.3. Электромагнитные устройства.....	18
3. Электромагнитные устройства переменного магнитного потока.....	22
3.1. Трансформаторы.....	26
4. Электрические машины переменного тока.....	40
4.1. Асинхронные электрические машины.....	40
4.2. Синхронные электрически машины.....	47
5. Электрические машины постоянного тока.....	50
Литература.....	62

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Практическое пособие для студентов физического факультета Гомельского государственного университета им. Ф.Скорины специальностей «Физика», «Физика с дополнительной специализацией «Техническое творчество», «Физическая электроника», АСОИ (часть 3).

Авторы – составители :

Богданович Валентина Иосифовна , старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины;

Мышковец Виктор Николаевич, к. ф.-м. н., старший преподаватель кафедры радиофизики и электроники Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины.

Рецензенты:

Ефимчик Михаил Константинович, к. ф.-м. н , доцент кафедры АСОИ Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины;

Яковцев Игорь Николаевич, старший преподаватель кафедры общей физики Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины

Подписано к печати 26. 04. 2000 г. Формат 60x 84 1/16. Бумага писчая № 1. Печать офсетная. Усл. п. л.4,0. Уч. - изд. л. 2,7. Тираж 50 экз. Заказ 149. Отпечатано на ротапринтере Гомельского государственного университета им. Ф.Скорины. 246099, г. Гомель, ул. Советская, 104

ВУ

