

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УЛЬЯНОВСКОЕ ВЫСШЕЕ АВИАЦИОННОЕ УЧИЛИЩЕ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (ИНСТИТУТ)**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Методические указания
по выполнению контрольной работы*

Ульяновск 2015

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Выполнение контрольных работ является одним из основных видов самостоятельных занятий студентов. Контрольная работа содержит решение нескольких заданий, которые охватывают значительную часть изучаемой дисциплины. Каждый обучающийся должен выполнить один из вариантов работы в сроки, предусмотренные учебным графиком.

Рецензирование контрольных работ производит преподаватель. В случае, если контрольная работа не зачтена, все исправления, которые выполняются обучающимся, проводятся в той же контрольной работе после подписи рецензента без исправления первоначального текста и вновь представляются на проверку.

В каждом задании приведена таблица с вариантами. Номер варианта определяется предпоследними и последними цифрами шифра обучающегося.

К представленным на проверку контрольным работам предъявляются следующие требования:

1. Все основные пункты на проверку решения задачи должны быть подробно объяснены.

2. Работы выполняются от руки чернилами в тетради или набираются с применением ЭВМ на листах белой бумаги формата А4.

3. В работе оставляются поля не менее 4 см для замечаний рецензента.

4. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены аккуратно и в удобном для чтения масштабе.

5. Вычисления должны производиться с точностью до второго десятичного знака.

6. Расчет каждой исходной величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения.

7. При построении графиков оси координат следует обозначать символами, общепринятыми для соответствующих величин, на осях наносятся масштабы выбранных единиц.

Контрольная работа засчитывается, если решения всех заданий не содержат ошибок принципиального характера, и отвечает всем вышеперечисленным требованиям.

ЗАДАНИЕ 1

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По данным таблицы 1.1 определить токи в ветвях электрической цепи постоянного тока (рис. 1.1.) методом непосредственного применения первого и второго законов Кирхгофа.

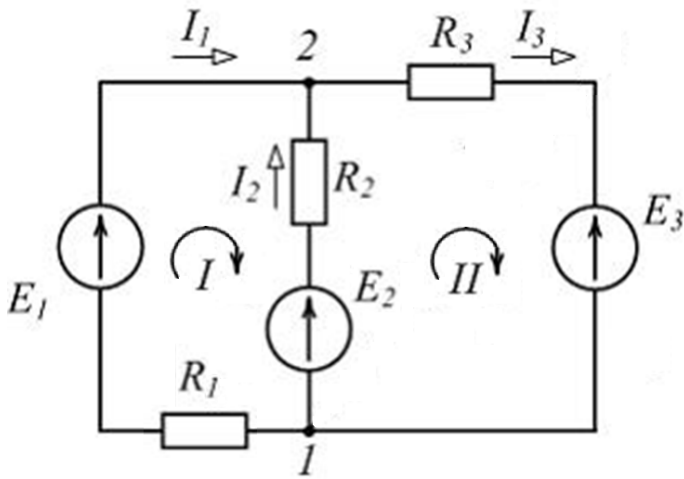


Рис. 1.1. Схема электрической цепи

Решение

Схема цепи содержит 3 ветви ($m=3$) и 2 узла ($n=2$). По каждой ветви проходит свой ток, следовательно, число неизвестных токов равно числу ветвей, и для определения токов необходимо составить m уравнений. При этом по первому закону Кирхгофа составляют уравнения для $(n-1)$ узлов. Недостающие $m-(n-1)$ уравнения получают по второму закону Кирхгофа, составляя их для $m-(n-1)$ взаимно независимых контуров. Рекомендуется выполнять операции расчета в определенной последовательности.

1. Обозначение токов во всех ветвях. Направление токов выбирается произвольно.

2. Составление уравнений по первому закону Кирхгофа.

Для первого узла уравнение имеет вид:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (1.1)$$

Для второго узла уравнение имеет вид:

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0. \quad (1.2)$$

3. Составление уравнений по второму закону Кирхгофа. Необходимо составить 2 уравнения.

Для первого контура уравнение имеет вид:

$$E_1 - E_2 = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2. \quad (1.3)$$

Для второго контура уравнение имеет вид:

$$E_2 - E_3 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3. \quad (1.4)$$

4. Составление системы из уравнений (1.1) или (1.2) и (1.3, 1.4) и решение известными математическими методами. Если в результате расчетов численное значение тока получено со знаком «минус», это означает, что реальное направление тока данной ветви противоположно принятому в начале расчета.

5. Проверка правильности расчетов. Для проверки правильности произведенных расчетов необходимо подставить полученные численные значения токов в полученные ранее уравнения.

Варианты заданий

Вариант 1 – 10	
	$E_1 = 10 \text{ В}$
	$E_2 = 15 \text{ В}$
	$R_1 = 1,5 \text{ Ом}$
	$R_2 = 2 \text{ Ом}$
	$R_3 = 5 \text{ Ом}$
	$R_4 = 1 \text{ Ом}$
	$R_5 = 1,25 \text{ Ом}$
$R_6 = 0,75 \text{ Ом}$	
Вариант 11 – 20	
	$E_1 = 20 \text{ В}$
	$E_2 = 25 \text{ В}$
	$R_1 = 0,5 \text{ Ом}$
	$R_2 = 4 \text{ Ом}$
	$R_3 = 4 \text{ Ом}$
	$R_4 = 1,5 \text{ Ом}$
$R_5 = 2 \text{ Ом}$	
Вариант 21 – 30	
	$E_1 = 15 \text{ В}$
	$E_2 = 20 \text{ В}$
	$R_1 = 7 \text{ Ом}$
	$R_2 = 1,75 \text{ Ом}$
	$R_3 = 0,25 \text{ Ом}$
	$R_4 = 3 \text{ Ом}$
	$R_5 = 3 \text{ Ом}$
$R_6 = 2 \text{ Ом}$	

ЗАДАНИЕ 2

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ

По данным таблицы 2.1 произвести расчет электрической цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C , которые соединены последовательно. Напряжение в цепи изменяется по закону $U = U_m \sin(\omega t)$. Зарисовать схему электрической цепи и определить действующее значение тока I , напряжения на сопротивлении U_R , индуктивности U_L и емкости U_C , коэффициента мощности цепи, активную P , реактивную Q и полную S мощности. Построить в масштабе векторную диаграмму токов-напряжений.

Решение

Действующее значение тока в цепи с переменным током можно определить по закону Ома для цепей переменного тока:

$$I = U / Z, \quad (2.1)$$

где U , В – действующее значение напряжения, Z , Ом – полное сопротивление.

Действующим называют среднее квадратичное значение синусоидального тока (напряжения) за период и определяют по формуле

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.2)$$

Полное сопротивление Z определяется как сумма активного R и реактивного X сопротивлений

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (2.3)$$

где $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$, Ом – индуктивное сопротивление,

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \text{ Ом – емкостное сопротивление.}$$

Коэффициент мощности цепи определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}. \quad (2.4)$$

Активная мощность цепи определяется по формуле

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \quad (2.5)$$

Реактивная мощность цепи определяется по формуле

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (2.6)$$

Полная мощность цепи определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.7)$$

При построении векторной диаграммы токов-напряжений в цепи с последовательным соединением элементов R, L и C необходимо помнить:

- напряжение и ток в резистивном элементе совпадают по фазе $\varphi = 0^\circ$.
- напряжение на индуктивном элементе опережает по фазе ток на $\varphi = 90^\circ$.
- напряжение на емкостном элементе отстает по фазе от тока на $\varphi = -90^\circ$.

Таблица 2.1

Варианты заданий

Последняя цифра шифра	Предпоследняя цифра шифра									
	0					1				
	$U_m, В$	$R, Ом$	$L, мГн$	$C, мкф$	$\omega, рад/с$	$U_m, В$	$R, Ом$	$L, мГн$	$C, мкф$	$\omega, рад/с$
0	–	–	–	–	–	120	40	300	1500	628
1	75	8	120	6000	628	125	36	290	1600	314
2	80	12	130	7000	314	130	32	280	1700	628
3	85	16	140	8000	628	135	28	270	1800	314
4	90	20	150	9000	314	140	24	260	1900	628
5	95	24	160	500	628	145	20	250	2000	314
6	100	28	170	1100	314	150	16	240	2100	628
7	105	32	180	1200	628	155	12	230	2200	314
8	110	36	190	1300	314	160	8	220	2300	628
9	115	40	200	1400	628	165	4	210	2400	314
Последняя цифра шифра	Предпоследняя цифра шифра									
	2					3				
	$U_m, В$	$R, Ом$	$L, мГн$	$C, мкф$	$\omega, рад/с$	$U_m, В$	$R, Ом$	$L, мГн$	$C, мкф$	$\omega, рад/с$
0	70	4	300	2500	314	220	40	120	3500	628
1	75	8	290	2600	628	225	36	130	3600	314
2	80	12	280	2700	314	230	32	140	3700	628
3	85	16	270	2800	628	235	28	150	3800	314
4	90	20	260	2900	314	240	24	160	3900	628
5	95	24	250	3000	628	245	20	170	4000	314
6	100	28	240	3100	314	250	16	180	4100	628
7	105	32	230	3200	628	255	12	190	4200	314
8	110	36	220	3300	314	260	8	200	4300	628
9	115	40	210	3400	628	265	4	120	4400	314

ЗАДАНИЕ 3

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

По данным таблицы 3.1 для трехфазной цепи (рис. 3.1.) рассчитать линейные I_L и фазные I_ϕ токи, полные мощности S каждой фазы. По результатам расчета построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить ток в нейтральном проводе I_N .

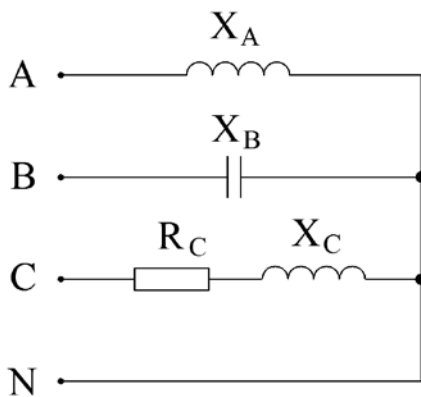


Рис. 3.1. Схема трехфазной цепи

Решение

Для решения воспользуемся комплексным способом расчета:

1. Для пассивных двухполюсников (т.е. не имеющих внутренний источник энергии) вводятся по определению комплексные сопротивления \bar{Z} , Ом.

$$\bar{Z} = R + j \cdot X = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg(\frac{X}{R})}. \quad (3.1)$$

Комплексное сопротивление для фазы А, содержащей только катушку индуктивности, равно:

$$\bar{Z}_A = j \cdot X_A = j \cdot 15 = 15 \cdot e^{90j} \text{ Ом}. \quad (3.2)$$

Таблица 3.1

Варианты заданий

Последняя цифра шифра	Предпоследняя цифра шифра							
	0				1			
	$U_{л} = 380 \text{ В}$							
	$X_A, \text{ Ом}$	$X_B, \text{ Ом}$	$R_C, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$	$X_A, \text{ Ом}$	$X_B, \text{ Ом}$	$R_C, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$
0	22	20	8	6	25	10	15	20
1	18	15	12	10	24	11	16	21
2	17	16	13	11	23	12	17	22
3	16	17	14	12	22	13	18	23
4	15	18	15	13	21	14	19	24
5	14	19	16	14	20	15	20	25
6	13	20	17	15	19	16	21	20
7	12	21	18	16	18	17	22	22
8	11	22	19	17	17	18	23	24
9	10	22	20	18	16	20	24	25
Последняя цифра шифра	Предпоследняя цифра шифра							
	2				3			
	$U_{л} = 380 \text{ В}$							
	$X_A, \text{ Ом}$	$X_B, \text{ Ом}$	$R_C, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$	$X_A, \text{ Ом}$	$X_B, \text{ Ом}$	$R_C, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$
0	15	20	16	10	15	25	10	20
1	16	21	17	11	16	24	11	18
2	17	22	16	12	17	23	12	20
3	18	23	15	13	18	22	13	16
4	19	24	14	14	19	21	14	15
5	20	25	13	15	22	20	15	14
6	21	26	12	16	21	19	16	13
7	22	27	11	17	22	18	17	12
8	23	20	10	18	23	17	18	11
9	24	28	10	20	24	16	20	10

Комплексное сопротивление для фазы В, содержащей только конденсатор, равно:

$$\bar{Z}_B = j \cdot X_B = -j \cdot 20 = 20 \cdot e^{-90j} \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

Комплексное сопротивление для фазы С, содержащей резистор и катушку индуктивности, равно:

$$\bar{Z}_C = \sqrt{8^2 + 6^2} \cdot e^{37j} = 10 \cdot e^{37j} \text{ Ом.} \quad (3.4)$$

2. Определяем токи в фазах по закону Ома. Так как данная трехфазная цепь соединена звездой, то справедливы соотношения $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ и $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$, отсюда токи в фазах:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{фА}} &= \bar{U}_{\text{фА}} / \bar{Z}_A = 220 \cdot e^{0j} / 15 \cdot e^{90j} = 14,7 \cdot e^{-90j} \text{ А;} \\ \bar{I}_{\text{фВ}} &= \bar{U}_{\text{фВ}} / \bar{Z}_B = 220 \cdot e^{120j} / 20 \cdot e^{-90j} = 11 \cdot e^{210j} \text{ А;} \\ \bar{I}_{\text{фС}} &= \bar{U}_{\text{фС}} / \bar{Z}_C = 220 \cdot e^{-120j} / 10 \cdot e^{37j} = 22 \cdot e^{-157j} \text{ А.} \end{aligned} \quad (3.5)$$

3. Определяем мощности.

Полные мощности в фазах А и В реактивные, так как там отсутствуют резистивные элементы, мощность в фазе С состоит из двух мощностей – активной и реактивной, зная сопротивления каждой фазы и ток они могут быть определены:

$$\begin{aligned} S_A &= Q_A = I_{\text{фА}}^2 \cdot X_A = 14,7^2 \cdot 15 = 3241 \text{ ВА;} \\ S_B &= Q_B = I_{\text{фВ}}^2 \cdot X_B = 11^2 \cdot 20 = 2420 \text{ ВА;} \\ S_C &= I_{\text{фС}}^2 \cdot Z_C = 22^2 \cdot 10 = 4840 \text{ ВА.} \end{aligned} \quad (3.6)$$

4. Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 3.2), по которой определяем ток в нейтральном проводе I_N методом векторного сложения токов.

5.

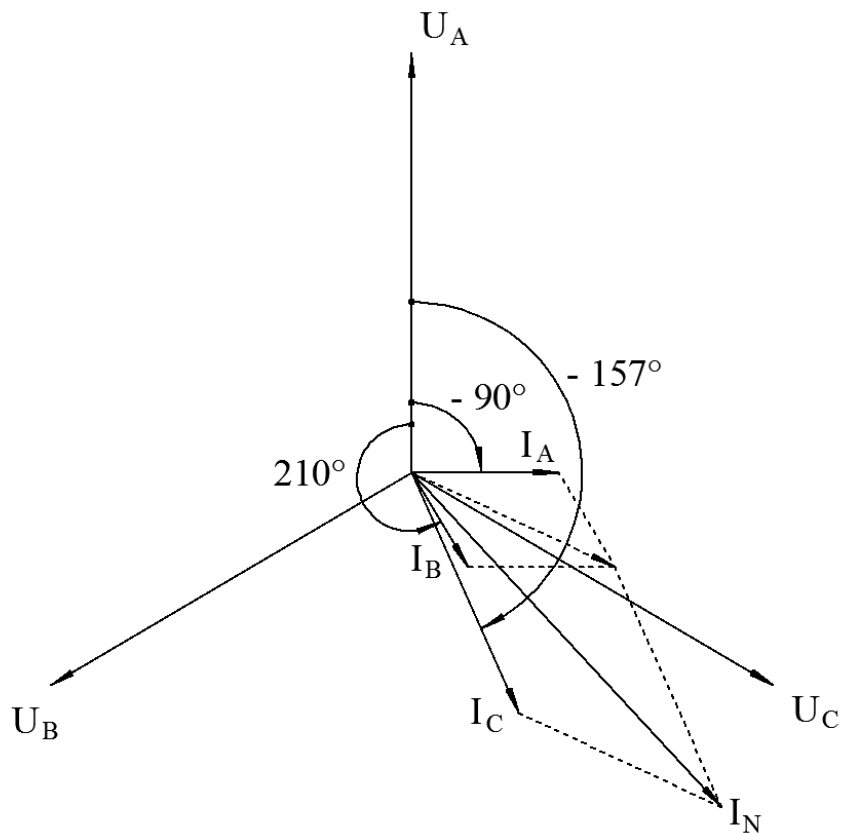


Рис. 3.2. Векторная диаграмма токов и напряжений

Как видно из рис. 3.2 после сложения векторов токов, ток в нейтральном проводе $I_N = 38$ А.

ЗАДАНИЕ 4

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ ЧАСТОТЫ СЕТИ

Произвести расчет однофазного трансформатора с сердечником стержневого типа с учетом частоты сети. Сердечник сварочного аппарата набран из пластин электротехнической стали толщиной 0,35...0,55 мм и стянут шпилькам, изолированными от сердечника (рис. 4.1).

По данным табл. 4.3. для заданных напряжений первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток, мощности нагрузки P_2 определить: поперечное сечение сердечника $S_{ст}$ (см²) трансформатора, число витков первичной обмотки W_1 , число витков вторичной обмотки W_2 , диаметры обмоточных проводов первичной и вторичной обмоток d_1 и d_2 (мм). Подобрать стандартный тип сердечника и проверить условие размещения катушки в окне сердечника.

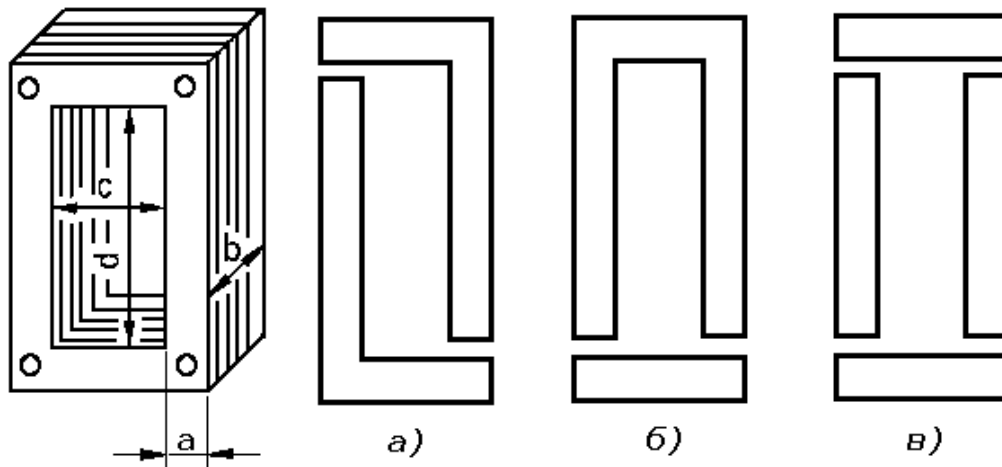


Рис. 4.1. Сердечник стержневого типа с пластинами: а – Г-образной формы, б – П-образной формы; в – отдельных пластин из трансформаторной стали

Решение

Поперечное сечение сердечника $S_{ст}$ определяется по следующей формуле

$$S_{ст} = 1,15 \cdot \sqrt{P_1}, \quad (4.1)$$

где P_1 – мощность (ВА), потребляемая трансформатором из сети, определяется из выражения

$$P_1 = \frac{U_2 I_2}{\eta} = \frac{P_2}{\eta}, \quad (4.2)$$

где P_2 – мощность нагрузки (ВА), η – КПД трансформатора, который берется равным 0,8...0,9.

Требуемое число витков первичной обмотки W_1 и вторичной обмотки W_2 можно опередить по формулам:

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot S_{ст} \cdot B_m};$$
$$W_2 = \frac{U_2 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot S_{ст} \cdot B_m}, \quad (4.3)$$

где f – частота, Гц; B_m – максимальное значение индукции в сердечнике, Тл (1,3...1,35 Тл – для трансформаторов, работающих на частоте 50 Гц и 1,1...1,2 Тл – на частоте 400 Гц).

В режиме нагрузки может быть заметная потеря части напряжения на активном сопротивлении провода вторичной обмотки. Поэтому для них рекомендуется число витков брать на 5 – 10 % больше рассчитанного.

Токи в обмотках трансформатора

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{P_1}{U_1}; \\ I_2 &= \frac{P_2}{U_2}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Задавшись допустимой плотностью тока для медного провода $j = 4,5 \text{ А/мм}^2$ можно определить диаметр обмоточного провода.

Диаметры обмоточных проводов первичной и вторичной обмоток

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{\frac{4 \cdot I_1}{\pi \cdot j}}; \\ d_2 &= \sqrt{\frac{4 \cdot I_2}{\pi \cdot j}}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Из стандартного ряда выбирают провод с ближайшим диаметром (табл. 4.1), ориентируясь в сторону увеличения.

По таблице 4.2 выбирается наиболее подходящий стандартный тип сердечника трансформатора исходя из площади поперечного сечения $S_{ст}$, рассчитанного ранее, ориентируясь в сторону увеличения.

Обозначение стержневого магнитопровода состоит из букв «ПЛ» и трёх чисел, первое из которых указывает ширину стержня «а», второе – толщину

магнитопровода «b» и третье – высоту окна «d» (рис. 4.1). Все размеры в миллиметрах.

Таблица 4.1

Диаметры и расчетные сечения обмоточных проводов

Номиналь- ный диаметр провода $d_{ст}$, мм	Диаметр провода с изоляцией $d_{из}$, мм	Номиналь- ный диаметр провода $d_{ст}$, мм	Диаметр провода с изоляцией $d_{из}$, мм	Номиналь- ный диаметр провода $d_{ст}$, мм	Диаметр провода с изоляцией $d_{из}$, мм
0,3	0,44	0,63	0,79	1,25	1,45
0,315	0,45	0,67	0,84	1,32	1,52
0,355	0,49	0,75	0,94	1,4	1,6
0,38	0,52	0,8	0,99	1,5	1,68
0,4	0,54	0,85	1,04	1,6	1,69
0,45	0,6	0,9	1,09	1,7	2,0
0,475	0,63	0,95	1,14	1,8	2,1
0,5	0,65	1,0	1,2	1,9	2,2
0,53	0,69	1,06	1,26	2,0	2,3
0,56	0,72	1,12	1,32	2,12	2,4
0,6	0,76	1,18	1,38	2,26	2,5

После выбора магнитопровода производится проверка условия размещения обмоток в окне сердечника

$$S_{ок} > S_{обм}, \quad (4.6)$$

где $S_{ок}$ – площадь окна сердечника, $S_{ок} = c \cdot d$, мм (рис. 4.1); $S_{обм}$ – площадь обмоток трансформатора

$$S_{обм} = 0,9 \cdot \alpha \cdot (d_{1из}^2 \cdot W_1 + d_{2из}^2 \cdot W_2), \quad (4.7)$$

где $\alpha = 0,7 \dots 0,85$ – коэффициент заполнения.

В случае невыполнения условия (4.6) необходимо сменить тип сердечника.

Таблица 4.2

Типоразмеры сердечников трансформаторов

Тип сердечника	Ширина стержня а, мм	Ширина окна с, мм	Высота окна d, мм
ПЛ 12,5 х 16-25	12,5	16	25
ПЛ 12,5 х 16-32	12,5	16	32
ПЛ 12,5 х 16-40	12,5	16	40
ПЛ 12,5 х 16-50	12,5	16	50
ПЛ 12,5 х 25-30	12,5	20	30
ПЛ 12,5 х 25-40	12,5	20	40
ПЛ 12,5 х 25-50	12,5	20	50
ПЛ 12,5 х 25-60	12,5	20	60
ПЛ 16 х 32-40	16	25	40
ПЛ 16 х 32-50	16	25	50
ПЛ 16 х 32-65	16	25	65
ПЛ 16 х 32-80	16	25	80
ПЛ 20 х 40-50	20	32	50
ПЛ 20 х 40-60	20	32	60
ПЛ 20 х 40-80	20	32	80

Окончание табл. 4.2

ПЛ 20 x 40-100	20	32	100
ПЛ 25 x 50-65	25	40	65
ПЛ 25 x 50-80	25	40	80
ПЛ 25 x 50-100	25	40	100
ПЛ 25 x 50-120	25	40	120
ПЛ 32 x 64-80	32	40	80
ПЛ 32 x 64-100	32	50	100
ПЛ 32 x 64-130	32	50	130
ПЛ 32 x 64-160	32	50	160

Таблица 4.3

Варианты заданий

Последняя цифра номера по списку	Предпоследняя цифра номера по списку							
	0				1			
	$U_1, В$	$U_2, В$	$P_2, ВА$	$f, Гц$	$U_1, В$	$U_2, В$	$P_2, ВА$	$f, Гц$
0	—	—	—	—	220	12	100	50
1	220	24	120	50	380	24	80	50
2	380	27	80	50	220	27	120	50
3	220	32	140	50	380	32	80	50
4	380	36	60	50	220	36	140	50
5	220	12	200	400	380	12	220	400
6	380	24	220	400	220	24	180	400
7	220	27	240	400	380	27	260	400
8	380	32	280	400	220	32	220	400
9	220	36	240	400	380	36	200	400

Окончание табл. 4.3

Последняя цифра номера по списку	Предпоследняя цифра номера по списку							
	2				3			
	$U_1, В$	$U_2, В$	$P_2, ВА$	$f, Гц$	$U_1, В$	$U_2, В$	$P_2, ВА$	$f, Гц$
0	220	12	80	50	220	12	90	50
1	380	24	100	50	380	24	70	50
2	220	27	110	50	220	27	110	50
3	380	32	90	50	380	32	100	50
4	220	36	150	50	220	36	130	50
5	380	12	210	400	380	12	230	400
6	220	24	190	400	220	24	200	400
7	380	27	270	400	380	27	280	400
8	220	32	230	400	220	32	210	400
9	380	36	210	400	380	36	180	400

ЗАДАНИЕ 5
РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Для двигателя постоянного тока параллельного возбуждения поданным таблицы 5.1 определить вращающий момент двигателя в номинальном режиме M_n , частоту вращения якоря двигателя в режиме идеального холостого хода, подводимую мощность и коэффициент полезного действия.

Рассчитать пусковой резистор по следующим условиям: нагрузочный момент M_c при пуске постоянный и равен $0,8M_n$, пуск нормальный (число пусковых секций определить из расчета). Расчет провести графическим методом.

Решение

Свойства двигателей постоянного тока в основном определяются способом питания обмотки возбуждения. В связи с этим различают двигатели с параллельным, независимым, последовательным и смешанным возбуждением.

Для контура «обмотка якоря – сеть» рис. 5.1, согласно второму закону Кирхгофа, для двигательного режима ($E < U$)

$$U = E + I_a \cdot R_a, \quad (5.1)$$

Откуда

$$I_a = (U - E) / R_a, \quad (5.2)$$

где R_a – сопротивление якоря, включая сопротивление обмоток якоря, добавочных полюсов и щеток.

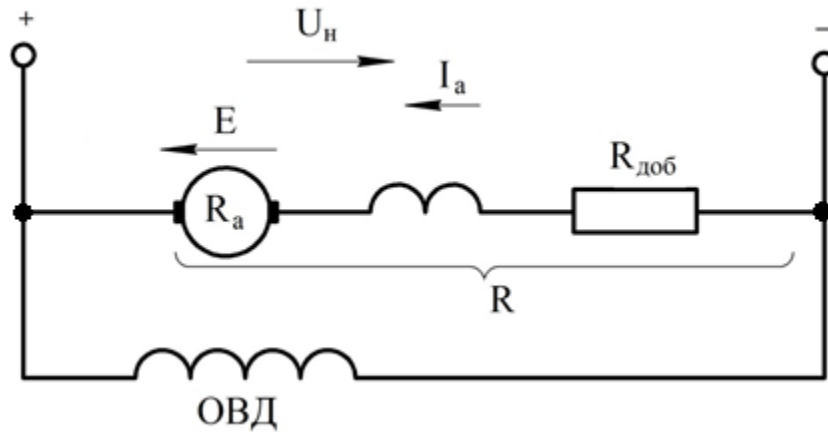


Рис. 5.1. Электрическая схема электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения

При работе машины постоянного тока в двигательном режиме ЭДС и вращающий момент определяются

$$E = c_e \cdot n \cdot \Phi; \quad (5.3)$$

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (5.4)$$

где I_a – ток якоря; c_e , c_m – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров машины; Φ – основной магнитный поток.

$$M_H = 9,55 \frac{P_э}{n_H}, \quad (5.5)$$

где $P_э$ – номинальная электромагнитная мощность,

$$P_э = E_H \cdot I_a. \quad (5.6)$$

Из (5.3) и (5.4) можно получить формулу для определения частоты вращения

$$n = \frac{E}{c_e \cdot \Phi} = \frac{U - I_a \cdot R_a}{c_e \cdot \Phi}. \quad (5.7)$$

Если в цепь якоря включен добавочный резистор или пусковой реостат R_{Π} , то выражение (5.7) приобретает вид

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_{\Pi})}{c_e \cdot \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (5.8)$$

где $n = E / c_e \cdot \Phi$ – частота вращения при холостом ходе; $\Delta n = I_a \cdot (R_a + R_{\Pi}) / (c_e \cdot \Phi)$ – снижение частоты, обусловленное суммарным падением напряжения во всех сопротивлениях, включенных в цепь якоря двигателя.

Величина Δn определяет наклон скоростной $n = f(I_a)$ и механической $n = f(M)$ характеристик к оси абсцисс.

При пуске двигателя с параллельным возбуждением необходимо выполнить два основных условия: не допустить чрезмерно большого пускового тока, опасного для обмотки якоря, щеточных контактов и коллектора; обеспечить пусковой момент, необходимый для разгона двигателя с рабочим механизмом. Эти условия обеспечиваются надлежащим выбором пускового резистора. При неподвижном якоре ($n = 0$) индуцированная в обмотке якоря ЭДС равна нулю, поэтому при пуске двигателя без пускового резистора R_{Π} ток в обмотке якоря

$$I_{\Pi} = \frac{U}{R_a}. \quad (5.9)$$

Так как в машинах постоянного тока сопротивление якоря составляет десятые и даже сотые доли ома, то в случае непосредственного пуска в ход при полном

напряжении в сети ток якоря будет недопустимо большим. Поэтому пуск двигателя путем включения якоря на полное напряжение в сети применяется только для двигателей, имеющих сравнительно большое внутреннее сопротивление.

Во всех прочих случаях ток в цепи якоря при пуске двигателя в ход ограничивают включением в цепь якоря пускового резистора.

При этих условиях ток в цепи якоря

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_{\Pi}} \quad (5.10)$$

По мере увеличения частоты вращения якоря сопротивление пускового резистора следует уменьшить, так будет возрастать ЭДС, индуцируемая в якоре. Снижением сопротивления резистора при пуске, а также надлежащим выбором его значения добиваются того, что пусковой ток и момент двигателя во время пуска колеблются в заданных пределах, обеспечивая требуемые условия разгона исполнительного механизма, R_1 , R_2 и т.д. (рис. 5.2) будем называть сопротивлениями ступеней, r_1 , r_2 и т.д. – резисторами секций. Рассчитывают эти резисторы двумя методами: графическим или аналитическим. При графическом расчете пускового резистора строят пусковую диаграмму рис. 5.3.

По горизонтальной оси откладывают пусковые моменты и токи: максимальный $M_1(I_1)$ и минимальный $M_2(I_2)$ моменты (рис. 5.3) двигателя в конце разгона на любой из ступеней сопротивления. Переключающий момент $M_1(I_1)$ и момент $M_2(I_2)$ для двигателей постоянного тока обычно принимают

$$\begin{aligned} M_1 &= (2 \dots 2,5) \cdot M_H; & I_1 &= (2 \dots 2,5) \cdot I_H; \\ M_2 &= (1,1 \dots 1,2) \cdot M_H; & I_2 &= (1,1 \dots 1,2) \cdot I_H, \end{aligned} \quad (5.11)$$

где M_H и I_H номинальный момент и ток двигателя, которые соответствуют в данном случае моменту нагрузки M_c , т.е. $M_H = M_c$, $I_H = I_c$.

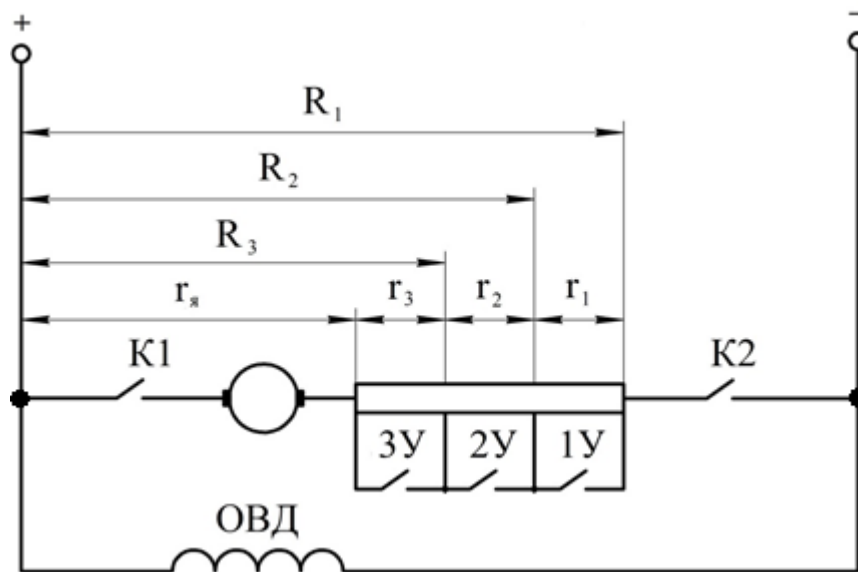


Рис. 5.2. Схема включения пусковых резисторов

Сопротивление якорной цепи R_a принимается по каталогу или может быть определено по формуле

$$R_a = \frac{U}{I_a} \cdot (0,5 - \eta_H), \quad (5.12)$$

где η_H – коэффициент полезного действия.

На оси ординат откладывают частоту вращения холостого хода n_0 , которую можно определить по формуле

$$n_0 = n_H \cdot \frac{U_H}{U_H - I_{aH} \cdot R_a}. \quad (5.13)$$

Из точки, соответствующей номинальному моменту, проводят перпендикуляр $M_{на}$, откладывают на нем в масштабе частоту вращения якоря n_n , и получают точку б (см. рис. 5.3).

Соединяя прямой точку б с точкой идеального холостого хода n_0 , получают естественную механическую характеристику двигателя n_0 -б.

Отрезок а-б между горизонтальной прямой n_0 -а и естественной механической характеристикой n_0 -б соответствует сопротивлению якорной цепи двигателя R_a .

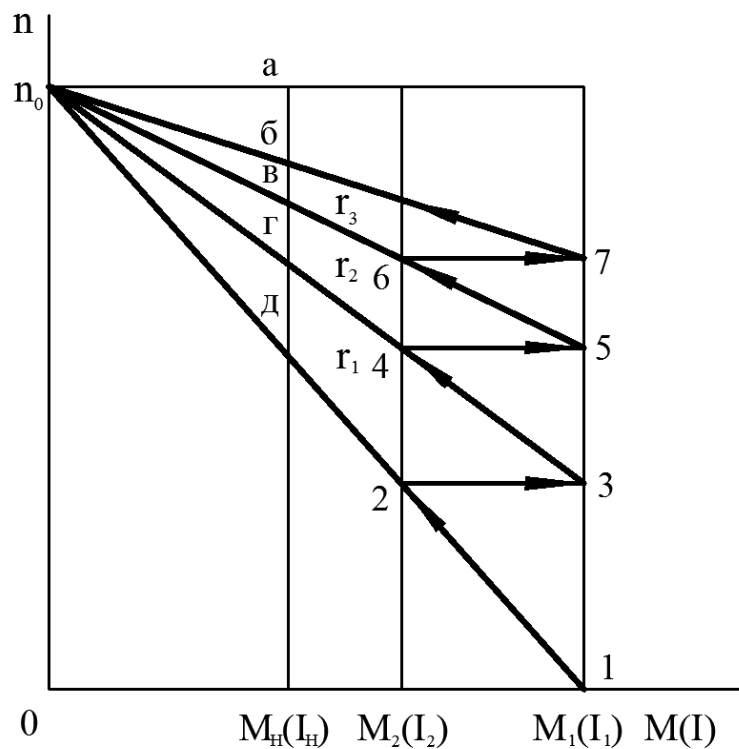


Рис. 5.3. Пусковые характеристики двигателя

Прямая 1- n_0 будет первой характеристикой, соответствующей полному сопротивлению пускового резистора. С точки 1 начинается разгон двигателя. При достижении двигателем переключающего момента M_1 первую секцию пускового резистора $R_{п1}$ отключают, что изобразится горизонтальной линией, проведенной

через точку 2. При пересечении этой линии с перпендикуляром M_1 -а определится точка 3 второй искусственной характеристики.

Отрезок г-д в масштабе сопротивлений дает сопротивление первой секции $R_{п1}$. Дальнейшее построение ясно из анализа рис. 5.3.

Отрезки д-г, г-в, в-б соответствуют сопротивлениям отдельных секций пускового резистора в порядке их замыкания.

Масштаб для сопротивления, Ом/мм

$$m_c = \frac{R_a}{a-b}. \quad (5.14)$$

где а-б – отрезок прямой, соответствующий сопротивлению якоря R_a .

Если при построении окажется, что последняя горизонтальная линия 6-7 не пересекает естественную характеристику в точке 7, необходимо несколько изменить значение момента $M_2(I_2)$ и повторить построение.

При расчете необходимо помнить, что число пусковых ступеней ускорения для двигателей малой мощности (до 10 кВт) равно 1-2, для двигателей средней мощности (до 50 кВт) это 2-3, а для двигателей большой мощности 3-4.

Таблица 5.1

Варианты заданий

№ Вар-та	Мощность двигателя $P_{н}$, кВт	Частота вращения двигателя $n_{н}$, об/мин	Сопротивление обмотки якоря R_a , Ом	Ток двигателя $I_{н}$, А	Напряжение двигателя $U_{н}$, В
1	0,3	1500	22,6	2,1	220
2	0,7	3000	5,3	4,3	220
3	0,2	1000	26,8	1,4	220

Продолжение табл. 5.1

4	0,45	1500	11,76	2,9	220
5	1,0	3000	3,29	6,0	220
6	0,45	750	9,48	2,9	220
7	0,3	1000	16,6	2,0	220
8	0,7	1500	6,75	4,3	220
9	1,5	3000	1,99	9,0	220
10	0,3	750	14,3	1,95	220
11	0,45	1000	9,65	2,75	220
12	1,0	1500	4,17	5,9	220
13	2,2	3000	1,03	12,5	220
14	0,7	1000	5,45	4,25	220
15	1,5	1500	2,455	8,7	220
16	3,2	3000	0,642	17,5	220
17	0,7	750	4,98	4,2	220
18	1,0	1000	3,17	5,7	220
19	2,2	1500	1,205	12,0	220
20	4,5	3000	0,352	24,3	220
21	1,0	750	5,35	6,8	220
22	1,5	1000	2,9	9,3	220
23	3,2	1500	1,032	18,4	220
24	6,0	3000	0,36	33,0	220
25	1,5	750	2,92	9,75	220
26	2,2	1000	1,75	13,3	220
27	4,5	1500	0,78	25,4	220
28	2,2	750	1,91	13,6	220
29	3,2	1000	1,05	18,3	220
30	6,0	1500	0,472	33,2	220
31	3,2	750	1,073	19,0	220
32	4,5	1000	0,632	25,2	220
33	8,0	1500	0,269	43,5	220
34	4,5	750	0,76	26,0	220
35	6,0	1000	0,494	32,6	220

Окончание табл. 5.1

36	11,0	1500	0,187	59,5	220
37	6,0	750	0,531	33,5	220
38	8,0	1000	0,328	43,0	220
39	14,0	1500	0,1275	73,5	220
40	7,0	750	0,546	42,0	220