



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Электротехника и электроника»

Практикум по дисциплине

«Диагностика электрических и электронных систем и устройств»

Авторы
Бондарь И.М.
Дударев К.Г.
Ананченко Л.Н.

Ростов-на-Дону, 2024

Аннотация

Практикум по дисциплине «Диагностика электрических и электронных систем и устройств» предназначен для магистрантов направления 13.04.03 Энергетическое машиностроение, программа «Электрические и электронные системы энергетического машиностроения с цифровым управлением».

Авторы

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Электротехника и электроника»
Бондарь Игорь Михайлович;

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Электротехника и электроника»
Дударев Константин Геннадиевич;

доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры «Электротехника и электроника»
Ананченко Людмила Николаевна



Оглавление

Общие методические указания к выполнению контрольных расчетно-графических работ	4
1. Однофазные электрические цепи	5
Задача №1 для контрольной работы	8
2. Трехфазные электрические цепи	11
Задача №2 для контрольной работы	15
3. Трансформаторы	19
Задача №3 для контрольной работы	24
4. Машины постоянного тока	26
Задача №4 для контрольной работы	31
5. Асинхронные машины	33
Задача №5 для контрольной работы	40
6. Выбор электродвигателей для производственных механизмов.....	42
Задача №6 для контрольной работы	45
7. Электронные устройства	47
Задача №7 для контрольной работы	51
Рекомендуемая литература	54
Приложения	55

Общие методические указания к выполнению расчетно-графических работ

Целью расчетно-графических работ является окончательная проверка усвоения магистрантами соответствующих разделов дисциплины. Приступать к решению очередной задачи следует после изучения необходимого материала и решения достаточного количества задач из рекомендуемой литературы. При оформлении каждой задачи следует приводить исходную схему с принятыми буквенными обозначениями и числами заданных величин. Все рисунки, схемы и графики должны быть выполнены аккуратно в масштабе.

На осях координат должны быть указаны откладываемые величины и единицы их измерений. При оформлении работы нужно указать все необходимые расчетные формулы. Конечный результат должен быть выделен из общего текста. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований. Каждый этап решения должен иметь пояснение.

Результаты вычислений рекомендуется записывать с точностью до третьей значащей цифры. Вывод формул и уравнений, имеющих в литературе, приводить в тексте работы не следует. На титульном листе расчетно-графической работы должно быть указано наименование университета и факультета, фамилия, инициалы и шифр студента. В конце работы необходимо привести список использованной литературы, поставить дату окончания работы и свою подпись. Пример оформления контрольной работы представлен в прил. 1.

Контрольную работу желательно выполнять на компьютере.

Каждая задача имеет 51 вариант. Вариант определяется двумя последними цифрами шифра (номера зачетной книжки). Если две последние цифры шифра более 50, то для определения номера варианта необходимо вычесть 50. Если предпоследняя цифра шифра ноль, то студент выполняет вариант, определяемый последней цифрой своего шифра.

Проверенная преподавателем расчетно-графическая работа подлежит защите в установленные отделом магистратуры сроки.

1. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Приступая к решению задачи № 1 магистранты должны:

1. Знать содержание терминов: резистор, сопротивление, индуктивная катушка, индуктивность, индуктивное сопротивление, конденсатор, ёмкость, ёмкостное сопротивление, фаза, начальная фаза, угол сдвига фазы, период, частота, угловая частота, мгновенное, действующее и среднее значения гармонических величин, полное, активное, реактивное, комплексное сопротивления и проводимость; полная, активная, реактивная, комплексная мощность; условия достижения резонансов напряжений и токов.

2. Понимать особенности электромагнитных процессов в электрических цепях синусоидального тока, энергетические соотношения в цепях синусоидального тока, экономическое значение коэффициента мощности.

3. Уметь составлять дифференциальные и комплексные уравнения состояния линейных цепей; представлять гармонически изменяющиеся величины тригонометрическими функциями, изображающими величинами и комплексными числами; строить векторные диаграммы неразветвлённых цепей и цепей с параллельным соединением ветвей.

При расчете цепей синусоидального тока приходится совершать различные математические операции, которые удобно производить над действующими значениями токов и напряжений, рассматривая их как векторы. Величины векторов при этом равны действующим значениям токов и напряжений, а начальная фаза определяет положение вектора относительно положительной горизонтальной оси координат.

Диаграмма, изображающая совокупность векторов, построенных с соблюдением их взаимной ориентации по фазе, называется векторной диаграммой.

При построении векторных диаграмм один из векторов принимают за основной (исходный), располагая его по положительному направлению горизонтальной оси. В этом случае начальная фаза тока или напряжения (в зависимости от того, что данный вектор изображает) равна нулю. Для последовательной цепи за основной вектор принимают вектор тока, а для параллельной – вектор напряжения.

Для практических расчетов удобнее представлять векторы тока и напряжения, а также сопротивления и проводимости, комплексными числами, в которых активные составляющие являются действительными величинами, а реактивные – мнимыми. При этом знак у мнимой величины зависит от характера реактивной составляющей. При расчете электрических цепей переменного тока с помощью комплексных чисел могут быть использованы методы расчета, применяемые для цепей постоянного тока.

Уравнения Кирхгофа в этом случае записываются в комплексной или векторной форме записи.

При выполнении расчетов по методу комплексных чисел следует иметь в виду, что действительная и мнимая части комплексных сопротивлений, проводимости и мощности всегда представляют собой соответственно активную и реактивную составляющие этих величин. Действительная и мнимая части комплексного напряжения и комплексного тока определяются начальными фазами.

Расчетная часть

На рис. 1.1 изображена электрическая цепь синусоидального тока со смешанным соединением приемников. Известно, что $U = 120$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 24$ Ом, $R_3 = 15$ Ом, $L_1 = 19,1$ мГ, $L_3 = 63,5$ мГ, $C_2 = 455$ мкФ, $f = 50$ Гц. Требуется определить: токи I_1, I_2, I_3 в ветвях цепи; напряжение на участках \dot{U}_{ab} и \dot{U}_{bc} ; активную, реактивную и полную мощности; построить на комплексной плоскости векторную диаграмму.

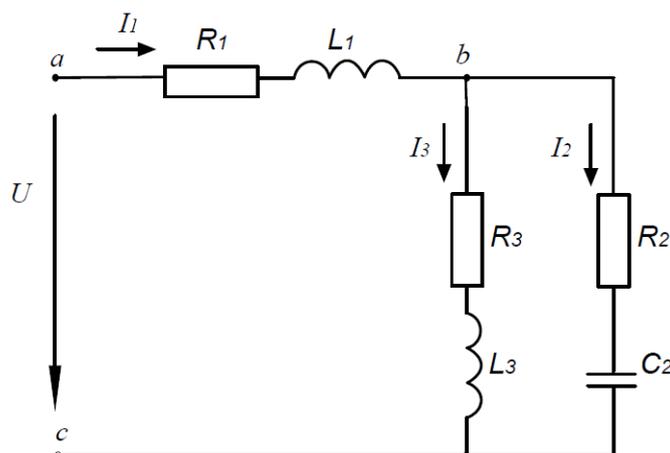


Рис. 1.1. Разветвленная электрическая цепь однофазного переменного тока

Определяем комплексные сопротивления участков цепи:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 = 10 + j2\pi \cdot 50 \cdot 19,1 \cdot 10^{-3} = 10 + j6 = 11,6e^{j31^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} = 24 - j\frac{10^6}{2\pi \cdot 50 \cdot 455} = 24 - j7 = 25e^{-j16^\circ 15' } \text{ Ом};$$

$$Z_3 = R_3 + j\omega L_3 = 15 + j2\pi \cdot 50 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3} = 15 + j20 = 25e^{j53^\circ 05' } \text{ Ом}.$$

Принимаем $\dot{U} = U = 120$ В, так как начальная фаза напряжения не задана.

Комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned}
 Z &= Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = 10 + j6 + \frac{25e^{-j16^\circ 15'} \cdot 25e^{j53^\circ 05'}}{24 - j7 + 15 + j20} = \\
 &= 10 + j6 + \frac{625e^{j36^\circ 50'}}{39 + j13} = 10 + j6 + \frac{625e^{j36^\circ 50'}}{41e^{j15^\circ 15'}} = \\
 &= 10 + j6 + 15,25e^{j21^\circ 35'} = 26,7e^{j23^\circ 55'} \text{ Ом.}
 \end{aligned}$$

Определим ток \dot{I}_1 в неразветвленной части цепи:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{120}{26,7e^{j23^\circ 55'}} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} \text{ А.}$$

Токи \dot{I}_2 и \dot{I}_3 в параллельных ветвях могут быть выражены через ток в неразветвленной части цепи:

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} \cdot \frac{25e^{j53^\circ 05'}}{41e^{j15^\circ 15'}} = 2,74e^{j13^\circ 55'} \text{ А;} \\
 \dot{I}_3 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3} = 4,5e^{-j23^\circ 55'} \cdot \frac{25e^{-j16^\circ 15'}}{41e^{j15^\circ 15'}} = 2,74e^{-j55^\circ 25'} \text{ А.}
 \end{aligned}$$

Токи \dot{I}_2 и \dot{I}_3 можно найти другим способом:

$$\dot{U}_{bc} = Z_1 \cdot \dot{I}_1 = 15,25e^{j21^\circ 35'} \cdot 4,5e^{-j23^\circ 55'} = 68,6e^{-j2^\circ 20'} \text{ В;}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_2} = \frac{68,6e^{-j2^\circ 20'}}{25e^{-j16^\circ 15'}} = 2,74e^{j13^\circ 55'} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_3} = \frac{68,6e^{-j2^\circ 20'}}{25e^{j53^\circ 05'}} = 2,74e^{-j55^\circ 25'} \text{ А.}$$

Напряжение на участке ab

$$\dot{U}_{ab} = Z_{ab} \cdot \dot{I}_1 = 11,6e^{j31^\circ} \cdot 4,5e^{-j23^\circ 55'} = 52,2e^{j7^\circ 05'} \text{ В.}$$

Комплексная мощность цепи

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= \dot{U} \cdot \dot{I}_1 = Se^{j\varphi} = P + jQ = 120 \cdot 4,5e^{j23^\circ 55'} = \\
 &= 540e^{j23^\circ 55'} = 494 + j218 \text{ В} \cdot \text{А,}
 \end{aligned}$$

где \dot{I}_1 – сопряженный комплекс тока; $P = 494$ Вт – активная мощность цепи; $Q = 218$ вар – реактивная мощность цепи; $S = 540$ В·А – полная мощность цепи.

На рис. 1.2 приведена векторная диаграмма токов и напряжений, построенная по расчетным данным.

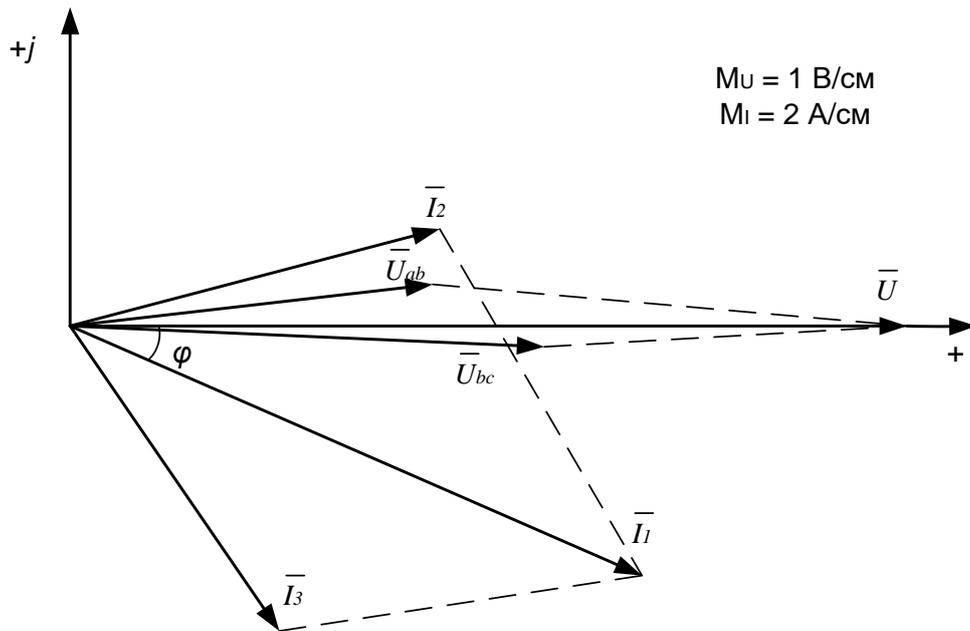


Рис. 1.2. Векторная диаграмма

Задача № 1 для контрольной работы

Для электрической цепи синусоидального тока, изображенной на рис. 1.3–1.12, и по заданным в табл. 1.1 параметрам определить токи во всех ветвях цепи и напряжения на отдельных участках. Определить показания вольтметра и активную мощность, показываемую ваттметром. Построить в масштабе на комплексной плоскости векторную диаграмму.

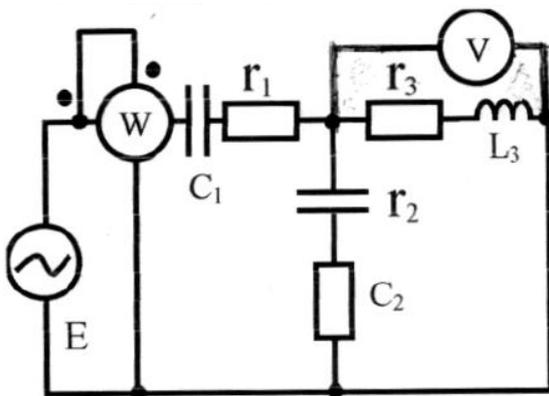


Рис. 1.3

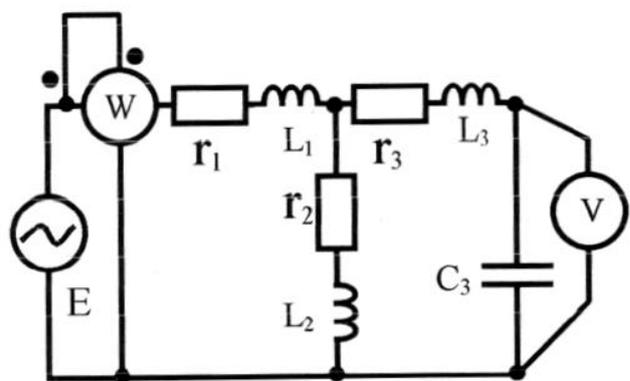


Рис. 1.4

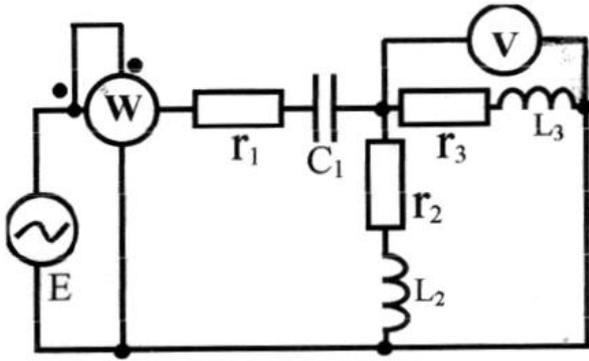


Рис. 1.5

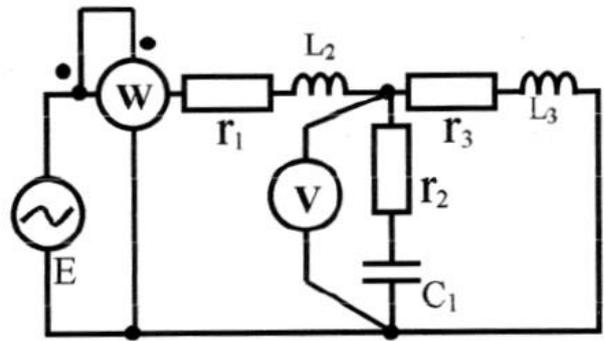


Рис. 1.6

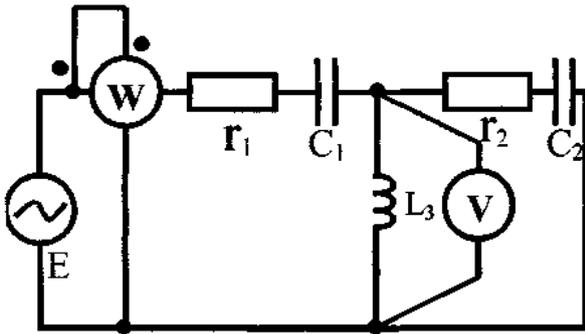


Рис. 1.7

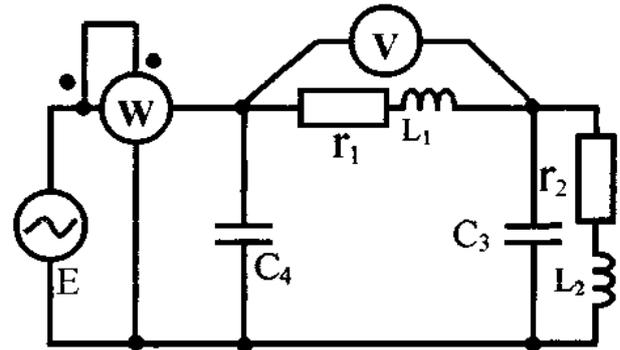


Рис. 1.8

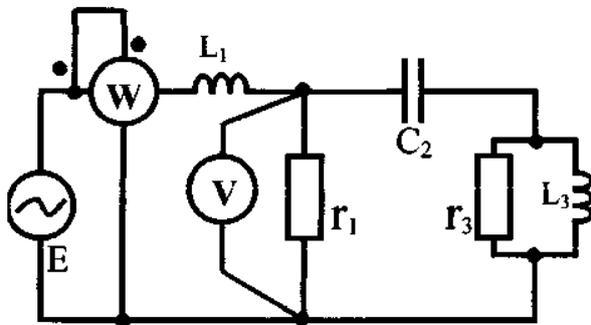


Рис. 1.9

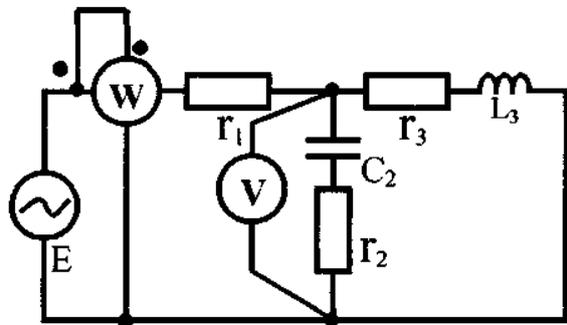


Рис. 1.10

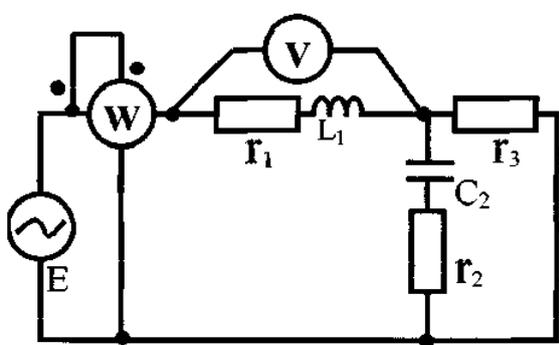


Рис. 1.11

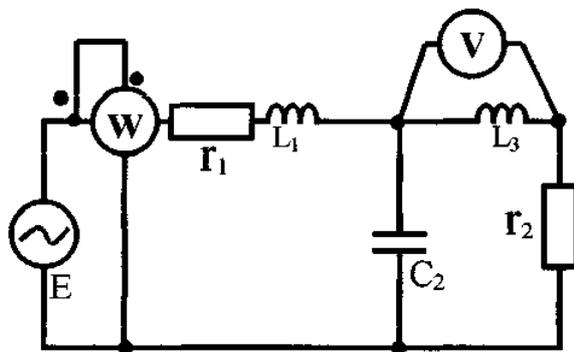


Рис. 1.12

Таблица 1.1

Данные к задаче № 1

Вариант	Рисунок	E , В	f , Гц	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	C_4 , мкФ	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
0	1.3	50	50	637	300	–	–	–	–	15,9	8	3	4
1	1.3	100	50	637	300	–	–	–	–	15,9	8	3	4
2	1.3	120	50	637	300	–	–	–	–	15,9	8	3	4
3	1.3	200	50	637	300	–	–	–	–	15,9	8	3	4
4	1.3	220	50	637	300	–	–	–	–	15,9	8	3	4
5	1.4	50	50	–	–	100	–	15,9	1000	115	10	4	100
6	1.4	100	50	–	–	100	–	15,9	1000	115	10	4	100
7	1.4	120	50	–	–	100	–	15,9	1000	115	10	4	100
8	1.4	200	50	–	–	100	–	15,9	1000	115	10	4	100
9	1.4	220	50	–	–	100	–	15,9	1000	115	10	4	100
10	1.5	50	50	637	–	–	–	–	15,9	6,37	5	10	8
11	1.5	100	50	637	–	–	–	–	15,9	6,37	5	10	8
12	1.5	120	50	637	–	–	–	–	15,9	6,37	5	10	8
13	1.5	200	50	637	–	–	–	–	15,9	6,37	5	10	8
14	1.5	220	50	637	–	–	–	–	15,9	6,37	5	10	8
15	1.6	150	50	–	1600	–	–	31,8	–	95	10	8	10
16	1.6	100	50	–	1600	–	–	31,8	–	95	10	8	10
17	1.6	120	50	–	1600	–	–	31,8	–	95	10	8	10
18	1.6	200	50	–	1600	–	–	31,8	–	95	10	8	10
19	1.6	220	50	–	1600	–	–	31,8	–	95	10	8	10
20	1.7	50	50	637	159	–	–	–	–	95	15	10	–
21	1.7	100	50	637	159	–	–	–	–	95	15	10	–
22	1.7	120	50	637	159	–	–	–	–	95	15	10	–
23	1.7	200	50	637	159	–	–	–	–	95	15	10	–
24	1.7	220	50	637	159	–	–	–	–	95	15	10	–
25	1.8	150	50	–	–	637	159	25	9	–	6	4	–
26	1.8	100	50	–	–	637	159	25	9	–	6	3	4
27	1.8	120	50	–	–	637	159	25	9	–	6	3	4
28	1.8	200	50	–	–	637	159	25	9	–	6	3	4
29	1.8	220	50	–	–	637	159	25	9	–	6	3	4
30	1.9	50	50	–	637	–	–	19,1	–	31,8	40	3	4
31	1.9	100	50	–	637	–	–	19,1	–	31,8	40	4	4
32	1.9	120	50	–	637	–	–	19,1	–	31,8	40	4	100
33	1.9	200	50	–	637	–	–	19,1	–	31,8	40	4	100
34	1.9	220	50	–	637	–	–	19,1	–	31,8	40	4	100
35	1.10	50	50	–	318	–	–	15,9	–	–	8	4	100
36	1.10	100	50	–	318	–	–	15,9	–	–	8	10	8
37	1.10	150	50	–	318	–	–	15,9	–	–	8	10	8

Окончание табл. 1.1

Вариант	Рисунок	E , В	f , Гц	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	C_4 , мкФ	L_1 , Гн	L_2 , Гн	L_3 , Гн	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом
38	1.10	200	50	–	318	–	–	15,9	–	–	8	10	8
39	1.10	220	50	–	318	–	–	15,9	–	–	8	10	8
40	1.11	50	50	–	318	–	–	9,55	–	–	4	10	8
41	1.11	100	50	–	318	–	–	9,55	–	–	4	8	10
42	1.11	120	50	–	318	–	–	9,55	–	–	4	8	10
43	1.11	200	50	–	318	–	–	9,55	–	–	40	8	10
44	1.11	220	50	–	318	–	–	9,55	–	–	10	8	10
45	1.12	50	50	–	318	–	–	15,9	–	31,8	10	8	10
46	1.12	100	50	–	159	–	–	15,9	–	31,8	15	10	–
47	1.12	120	50	–	159	–	–	15,9	–	31,8	15	10	–
48	1.12	200	50	–	159	–	–	15,9	–	31,8	15	10	–
49	1.12	220	50	–	159	–	–	15,9	–	31,8	15	10	–
50	1.12	50	50	–	318	–	–	15,9	–	31,8	15	10	–

2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

При изучении трехфазных цепей особое внимание необходимо обратить на преимущества, которые дает трехфазная система по сравнению с однофазной. Рассматривая схемы соединения обмоток генераторов и приемников, надо уяснить связь между фазными и линейными напряжениями в схеме соединения звездой, а также связь между фазными и линейными токами в схеме соединения треугольником.

Необходимо четко представлять, что в трехфазной цепи могут быть два основных режима: симметричный и несимметричный. Расчет трехфазной цепи в симметричном режиме сводится к расчету для одной фазы и производится аналогично расчету обычной цепи однофазного тока. Трехфазная цепь может рассматриваться как разветвленная цепь с тремя источниками питания и для ее расчета применяются методы, используемые при расчете сложных электрических цепей. Например, если несимметричный приемник соединен звездой без нейтрального провода, то для расчета трехфазной цепи можно применить метод узлового напряжения в комплексной форме.

После изучения настоящего раздела магистранты должны:

1. Знать основные элементы трехфазных цепей, способы соединения фаз обмотки генератора и включения в трехфазную цепь приемников; способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС.

2. Понимать назначение нейтрального провода, принципы построения потенциальных диаграмм; влияние рода и схемы включения нагрузки на величину тока в нейтральном проводе; схемы электроснабжения предприятий.

3. Уметь анализировать различные режимы симметричных и несимметричных цепей; читать схемы соединения трехфазных и однофазных приемников; предвидеть последствия коммутационных изменений в цепи на ее электрическое состояние.

Расчетная часть

Рассмотрим примеры расчета трехфазных цепей.

Задача 1. Приемники электрической энергии (светильники, двигатели подъемников, бетономешалок и т. д.) строительной площадки включены в четырехпроводную трехфазную сеть с линейным напряжением $U_L = 380$ В (рис. 2.1). Активные и индуктивные сопротивления фаз соответственно равны: $R_A = 3$ Ом; $X_A = 4$ Ом; $R_B = 5$ Ом; $X_B = 4$ Ом; $R_C = 4$ Ом; $X_C = 3$ Ом. Требуется определить токи в линейных и нейтральном проводах, активную мощность, потребляемую приемниками, построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

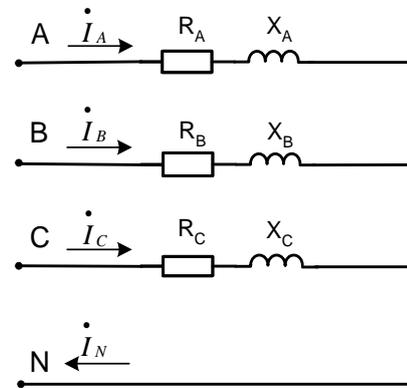


Рис. 2.1. Схема трехфазной цепи

Решение. Принимаем, что вектор фазного напряжения \dot{U}_A направлен по действительной оси, тогда $U_A = U_L / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$ В;

$$\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Находим линейные токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{220}{3 + j4} = \frac{220}{5e^{j53^\circ}} = 44e^{-j53^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{5 + j4} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{6,4e^{j38^\circ}} = 34,4e^{-j158^\circ} \text{ А}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220e^{j120^\circ}}{4 + j3} = \frac{220e^{j120^\circ}}{5e^{j37^\circ}} = 44e^{j83^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Ток в нейтральном проводе определяется как геометрическая сумма линейных токов:

$$\begin{aligned} \dot{I}_N &= \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 44e^{-j53^\circ} + 34,4e^{-j158^\circ} + 44e^{j83^\circ} = \\ &= 26,48 - j35,14 - 31,64 - j12,88 + 5,36 + j43,67 = \\ &= 0,2 - j4,35 = 4,5e^{j272^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

При несимметричной нагрузке активная мощность трехфазной цепи определяется как сумма мощностей отдельных фаз:

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A = 220 \cdot 44 \cdot \cos 53^\circ = 5\,614,4 \text{ Вт};$$

$$P_B = U_B I_B \cos \varphi_B = 220 \cdot 34,4 \cdot \cos 38^\circ = 5\,912,1 \text{ Вт};$$

$$P_C = U_C I_C \cos \varphi_C = 220 \cdot 44 \cdot \cos 37^\circ = 7\,550,4 \text{ Вт};$$

$$P = P_A + P_B + P_C = 5\,614,4 + 5\,912,1 + 7\,550,4 = 19\,076,9 \text{ Вт}.$$

На рис. 2.2 приведена векторная диаграмма токов и напряжений, построенная в масштабе по расчетным данным. Векторы фазных напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ располагаются под углом 120° . Векторы фазных токов расположены относительно векторов фазных напряжений под соответствующими углами – $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$. Геометрическое сложение фазных токов производим, используя формулу $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ и по правилу многоугольника, получаем вектор тока \vec{I}_N в нейтральном (нулевом) проводе.

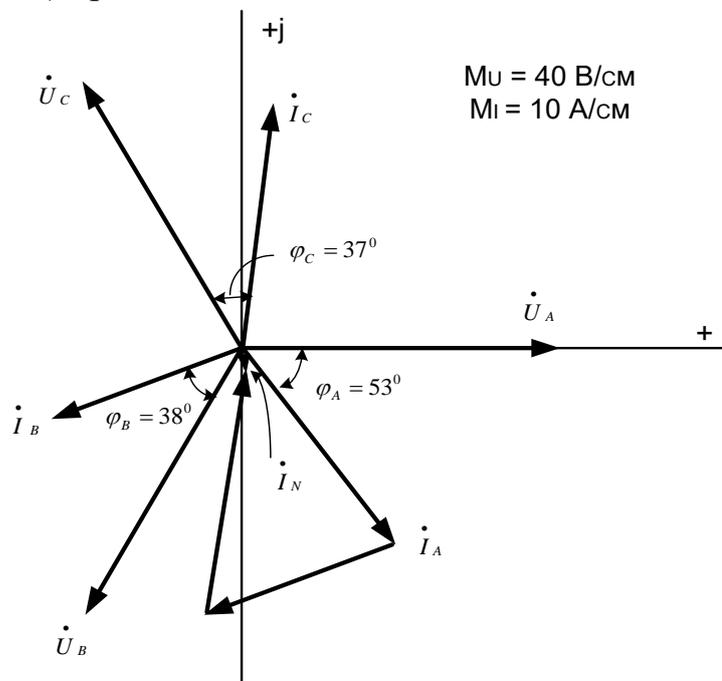


Рис. 2.2. Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной цепи

Задача 2. В трёхфазную цепь с линейным напряжением $U_L = 220$ В включён приёмник, соединённый треугольником, сопротивление каждой фазы которого $Z = (10 + j10)$ Ом (рис. 2.3). Требуется определить токи в фазных и линейных проводах, активную мощность, потребляемую приёмниками каждой фазы в отдельности, построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

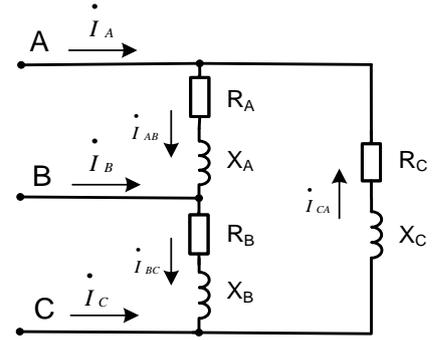


Рис. 2.3. Схема трёхфазной цепи при соединении потребителей в треугольник

Решение. Расчёт токов в трёхфазных цепях производится комплексным методом. Примем, что вектор линейного напряжения \dot{U}_{AB} направлен по действительной оси, тогда $\dot{U}_{AB} = 220$ В; $\dot{U}_{BC} = 220e^{-j120^\circ}$ В; $\dot{U}_{CA} = 220e^{j120^\circ}$ В.

Определяем фазные токи:

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{220}{10 + j10} = \frac{220}{14,14e^{j45^\circ}} = 15,6e^{-j45^\circ} = 11 - j11 \text{ А};$$

$$\dot{i}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{14,14e^{j45^\circ}} = 15,6e^{-j165^\circ} = -15 - j4,03 \text{ А};$$

$$\dot{i}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{10 + j10} = \frac{220e^{j120^\circ}}{14,14e^{j45^\circ}} = 15,6e^{j75^\circ} = 4,03 + j15 \text{ А}.$$

Находим линейные токи:

$$\dot{I}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} = 11 - j11 - 4,03 - j15 = 6,97 - j26 = 26,9e^{-j75^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} = -15 - j4,03 - 11 + j11 = -26 + j6,97 = 26,9e^{j165^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC} = 4,03 + j15 + 15 + j4,03 = 19,03 + j19,03 = 26,9e^{j45^\circ} \text{ А}.$$

Активная мощность цепи

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 26,9 \cdot \cos 45^\circ = 7\,260 \text{ Вт}.$$

Активная мощность фазы

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = 220 \cdot 15,6 \cdot \cos 45^{\circ} = 2\,420 \text{ Вт.}$$

На рис. 2.4 приведена векторная диаграмма токов и напряжений, построенная в масштабе по расчетным данным. Векторы фазных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ располагаются под углом 120° . Векторы фазных токов расположены относительно векторов фазных напряжений под соответствующими углами $-\varphi_{AB}, \varphi_{BC}, \varphi_{CA}$.

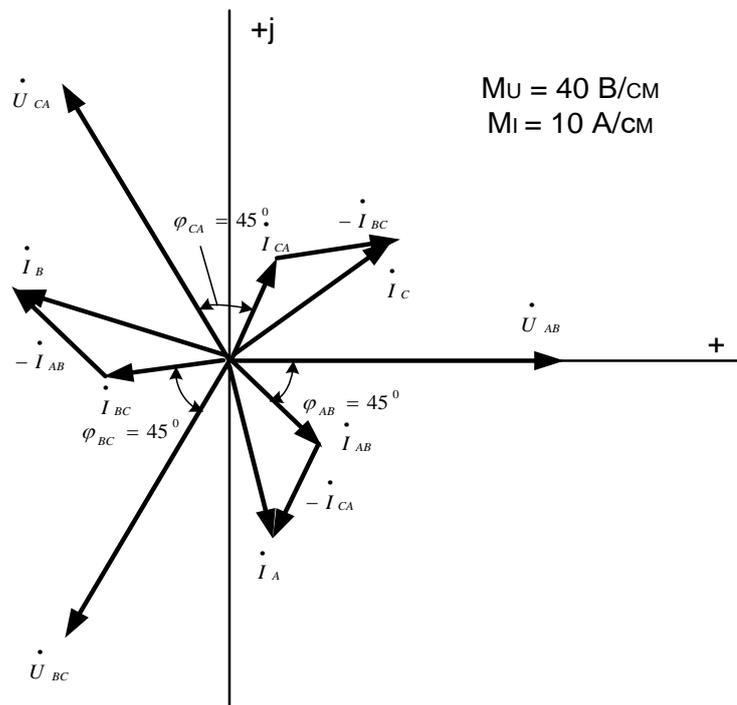


Рис. 2.4. Векторная диаграмма напряжений и токов для схемы «треугольник»

Задача № 2 для контрольной работы

Для электрической схемы, изображенной на рис. 2.5–2.21, по заданным в табл. 2.1 параметрам и линейному напряжению определить фазные и линейные токи, ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной схемы), активную мощность всей цепи и каждой фазы отдельно. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на комплексной плоскости.

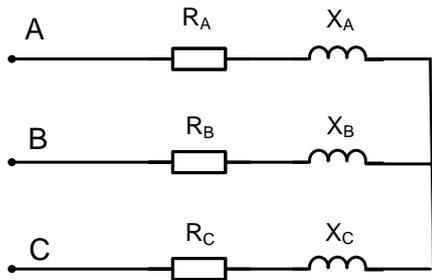


Рис. 2.5

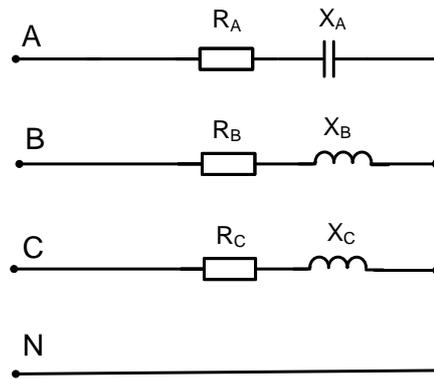


Рис. 2.6

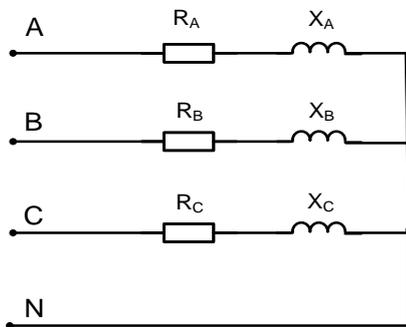


Рис. 2.7

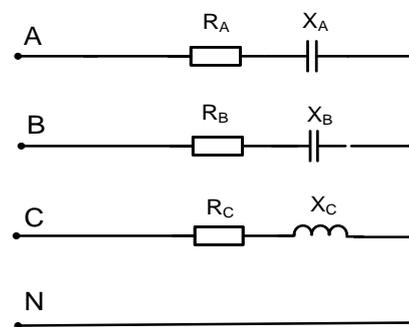


Рис. 2.8

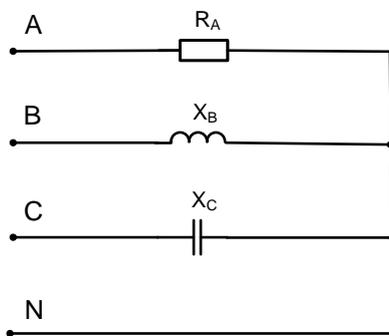


Рис. 2.9

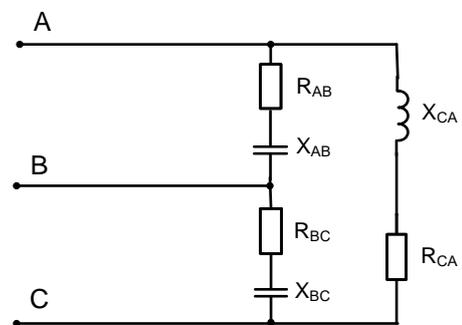


Рис. 2.10

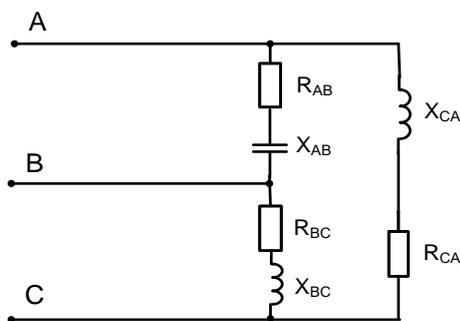


Рис. 2.11

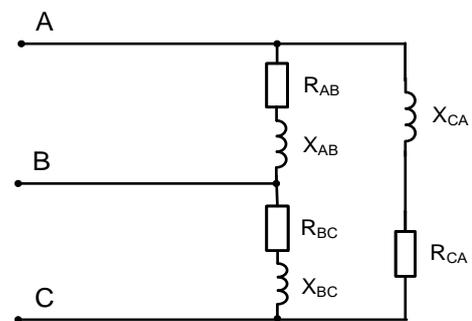


Рис. 2.12

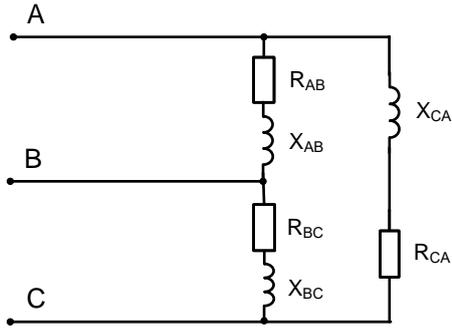


Рис. 2.13

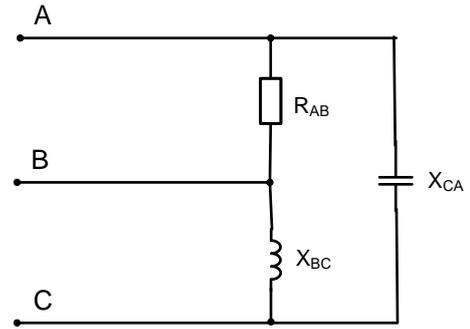


Рис. 2.14

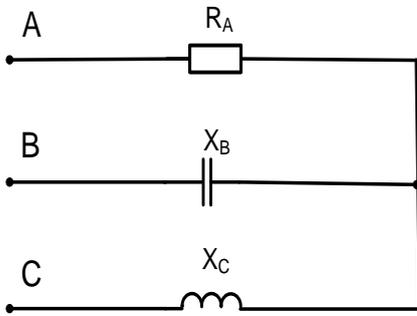


Рис. 2.15

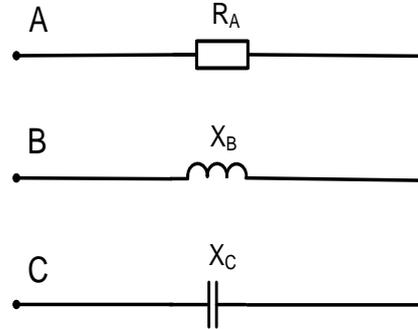


Рис. 2.16

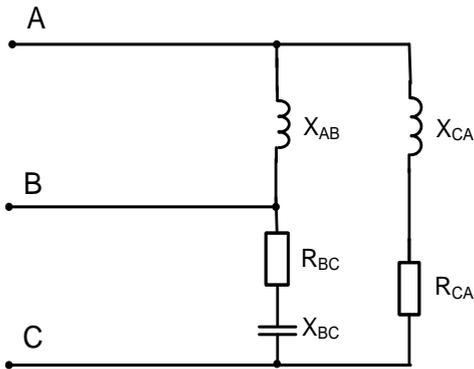


Рис. 2.17

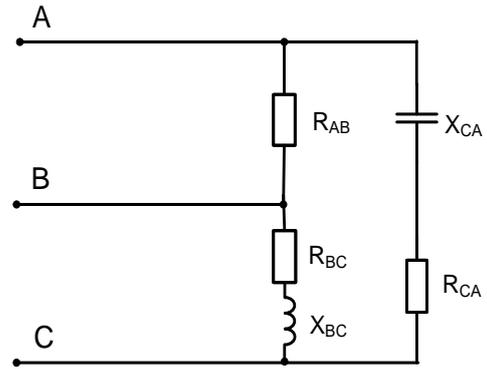


Рис. 2.18

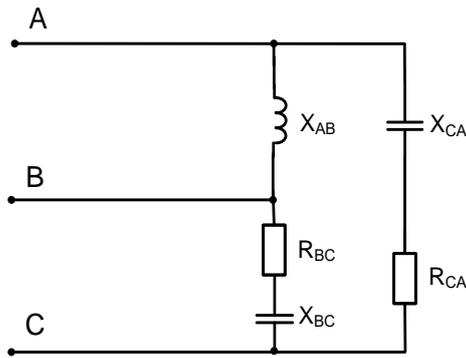


Рис. 2.19

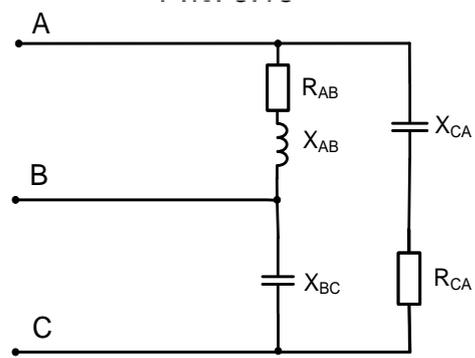


Рис. 2.20

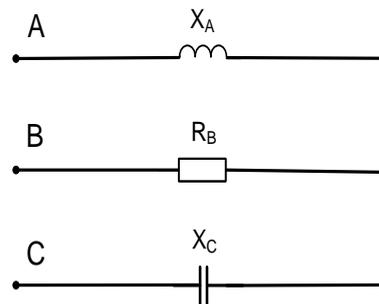


Рис. 2.21

Таблица 2.1

Данные к задаче №2

Вариант	Рисунок	$U_{л},$ В	$R_A,$ Ом	$R_B,$ Ом	$R_C,$ Ом	$X_A,$ Ом	$X_B,$ Ом	$X_C,$ Ом	$R_{AB},$ Ом	$R_{BC},$ Ом	$R_{CA},$ Ом	$X_{AB},$ Ом	$X_{BC},$ Ом	$X_{CA},$ Ом
0	2.5	127	8	8	8	6	6	6	—	—	—	—	—	—
1	2.5	220	8	8	8	6	6	6	—	—	—	—	—	—
2	2.5	380	8	8	8	6	6	6	—	—	—	—	—	—
3	2.6	127	8	4	6	4	3	8	—	—	—	—	—	—
4	2.6	220	8	4	6	4	3	8	—	—	—	—	—	—
5	2.6	380	8	4	6	4	3	8	—	—	—	—	—	—
6	2.7	127	4	8	6	3	4	8	—	—	—	—	—	—
7	2.7	220	4	8	6	3	4	9	—	—	—	—	—	—
8	2.7	380	4	3	6	8	4	8	—	—	—	—	—	—
9	2.8	127	16,8	8	8	14,2	6	4	—	—	—	—	—	—
10	2.8	220	16,8	8	8	14,2	6	4	—	—	—	—	—	—
11	2.8	380	16,8	8	8	14,2	6	4	—	—	—	—	—	—
12	2.9	127	10	—	—	—	10	10	—	—	—	—	—	—
13	2.9	220	10	—	—	—	10	10	—	—	—	—	—	—
14	2.9	380	10	—	—	—	10	10	—	—	—	—	—	—
15	2.10	127	—	—	—	—	—	—	8	8	8	6	6	6
16	2.10	220	—	—	—	—	—	—	8	8	8	6	6	6
17	2.10	380	—	—	—	—	—	—	8	8	8	6	6	6
18	2.11	127	—	—	—	—	—	—	8	4	6	4	3	8
19	2.11	220	—	—	—	—	—	—	8	4	6	4	3	8

20	2.11	380	–	–	–	–	–	–	8	4	6	4	3	8
21	2.12	127	–	–	–	–	–	–	4	8	6	3	4	8
22	2.12	220	–	–	–	–	–	–	4	8	6	3	4	8
23	2.12	380	–	–	–	–	–	–	4	8	6	3	4	8
24	2.13	127	–	–	–	–	–	–	16,8	8	3	14,2	6	4
25	2.13	220	–	–	–	–	–	–	16,8	8	3	14,2	6	4
26	2.13	380	–	–	–	–	–	–	16,8	8	3	14,2	6	4
27	2.14	127	–	–	–	–	–	–	10	–	–	–	10	10
28	2.14	220	–	–	–	–	–	–	10	–	–	–	10	10
29	2.14	380	–	–	–	–	–	–	10	–	–	–	10	10
30	2.15	127	10	–	–	–	10	10	–	–	–	–	–	–
31	2.15	220	10	–	–	–	10	10	–	–	–	–	–	–
32	2.15	380	10	–	–	–	10	10	–	–	–	–	–	–
33	2.16	127	15	–	–	–	15	15	–	–	–	–	–	–
34	2.16	220	15	–	–	–	15	15	–	–	–	–	–	–
35	2.16	380	15	–	–	–	15	15	–	–	–	–	–	–
36	2.17	127	–	–	–	–	–	–	–	3	8	4	6	8
37	2.17	220	–	–	–	–	–	–	–	3	8	4	6	8
38	2.17	380	–	–	–	–	–	–	–	3	8	4	6	8
39	2.18	127	–	–	–	–	–	–	8	4	8	–	6	10
40	2.18	220	–	–	–	–	–	–	8	4	8	–	6	10
41	2.18	380	–	–	–	–	–	–	8	4	8	–	6	10
42	2.19	127	–	–	–	–	–	–	–	5	6	5	8	4

Окончание табл. 2.1

Вариант	Рисунок	$U_{л.}$ В	R_A Ом	R_B Ом	R_C Ом	X_A Ом	X_B Ом	X_C Ом	R_{AB} Ом	R_{BC} Ом	R_{CA} Ом	X_{AB} Ом	X_{BC} Ом	X_{CA} Ом
43	2.19	220	–	–	–	–	–	–	–	5	6	5	8	4
44	2.19	380	–	–	–	–	–	–	–	5	6	5	3	4
45	2.20	127	–	–	–	–	–	–	5	–	6	10	8	4
46	2.20	220	–	–	–	–	–	–	5	–	6	10	8	4
47	2.20	380	–	–	–	–	–	–	5	–	6	10	8	4
48	2.21	127	–	5	–	5	–	5	–	–	–	–	–	–
49	2.21	220	–	5	–	5	–	5	–	–	–	–	–	–
50	2.21	380	–	5	–	5	–	5	–	–	–	–	–	–

3. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Данную тему целесообразно начинать с изучения электрической цепи однофазного тока, содержащей катушку со стальным сердечником, а затем переходить непосредственно к изучению трансформатора.

Рассматривая физические процессы, возникающие в трансформаторе, необходимо обратить особое внимание на то положение, что при изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне (от холостого хода до номинального режима) магнитный поток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Это в свою очередь определяет

постоянство потерь в стали, которые легко определяются из режима холостого хода.

При рассмотрении режима опытного короткого замыкания получается, что магнитный поток в сердечнике трансформатора настолько мал, что им можно пренебречь, следовательно, в этом режиме потери в стали трансформатора практически равны нулю, а потери в меди (в обмотках трансформатора) равны потерям при номинальной нагрузке трансформатора. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и опытного короткого замыкания, позволяют определить основные параметры трансформатора.

В паспорте трехфазных силовых трансформаторов указывается номинальная мощность, напряжения, токи, КПД, коэффициент мощности, группа соединения обмоток. Под номинальными напряжениями понимают линейные напряжения на зажимах трансформатора, а под номинальными токами – линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

После изучения настоящего раздела магистранты должны:

1. Знать основные элементы конструкции трансформатора; выражение для коэффициента трансформации; уравнения электрического и магнитного состояния обмоток.

2. Понимать назначение опытов холостого хода и короткого замыкания; сущность «приведения» параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной; различие опыта короткого замыкания и режима короткого замыкания трансформатора; причины изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора; принципы построения векторных диаграмм для различных нагрузок.

3. Уметь анализировать различные режимы работы трансформатора; читать паспорт трансформатора; включать приемники и электроизмерительные приборы для определения напряжений, токов и мощностей; предвидеть последствия коммутационных изменений в цепи нагрузки на электрическое состояние трансформатора.

Теория трансформатора полностью распространяется на автотрансформаторы и измерительные трансформаторы, поэтому при их изучении следует обратить внимание на область их применения и особенности работы.

Расчетная часть

Рассмотрим типовой расчет основных характеристик трехфазных силовых трансформаторов, которые устанавливаются на трансформаторных подстанциях для электроснабжения промышленных объектов, жилых домов и т. д.

Задача. Трехфазный трансформатор имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $S_n = 100$ кВ·А; соединение обмоток Y/Y₀-0; номинальное напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора $U_{1н}$

$= 6\ 000\ \text{В}$; напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{20} = 400\ \text{В}$; напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5\ \%$; мощность короткого замыкания $P_k = 2\ 400\ \text{Вт}$; мощность холостого хода $P_0 = 600\ \text{Вт}$; ток холостого хода $I_{10} = 0,07\ I_{1н}$.

Требуется определить: сопротивления обмоток трансформатора R_1, X_1, R_2, X_2 ; параметры схемы замещения z_0, r_0, x_0 ; угол магнитных потерь δ . Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ и зависимость $\eta = f(\beta)$ при $\cos \varphi_2 = 0,75$. Построить векторную диаграмму при нагрузке $\beta = 0,8$ и $\cos \varphi = 0,75$. Составить Т-образную схему замещения трансформатора.

Решение. Определяем номинальный ток первичной обмотки:

$$I_{1н} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = \frac{100 \cdot 1\ 000}{\sqrt{3} \cdot 6\ 000} = 9,6\ \text{А}.$$

Определяем ток холостого хода I_{10} и $\cos \varphi_0$:

$$I_{10} = 0,07 \cdot 9,6 = 0,67;$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1н} \cdot I_{10}} = \frac{600}{\sqrt{3} \cdot 6\ 000 \cdot 0,67} = 0,086; \quad \varphi_0 = 85^\circ.$$

Определяем угол магнитных потерь:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ.$$

Определяем сопротивления обмоток при коротком замыкании:

$$z_k = \frac{U_{к.ф}}{I_{к.ф}} = \frac{0,055 \cdot 6\ 000}{\sqrt{3} \cdot 9,6} = 19,9\ \text{Ом};$$

$$r_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1н}^2} = \frac{2\ 400}{3 \cdot 9,6^2} = 8,7\ \text{Ом};$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{19,9^2 - 8,7^2} = 17,9\ \text{Ом}.$$

Сопротивления первичной обмотки:

$$R_1 = R_2 = \frac{r_k}{2} = \frac{8,7}{2} = 4,35\ \text{Ом};$$

$$X_1 = X_2 = \frac{x_k}{2} = \frac{17,9}{2} = 8,95\ \text{Ом}.$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$K = \frac{U_{1н}}{U_{20}} = \frac{6\ 000}{400} = 15.$$

Сопротивления вторичной обмотки:

$$R_2 = \frac{R_2'}{K^2} = \frac{4,35}{15^2} = 0,0193\ \text{Ом};$$

$$X_2 = \frac{X_2'}{K^2} = \frac{8,95}{15^2} = 0,0398\ \text{Ом}.$$

Определяем параметры схемы замещения:

$$z_0 = \frac{U_{1н.ф}}{U_{10.ф}} = \frac{6\,000}{\sqrt{3} \cdot 0,67} = 5\,180 \text{ Ом};$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_{10}^2} = \frac{600}{3 \cdot 0,67^2} = 447 \text{ Ом};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{5\,180^2 - 447^2} = 5\,160 \text{ Ом}.$$

Для построения внешней характеристики $U_2 = f(\beta)$ (рис. 3.1) определяем потерю напряжения во вторичной обмотке трансформатора:

$$\Delta U_2 \% = \beta (u_{ка} \% \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр} \% \cdot \sin \varphi_2),$$

где $u_{ка} \%$ и $u_{кр} \%$ соответственно активная и реактивная составляющие напряжения u_k :

$$u_{ка} \% = u_k \% \cdot \cos \varphi_k; \quad \cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k}; \quad u_{ка} \% = 5,5 \frac{8,7}{19,9} = 2,4 \%;$$

$$u_{кр} \% = \sqrt{(u_k \%)^2 - (u_{ка} \%)^2} = \sqrt{5,5^2 - 2,4^2} = 4,95 \%.$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора определяем по формуле

$$U_2 = \frac{U_{20}}{100} (100 - \Delta U_2 \%),$$

задаваясь значениями β , результаты расчетов сводим в табл. 3.1.

Для построения зависимости $\eta = f(\beta)$ (см. рис. 3.1) расчет коэффициента полезного действия производится по формуле

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_k}.$$

Таблица 3.1

Результаты расчетов

№ п/п	β	$\Delta U_2, \%$	$U_2, \text{В}$	η
1	0	0	400,00	0
2	0,1	0,507	397,97	0,924
3	0,2	1,014	395,94	0,956
4	0,3	1,521	393,92	0,965
5	0,4	2,028	391,89	0,967
6	0,5	2,535	389,86	0,969
7	0,6	3,042	387,83	0,967
8	0,7	3,549	385,80	0,966
9	0,8	4,056	383,78	0,964
10	0,9	4,563	381,75	0,963
11	1,0	5,070	379,72	0,962

Максимальный КПД получается при нагрузке

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}} = \sqrt{\frac{600}{2400}} = 0,5; \quad \eta_{max} = 0,969.$$

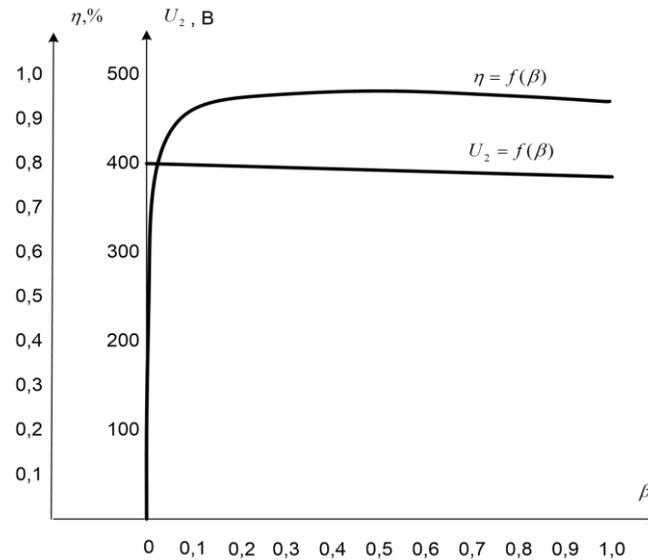


Рис. 3.1. График изменения вторичного напряжения и КПД трансформатора от нагрузки

Построение векторной диаграммы (рис. 3.2) начинаем с вектора фазного напряжения $\dot{U}'_{2\phi}$, величина которого для $\beta = 0,8$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$ равна $U'_{2\phi} = \frac{383,78}{\sqrt{3}} = 222$ В. Приведенное значение вторичного напряжения $U'_{2\phi} = U_{2\phi} \cdot K = 222 \cdot 15 = 3330$ В.

Вектор тока I'_2 отстает по фазе от вектора $\dot{U}'_{2\phi}$ на заданный угол φ_2 и равен

$$I'_2 = \frac{I_2}{K} = \frac{115,6}{15} = 7,72 \text{ А},$$

где

$$I_2 = \beta \cdot I_{2H} = \beta \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}} = 0,8 \frac{100 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 115,6 \text{ А}.$$

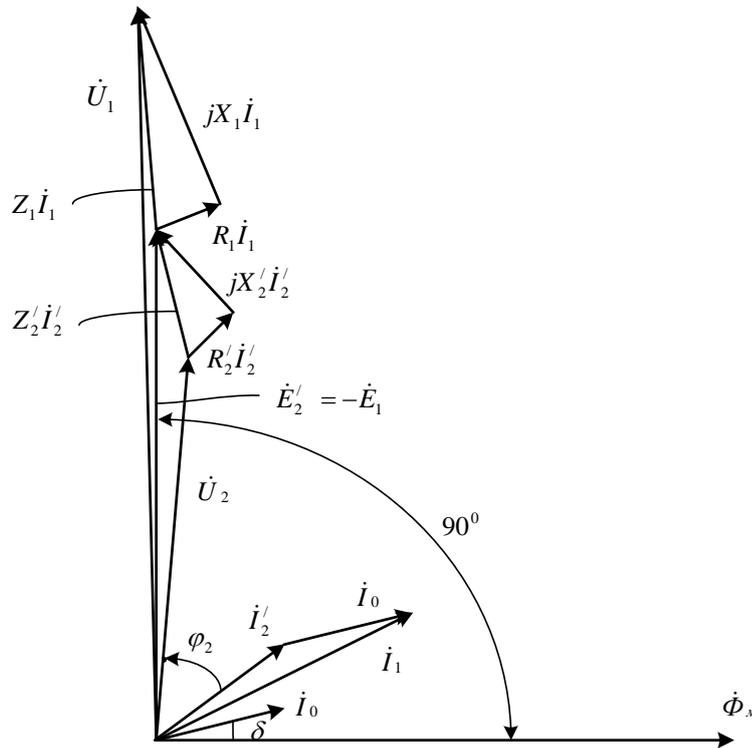


Рис. 3.2. Векторная диаграмма трансформатора

Падения напряжения во вторичной обмотке представлены следующими выражениями:

$$R'_2 I'_2 = 4,35 \cdot 7,72 = 33,6 \text{ В};$$

$$X'_2 I'_2 = 8,95 \cdot 7,72 = 68,3 \text{ В}.$$

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

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + R'_2 \dot{I}'_2 + jX'_2 \dot{I}'_2.$$

Вектор потока $\dot{\Phi}_m$ отстает от вектора \dot{E}'_2 на 90° , а ток холостого хода \dot{I}_{10} опережает поток $\dot{\Phi}_m$ на угол потерь δ . Ток в первичной обмотке трансформатора \dot{I}_1 получаем из уравнения $\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2$, где $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2/K$. Вектор $R'_2 \dot{I}'_2$ совпадает по фазе с вектором \dot{I}'_2 . Напряжение первичной обмотки трансформатора \dot{U}_1 определяем из уравнения электрического состояния первичной цепи:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + jX_1 \dot{I}_1.$$

Вектор $R_1 \dot{I}_1$ параллелен вектору \dot{I}_1 . Током холостого хода \dot{I}_{10} можно пренебречь и принять $\dot{I}_1 = \dot{I}'_2$ или определить \dot{I}_1 по диаграмме. Тогда падения напряжений в первичной обмотке:

$$R_1 I_1 = 4,35 \cdot 7,76 = 33,8 \text{ В};$$

$$X_1 I_1 = 8,95 \cdot 7,76 = 69,4 \text{ В}.$$

T-образная схема замещения трансформатора изображена на рис. 3.3.

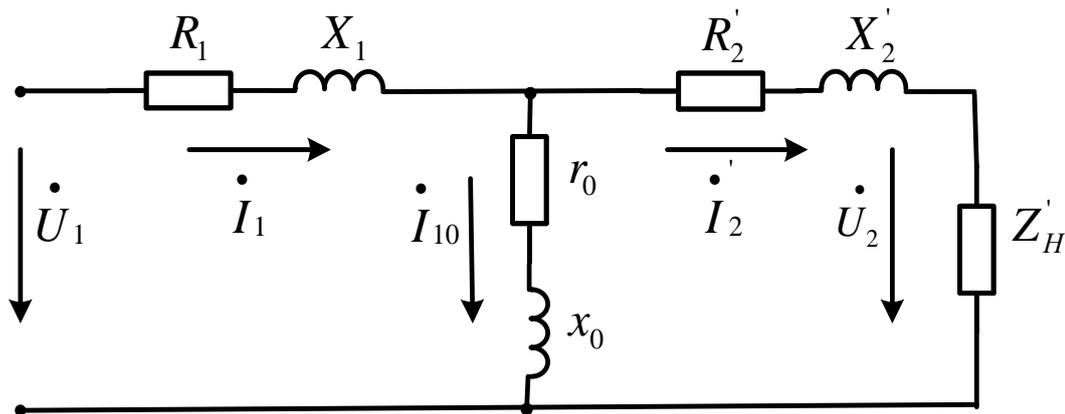


Рис. 3.3. Т-образная схема замещения трансформатора

Задача № 3 для контрольной работы

Для трехфазного трансформатора, параметры которого приведены в табл. 3.2, определить коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0$, коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ при нагрузках $\beta = 0,7$ и $\varphi_2 = 1$, $\beta = 0,7$ и $\cos \varphi_2 = 0,75$, сопротивления первичной и вторичной обмоток R_1, X_1, R_2, X_2 , расчетные сопротивления Z_0, R_1, X_1 , угол магнитных потерь δ . Построить внешнюю характеристику $U_2 = f(\beta)$ и зависимость КПД от нагрузки $\eta = f(\beta)$ для $\cos \varphi_2 = 0,75$. Начертить Т-образную схему замещения трансформатора.

Вариант	Группа соединений обмоток	Номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, кВА	Номинальное напряжение		Напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}}$, %	Мощность короткого замыкания $P_{\text{к}}$, Вт	Мощность холостого хода P_0 , Вт	Ток холостого хода I_0 , %
			$U_{1\text{ном}}$, В	$U_{2\text{ном}}$, В				
1	2	3	4	5	6	7	8	9

0	Y/Y_0-0	10	6300	400	5,0	335	105	10,0
1	$Y/\Delta-11$	20	6300	230	5,0	600	180	9,0
2	Y/Y_0-0	30	10000	400	5,0	850	300	9,0
3	Y/Y_0-0	50	10000	400	5,0	1325	440	8,0
4	Y/Y_0-0	75	10000	230	5,0	1875	590	7,5
5	Y/Y_0-0	100	10000	525	5,0	2400	730	7,5
6	$Y/\Delta-11$	180	10000	525	5,0	4100	1200	7,0
7	Y/Y_0-0	240	10000	525	5,0	5100	1600	7,0
8	$Y/\Delta-11$	320	35000	10500	6,5	6200	2300	7,5
9	Y/Y_0-0	420	10000	525	5,5	7000	2100	6,5
10	Y/Y_0-0	25	6000	230	4,5	600	125	3,0
11	Y/Y_0-0	25	10000	230	4,7	690	125	3,0
12	$Y/\Delta-11$	25	6000	400	4,5	600	125	3,0
13	$Y/\Delta-11$	25	10000	400	4,7	690	125	3,0
14	Y/Y_0-0	40	10000	230	4,5	880	180	3,0
15	Y/Y_0-0	40	6000	230	4,5	880	180	3,0
16	Y/Y_0-0	40	6000	400	4,7	1000	180	3,0
17	$Y/\Delta-11$	40	10000	400	4,0	690	125	3,2
18	$Y/\Delta-11$	63	6000	230	4,5	1280	260	2,8
19	$Y/\Delta-11$	63	6000	400	4,5	1280	260	2,8
20	$Y/\Delta-11$	63	10000	230	4,7	1470	260	2,8
21	Y/Y_0-0	63	10000	400	4,7	1470	260	2,8
22	Y/Y_0-0	63	2000	400	4,7	1470	260	2,8
23	Y/Y_0-0	63	20000	230	4,7	1470	260	2,8
24	Y/Y_0-0	63	2000	400	4,5	1280	260	2,8
25	$Y/\Delta-11$	100	10000	230	4,7	2270	365	2,6
26	$Y/\Delta-11$	100	10000	400	4,7	2270	365	2,6
27	$Y/\Delta-11$	100	6000	230	4,5	1970	365	2,6
28	Y/Y_0-0	100	6000	400	4,5	1970	365	2,6
29	$Y/\Delta-11$	100	20000	230	4,7	2270	465	2,6
30	Y/Y_0-0	100	20000	400	4,7	2270	465	2,6
31	$Y/\Delta-11$	100	35000	230	4,7	2270	465	2,6
32	Y/Y_0-0	100	35000	400	4,7	2270	465	2,6
33	$Y/\Delta-11$	160	6000	230	4,5	2650	540	2,4
34	$Y/\Delta-11$	160	6000	400	4,5	2650	540	2,4
35	Y/Y_0-0	160	10000	230	4,5	3100	540	2,4
36	Y/Y_0-0	160	10000	400	4,5	3100	540	2,4
37	$Y/\Delta-11$	160	6000	690	4,5	2650	540	2,4
38	$Y/\Delta-11$	250	6000	230	4,5	3700	780	2,3

Таблица 3.2

Данные к задаче № 3

Вариант	Группа соединений	Номинальная мощность	Номинальное напряжение	Напряжение короткого	Мощность короткого	Мощность холостого	Ток холостого хода
---------	-------------------	----------------------	------------------------	----------------------	--------------------	--------------------	--------------------

			$U_{1ном},$ В	$U_{2ном},$ В				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
39	$Y/\Delta-11$	250	6000	400	4,5	6700	780	2,3
40	Y/Y_0-0	250	10000	230	4,7	4200	780	2,3
41	Y/Y_0-0	250	10000	690	4,7	4200	780	2,3
42	Y/Y_0-0	400	3000	400	4,5	5500	1080	3,2
43	Y/Y_0-0	400	6000	400	4,5	5500	1080	3,2
44	Y/Y_0-0	400	6000	690	4,5	5500	1080	3,2
45	Y/Y_0-0	400	6300	400	4,5	5500	1080	3,2
46	Y/Y_0-0	400	10000	230	4,5	5500	1080	3,2
47	Y/Y_0-0	400	10000	400	4,5	5500	1080	3,2
48	Y/Y_0-0	400	10000	690	4,5	5500	1080	3,2
49	Y/Y_0-0	63	3000	400	5,0	7600	1680	3,2
50	Y/Y_0-0	63	6000	400	5,0	7600	1680	3,2

Окончание табл. 3.2

4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Изучение электрических машин постоянного тока нужно начинать с их принципа работы и устройства (прил. 2). Учитывая, что машина постоянного тока обратима, т. е. может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, изучение таких вопросов, как реакция якоря, электромагнитный момент, возбуждение и ряд других, необходимо рассматривать в сопоставлении для обоих режимов. Очень важно правильно понимать связь между напряжением на зажимах машины U , ЭДС E и падением напряжения $R_{я}I_{я}$ в обмотке якоря для генераторного и двигательного режимов:

$$E = U + R_{я}I_{я};$$

$$U = E + R_{я}I_{я}.$$

Изучая работу машин постоянного тока в режиме двигателя, необходимо обратить особое внимание на пуск, регулирование частоты вращения вала и вращающий момент двигателя, а в режиме генератора – на способ возбуждения. Характеристики двигателей и генераторов дают наглядное представление об эксплуатационных свойствах машин.

После изучения данного раздела магистранты должны:

1. Знать конструктивные основные элементы машин постоянного тока: статор, обмотка статора, якорь, обмотка якоря; термины: щеточно-коллекторный узел, геометрическая и физическая нейтраль, реакция якоря, коммутация, противо-ЭДС; классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения; внешние характеристики генераторов постоянного тока всех способов возбуждения; механические характеристики двигателей постоянного тока всех способов возбуждения; способы пуска двигателей постоянного тока; способы регулирования частоты вращения вала двигателей постоянного тока.

2. Понимать назначение конструктивных основных элементов машин постоянного тока; принцип действия генератора и двигателя постоянного тока; уравнения электрического состояния генератора и двигателя постоянного тока; назначение пусковых и регулировочных реостатов; энергетические диаграммы генератора и двигателя постоянного тока.

3. Уметь включать в сеть, регулировать частоту вращения и реверсировать двигатель постоянного тока; отличать по внешнему виду машину постоянного тока от других электрических машин; ориентироваться в паспортных данных машины, выбирать двигатель применительно к заданным техническим условиям.

Расчетная часть

Рассмотрим примеры расчета машины постоянного тока.

Задача 1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 4.1) используется для привода центробежного насоса. Мощность на валу $P_{2н} = 10$ кВт при напряжении $U_H = 220$ В, частота вращения вала $n_H = 2\,250$ мин⁻¹. Потери мощности в цепи возбуждения $\Delta P_B = 5\%$ $P_{1н}$, в цепи якоря – $\Delta P_я = 4,6\%$ $P_{1н}$, коэффициент полезного действия двигателя $\eta = 86\%$.

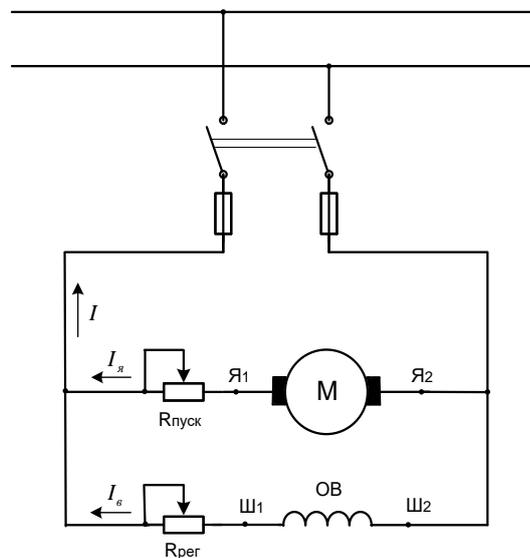


Рис. 4.1. Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Требуется определить: величину сопротивления пускового реостата $R_{пуск}$ для пуска двигателя с отношением $\frac{I_{яп}}{I_{ян}} = 2$; величину номинального вращающего момента M_H ; величину пускового вращающего момента $M_п$, полагая, что магнитный поток $\Phi = \text{const}$.

Решение. Определяем мощность, потребляемую двигателем из сети:

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta} = \frac{10}{0,86} = 11,63 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{н} = \frac{P_{1н}}{U_{н}} = \frac{11\,630}{220} = 53 \text{ А.}$$

Ток возбуждения

$$I_{в} = \frac{\Delta P_{в} \%}{100 \cdot U_{н}} = \frac{5 \cdot 11\,630}{100 \cdot 200} = 2,64 \text{ А.}$$

Номинальный ток якоря

$$I_{ян} = I_{н} - I_{в} = 53 - 2,64 = 50,36 \text{ А.}$$

Сопротивление обмотки якоря

$$R_{я} = \frac{\Delta P_{я} \% \cdot P_{1н}}{I_{ян}^2} = \frac{4,6 \cdot 11\,630}{100 \cdot 50,36^2} = 0,212 \text{ Ом.}$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{пуск} = \frac{U_{н}}{2I_{ян}} - R_{я} = \frac{220}{2 \cdot 50,36} = 1,97 \text{ Ом.}$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{н} = 9\,550 \frac{P_{2н}}{n_{н}} = 9\,550 \frac{10}{2\,250} = 42,44 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Определяем пусковой вращающий момент. Из теории известно, что вращающий момент пропорционален магнитному потоку и току якоря

$$M = C_{м} \cdot \Phi \cdot I_{я}.$$

Так как по условию задачи магнитный поток Φ не изменяется, то пусковой момент пропорционален току якоря. Пусковой ток согласно условию задачи в два раза больше номинального, следовательно, и пусковой момент будет в два раза превышать номинальный:

$$M_{п} = M_{н} \frac{I_{яп}}{I_{ян}} = 42,44 \cdot 2 = 84,88 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задача 2. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 4.1) присоединенный к сети напряжением $U_{н} = 220 \text{ В}$, потребляет при номинальной нагрузке ток $I_{н} = 20,5 \text{ А}$, а при холостом ходе – $I_0 = 2,35 \text{ А}$.

Сопротивление обмотки якоря $R_{я} = 0,75 \text{ Ом}$, цепи обмотки возбуждения $R_{в} = 258 \text{ Ом}$. Номинальная частота вращения вала $n_{н} = 1\,025 \text{ мин}^{-1}$.

Определить номинальную мощность двигателя на валу $P_{2н}$, номинальный КПД $\eta_{н}$, номинальный вращающий момент $M_{н}$, пусковой ток $I_{п}$ при пуске двигателя без пускового реостата, сопротивление пускового реостата $R_{р}$ для условия $I_{п}$

$= 2,5 I_H$ и пусковой момент M_n при пуске двигателя с реостатом. При решении задачи принять, что магнитные и механические потери не зависят от нагрузки.

Решение. Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{2H} = P_{1H} - \sum \Delta P_H,$$

где P_{1H} – потребляемая номинальная мощность из сети:

$$P_{1H} = U_H I_H = 220 \cdot 20,5 = 4\,510 \text{ Вт} = 4,51 \text{ кВт};$$

$\sum \Delta P_H$ – потери в двигателе при номинальной нагрузке.

Для определения потерь в цепи возбуждения ΔP_B и в цепи якоря $\Delta P_{я}$ нужно знать ток в цепи возбуждения I_B и в цепи якоря $I_{я}$:

$$I_B = \frac{U_H}{R_B} = \frac{220}{258} = 0,85 \text{ А};$$

$$I_{яH} = I_H - I_B = 20,5 - 0,85 = 19,65 \text{ А}.$$

Потери в цепи возбуждения и в цепи якоря:

$$\Delta P_B = I_B^2 \cdot R_B = 0,85^2 \cdot 258 = 186 \text{ Вт};$$

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

Магнитные и механические потери:

$$\Delta P_M = P_0 - \Delta P_{я0} - \Delta P_B = 517 - 1,7 - 186 = 329,3 \text{ Вт},$$

где $P_0 = U_H \cdot I_0 = 220 \cdot 2,35 = 517 \text{ Вт}$ – мощность, потребляемая двигателем на холостом ходу; $\Delta P_{я0} = R_{я} (I_0 - I_B)^2 = 0,75 (2,35 - 0,85)^2 = 1,7 \text{ Вт}$ – мощность, потребляемая обмоткой якоря на холостом ходу.

Потери в двигателе при номинальном режиме

$$\sum \Delta P_H = \Delta P_{яH} + \Delta P_B + \Delta P_M = 290 + 186 + 329,3 = 805,3 \text{ Вт}.$$

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{2H} = P_{1H} - \sum \Delta P_H = 4\,510 - 805,3 = 3\,704,7 \text{ Вт} = 3,71 \text{ кВт}.$$

Номинальный КПД

$$\eta = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} 100 \% = \frac{3,71}{4,51} 100 \% = 82,2 \%.$$

Номинальный вращающий момент

$$M_H = 9\,550 \frac{P_{2H}}{n_H} = 9\,550 \frac{3,71}{1\,025} = 34,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой ток двигателя при пуске без реостата

$$I_n = \frac{U_H}{R_{я}} = \frac{220}{0,75} = 293 \text{ А},$$

т. е. пусковой ток превышает номинальный $\frac{293}{20,5} = 14,29$, что опасно для двигателя.

Сопротивление пускового реостата определяем из равенства

$$I_{\text{п}} = 2,5 \cdot I_{\text{ян}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{р}}},$$

откуда

$$R_{\text{р}} = \frac{U_{\text{н}}}{2,5 \cdot I_{\text{ян}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2,5 \cdot 19,65} - 0,75 = 3,73 \text{ Ом.}$$

Определяем пусковой момент двигателя при пуске с реостатом. Известно, что вращающий момент двигателя определяется уравнением

$$M = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}.$$

Для режима номинальной нагрузки

$$M_{\text{н}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{ян}},$$

а для пускового режима

$$M_{\text{п}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{п}}.$$

Полагая магнитный поток в двигателе постоянным, возьмем отношение моментов $M_{\text{н}} / M_{\text{п}} = I_{\text{ян}} / I_{\text{п}}$, откуда

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ян}}} = 34,6 \frac{2,5 \cdot 19,65}{19,65} = 86,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задача № 4 для контрольной работы

Варианты 0–25

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого U_H , при номинальной нагрузке потребляет ток I_H , а при холостом ходе – I_0 . Номинальная частота вращения n_H , сопротивление обмотки якоря $R_{я}$, сопротивление цепи возбуждения R_B (табл. 4.1). Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя. Определить: номинальную мощность на валу двигателя P_{2H} ; номинальный вращающий момент M_H ; номинальный КПД η_H .

Таблица 4.1

Данные к задаче № 4
 (варианты 0–25)

Вариант	U_H , В	I_H , А	I_0 , А	$R_{я}$, Ом	R_B , Ом	n_H , мин ⁻¹
0	220	15	1,6	1,2	180	1025
1	220	53	5,3	0,212	33	1225
2	115	100	9,5	0,11	50	1000
3	110	267	5	0,04	27,5	1100
4	220	16,3	1,78	1,16	75	1025
5	110	7,8	0,7	0,8	210	1240
6	220	19,8	2,0	1,5	150	960
7	110	35	3,2	0,6	60	1400
8	220	32	2,8	0,94	120	1600
9	220	34	3,0	0,45	110	1100
10	110	9,5	0,9	1,9	200	850
11	110	20	1,8	0,7	80	940
12	220	15	1,5	0,82	200	1350
13	110	8,2	0,8	1,4	220	1450
14	220	20,5	2,35	0,74	258	1025
15	220	40	4,2	0,52	190	1420
16	110	10,5	1,2	1,2	160	960
17	110	18,6	2,0	0,9	120	825
18	220	16	1,8	0,6	270	1600
19	220	32	3,5	0,62	200	1350
20	110	28	3,2	0,55	80	875
21	110	25	2,6	0,58	90	1110
22	220	60	6,8	0,40	130	935
23	220	50	5,7	0,40	150	1340
24	220	102	9,5	0,12	110	750
25	220	151	15	0,07	75	1000

Варианты 26–50

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого U_H , развивает номинальную мощность на валу P_{2H} . Номинальная частота вращения якоря n_H и номинальный КПД η_H . Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_{\text{я}}$ и в цепи возбуждения $\Delta P_{\text{в}}$ заданы в процентах от потребляемой мощности двигателя U_H (табл. 4.2). Определить: ток в цепи возбуждения, ток якоря при номинальной нагрузке $I_{\text{яH}}$, номинальный вращающий момент при пуске двигателя с пусковым реостатом.

Таблица 4.2

 Данные к задаче № 4
 (варианты 26–50)

Вариант	U_H , В	P_{2H} , кВт	$\Delta P_{\text{я}}$, %	$\Delta P_{\text{в}}$, %	n_H , мин ⁻¹	η_H , %
26	110	60	5,2	4,8	980	86,5
27	220	10	5,0	4,8	2250	86,0
28	220	4,0	6,2	4,2	1025	82,2
29	220	6,6	6,2	4,1	2400	85,5
30	220	4,4	6,5	4,8	2100	84,5
31	220	2,5	5,8	4,8	1000	85,0
32	220	10,0	5,3	4,4	2250	83,0
33	110	77	5,0	4,2	1050	85,5
34	110	80	5,4	4,5	1150	85,8
35	110	92	5,3	4,1	970	86,5
36	110	66	6,2	5,0	1050	85,5
37	110	35	6,3	5,2	2200	84,5
38	110	45	5,7	4,6	1500	85,0
39	220	15	5,0	4,0	1000	84,5
40	220	10	5,2	4,2	970	85,5
41	220	5,8	6,0	5,0	2200	84,0
42	220	19	4,8	4,5	980	86,5
43	220	29	5,0	4,3	2520	86,0
44	220	46,5	5,4	4,8	1025	82,2
45	220	14,0	4,0	4,6	2400	84,0
46	220	20,5	5,1	4,2	2100	85,5
47	220	33,5	5,5	4,0	1000	84,5
48	220	8,5	4,0	4,1	2250	85,5
49	220	13,5	4,8	4,2	1050	85,0
50	110	60	5,0	4,0	1150	84,5

5. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Изучение асинхронных машин начинают с их устройства и принципа работы (прил. 3). Необходимо обратить особое внимание на электромагнитные процессы, возникающие в двигателе, как при его пуске, так и в процессе работы. Векторная диаграмма и эквивалентная схема асинхронного двигателя облегчает изучение его работы и используется при выводе основных уравнений. Эксплуатационные параметры асинхронного двигателя наглядно демонстрируются при помощи механических и рабочих характеристик.

После изучения настоящего раздела магистранты должны:

1. Знать содержание терминов: скольжение, синхронная скорость, вращающееся магнитное поле, короткозамкнутый ротор, контактные кольца, поток полюса, глубокопазный ротор, двойная «беличья клетка»; способы изменения направления вращения магнитного поля; устройство и области применения двух типов трехфазных асинхронных двигателей, их условные обозначения на схемах; вид механических характеристик; способы регулирования частоты вращения вала.

2. Понимать принцип возбуждения многополюсного вращающегося магнитного поля; принцип действия трехфазной асинхронной машины в режимах двигателя, генератора и электромагнитного тормоза; факторы, влияющие на частоту вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя; возможность замены трехфазного асинхронного двигателя с вращающимся ротором эквивалентным асинхронным двигателем с неподвижным ротором; аналогию физических явлений в трехфазном асинхронном двигателе с неподвижным ротором и в трансформаторе с резистивной нагрузкой; энергетические преобразования в трехфазном асинхронном двигателе.

3. Уметь осуществлять пуск асинхронного двигателя; измерять скольжение с помощью стробоскопического устройства, частоту вращения вала; оценивать величины номинального, пускового и максимального моментов, пускового тока и номинального скольжения по данным каталога.

Расчетная часть

Рассмотрим примеры решения задач по асинхронным двигателям.

Задача 1. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, используемого в вентиляторной установке, $P_n = 10$ кВт, номинальное напряжение $U_n = 380$ В, номинальная частота вращения ротора $n_n = 1420$ мин⁻¹, номинальный КПД $\eta_n = 0,84$ и номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,85$. Кратность пускового тока $I_{ян}/I_n = 6,5$, а перегрузочная способность двигателя $\lambda = 1,8$. Требуется определить: потребляемую из сети мощность $P_{1н}$; номинальный M_n и максимальный (критический) M_m вращающие моменты; пусковой ток I_n ; номинальное n_n и критическое s_k скольжения.

Построить механические характеристики $M = f(s)$ и $n = f(M)$.

Решение. Потребляемая из сети мощность

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H} = \frac{10}{0,84} = 11,9 \text{ кВт.}$$

Номинальный и максимальный моменты

$$M_H = 9\,550 \frac{P_H}{n_H} = 9\,550 \frac{10}{1\,420} = 67,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_M = \lambda \cdot M_H = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальный и пусковой токи:

$$I_H = \frac{P_{1H}}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{11,9 \cdot 1\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ А};$$

$$I_{II} = 6,5 \cdot I_H = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А.}$$

Номинальное и критическое скольжения:

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1\,500 - 1\,420}{1\,500} = 0,053;$$

$$s_K = s_H \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,053 \cdot \left(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1} \right) = 0,175.$$

Механическая характеристика $M = f(s)$ строится по уравнению

$$M = \frac{2M_M}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} = \frac{2 \cdot 121}{\frac{0,175}{s} + \frac{s}{0,175}}.$$

Задаваясь значениями скольжения s от 0 до 1, рассчитываем вращающий момент. Для построения характеристики $n = f(M)$ используем уравнение $n = n_0 \cdot (1 - s)$. Результаты расчетов приведены в табл. 5.1, графики зависимостей представлены на рис. 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1

Результаты расчетов

№ п/п	s	n , мин ⁻¹	M , Н·м	№ п/п	s	n , мин ⁻¹	M , Н·м
1	0,053	1420	67,3	7	0,5	750	75,5
2	0,4	1350	104,3	8	0,6	600	65,2
3	0,175	1238	121,0	9	0,7	450	57,0
4	0,2	1200	120,5	10	0,8	300	50,5
5	0,3	1050	105,3	11	0,9	150	45,5
6	0,4	900	88,8	12	1,0	0	41,2

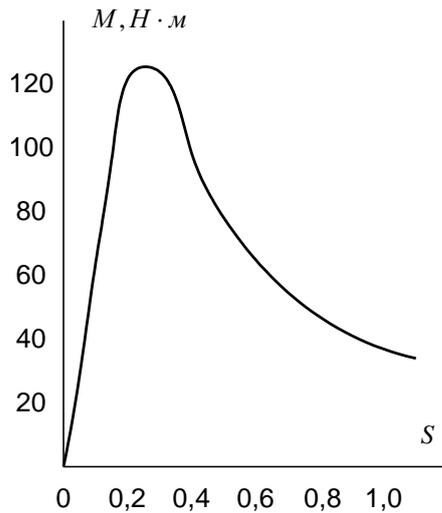


Рис. 5.1. Зависимость момента на валу двигателя от скольжения

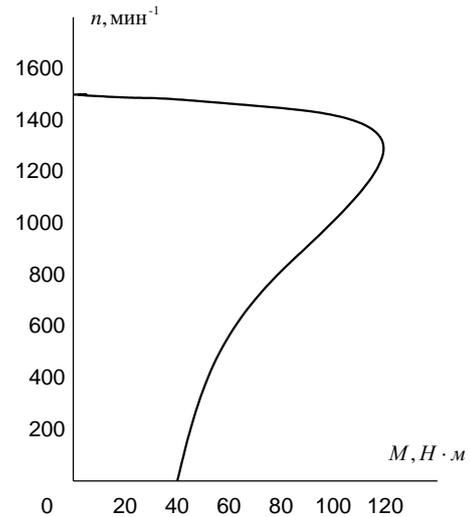


Рис. 5.2. Зависимость частоты вращения вала от момента на валу

Задача 2. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, сопротивления фаз обмоток которого $r_1 = 0,46$ Ом, $r_2 = 0,02$ Ом, $x_1 = 2,24$ Ом, $x_2 = 0,08$ Ом, соединен треугольником и работает при напряжении $U_H = 220$ В с частотой $f = 50$ Гц. Число витков на фазу обмоток $w_1 = 192$, $w_2 = 36$. Обмоточные коэффициенты $K_1 = 0,932$, $K_2 = 0,955$. Число пар полюсов $p = 3$. Определить: пусковые токи статора и ротора; пусковой вращающий момент; коэффициент мощности ($\cos \varphi_H$) при пуске двигателя с замкнутым накоротко ротором; токи ротора, статора и вращающий момент при работе двигателя со скольжением $s = 0,03$; критическое скольжение и критический (максимальный) момент; 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:

$$K = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot K_1}{m_2 \cdot w_2 \cdot K_2} = \frac{3 \cdot 192 \cdot 0,932}{3 \cdot 36 \cdot 0,955} = 5,2,$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; m_2 – число фаз обмотки ротора.

Приведенные значения сопротивлений роторной обмотки:

$$r_2' = r_2 \cdot K^2 = 0,02 \cdot 5,2^2 = 0,54 \text{ Ом};$$

$$x_2' = x_2 \cdot K^2 = 0,08 \cdot 5,2^2 = 2,16 \text{ Ом};$$

Сопротивления короткого замыкания:

$$r_K = r_1 + r_2' = 0,46 + 0,54 = 1,0 \text{ Ом};$$

$$x_K = x_1 + x_2' = 2,24 + 2,16 = 4,4 \text{ Ом};$$

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2} = \sqrt{1,0^2 + 4,4^2} = 4,51 \text{ Ом}.$$

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

$$I_{1\text{п}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{к}}} = \frac{220}{4,51} = 48,8 \text{ А};$$

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

$$M_{\text{п}} = \frac{m_2 \cdot r_2 \cdot I_{2\text{п}}^2}{\Omega_0} = \frac{3 \cdot 0,02 \cdot 254^2}{104,5} = 37 \text{ Н} \cdot \text{н},$$

где Ω_0 – угловая частота вращения магнитного поля:

$$\Omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{\Omega_0}; \quad n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}.$$

Определяем коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_{\text{п}} = \frac{r_{\text{к}}}{x_{\text{к}}} = \frac{1,0}{4,51} = 0,222.$$

Токи и вращающий момент при работе двигателя со скольжением $s = 0,03$:

$$z = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} = \sqrt{\left(0,46 + \frac{0,54}{0,03}\right)^2 + 4,4^2} = 18,9 \text{ Ом};$$

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

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

$$M = \frac{m_2 \cdot \frac{r_2'}{s} \cdot I_2^2}{\Omega_0} = \frac{3 \cdot \frac{0,02}{0,03} \cdot 60,3^2}{104,5} = 70 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение и критический (максимальный) момент:

$$s_{\text{к}} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_{\text{к}}^2}} = \frac{0,54}{\sqrt{0,46^2 + 4,4^2}} = 0,122;$$

$$M_{\text{м}} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot [r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_{\text{к}}^2}]} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,5 \cdot [0,46 + \sqrt{0,46^2 + 4,4^2}]} = 142,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

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

$$s_{\text{к}} = \frac{r_2' + r_p'}{x_{\text{к}}},$$

где r_p' – приведенное значение сопротивления пускового реостата:

$$r_p' = x_{\text{к}} - r_2' = 4,4 - 0,54 = 3,86 \text{ Ом};$$

$$r_p = \frac{r_p'}{K^2} = \frac{3,86}{5,2^2} = 0,143 \text{ Ом}.$$

Пусковые токи при пуске двигателя с реостатом:

$$z_{\text{п}} = \sqrt{(r_{\text{к}} + r_p')^2 + x_{\text{к}}^2} = \sqrt{(1 + 3,86)^2 + 4,4^2} = 6,55 \text{ Ом};$$

$$I_{1\text{п}} = \frac{U_{\phi}}{z_{\text{п}}} = \frac{220}{6,55} = 33,6 \text{ А};$$

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

Задача 3. Из каталога на асинхронные двигатели с фазным ротором известны номинальные величины: $P_H = 11$ кВт, $U_H = 380/220$ В, частота вращения ротора $n_H = 920$ мин⁻¹, $\eta_H = 81$ %, $\cos \varphi_H = 0,78$, схема соединения обмоток Y/Y. Перегрузочная способность двигателя $M_M/M_H = 3,4$, активное сопротивление фазы статора

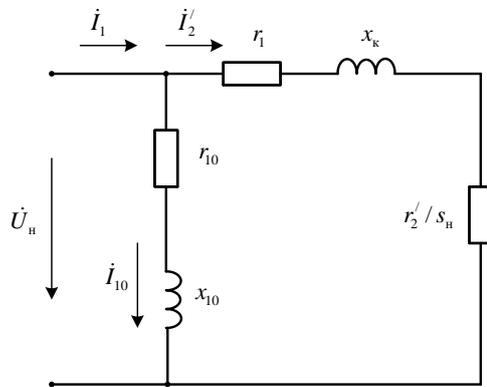


Рис. 5.3. Г-образная схема замещения трехфазного асинхронного двигателя

$r_1 = 0,422$ Ом. Определить: номинальный ток статора; номинальный и максимальный моменты; сопротивления r_2' и x_k в ветви приведенного тока I_2' в Г-образной схеме замещения (рис. 5.3); приведенный ток ротора I_2' ; ток в статоре в режиме холостого хода I_{10} и коэффициент мощности $\cos \varphi_{10}$; сопротивления r_{10} и x_{10} в Г-образной схеме замещения.

Решение. Находим номи-

нальный ток статора:

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{3 \cdot U_H \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{11 \cdot 1000}{3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,78} = 26,4 \text{ А.}$$

Для определения реактивного сопротивления воспользуемся формулой максимального электромагнитного момента:

$$M_M = \frac{1,46 \cdot U_H^2}{n_0 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \right)},$$

из которой следует, что

$$x_k = \sqrt{r_M^2 - r_1^2},$$

где r_M – расчетное сопротивление:

$$r_M = \frac{1,46 \cdot U_H^2}{M_M \cdot n_0} - r_1.$$

Приведенное активное сопротивление ротора r_2' найдем из формулы, выражающей зависимость номинального электромагнитного момента M_H от номинального скольжения s_H :

$$M_M = \frac{2,92 \cdot U_H^2 \cdot r_2}{n_0 \cdot s_H \cdot \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s_H} \right)^2 + x_k^2 \right]},$$

из которой следует, что

$$r_2' = s_H \left(r_H + \sqrt{r_H^2 - r_M^2} \right),$$

где r_H – расчетное сопротивление:

$$r_H = \frac{1,46 \cdot U_H^2}{M_H \cdot n_0} - r_1.$$

По каталогу номинальный момент

$$M_H = 9\,550 \frac{P_H}{n_H} = 9\,550 \frac{11}{920} = 114 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент

$$M_M = 3,4 \cdot M_H = 3,4 \cdot 11 = 389 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Расчетные сопротивления:

$$r_M = \frac{1,46 \cdot U_H^2}{M_M \cdot n_0} - r_1 = \frac{1,46 \cdot 220^2}{39,6 \cdot 1\,000} - 0,422 = 1,36 \text{ Ом};$$

$$r_H = \frac{1,46 \cdot U_H^2}{M_H \cdot n_0} - r_1 = \frac{1,46 \cdot 220^2}{11,65 \cdot 1\,000} - 0,422 = 5,64 \text{ Ом}.$$

где $M_M = 39,6 \text{ кг} \cdot \text{м}$; $M_H = 11,65 \text{ кг} \cdot \text{м}$.

Реактивное сопротивление

$$x_K = \sqrt{r_M^2 - r_1^2} = \sqrt{1,36^2 - 0,422^2} = 1,29 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление ротора

$$r_2' = s_H \left(r_H + \sqrt{r_H^2 - r_M^2} \right) = 0,08(5,64 + \sqrt{5,64^2 - 1,36^2}) = 0,888 \text{ Ом}.$$

Определяем приведенный ток I_2' при номинальном режиме работы двигателя:

$$I_2' = \frac{U_H}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + x_K^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,422 + \frac{0,888}{0,08})^2 + 1,29^2}} = 19 \text{ А}.$$

Для Г-образной схемы замещения (см. рис. 5.3) составим два уравнения баланса активных и реактивных мощностей при номинальном режиме работы двигателя:

$$U_H \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_H = \left(r_1 + \frac{r_2'}{s_H} \right) \cdot (I_2')^2 + r_{10} \cdot I_{10}^2;$$

$$U_H \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_H = x_K \cdot (I_2')^2 + x_{10} \cdot I_{10}^2.$$

Активная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотки статора:

$$P_{10} = r_{10} \cdot I_{10}^2 = U_H \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_H - \left(r_1 + \frac{r_2'}{s_H} \right) \cdot (I_2')^2 =$$

$$= 220 \cdot 26,4 \cdot 0,78 - \left(0,422 + \frac{0,888}{0,08} \right) \cdot 19^2 = 330 \text{ Вт}.$$

Реактивная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотки статора:

$$\begin{aligned} Q_{10} &= x_{10} \cdot I_{10}^2 = U_{\text{H}} \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_{\text{H}} - x_{\text{K}} \cdot (I_2')^2 = \\ &= 220 \cdot 26,4 \cdot 0,625 - 1,29 \cdot 19^2 = 3\,165 \text{ вар.} \end{aligned}$$

Полная мощность двигателя в режиме холостого хода, отнесенная к одной фазе обмотки статора:

$$S_{10} = \sqrt{P_{10}^2 + Q_{10}^2} = \sqrt{330^2 + 3\,165^2} = 3\,170 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Ток холостого хода

$$I_{10} = \frac{S_{10}}{U_{\text{H}}} = \frac{3\,170}{220} = 14,4 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе двигателя

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{S_{10}} = \frac{330}{3\,170} = 0,1.$$

Сопротивления при холостом ходе:

$$r_{10} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{10}} \cdot \cos \varphi_{10} = \frac{220}{14,4} \cdot 0,1 = 1,52 \text{ Ом};$$

$$x_{10} = \frac{U_{\text{H}}}{I_{10}} \cdot \sin \varphi_{10} = \frac{220}{14,4} \cdot 0,995 = 15,2 \text{ Ом.}$$

Задача № 5 для контрольной работы

Варианты 0–25

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором, обмотки статора и ротора которого соединены звездой, включен в сеть под номинальное напряжение U_{H} с частотой $f = 50$ Гц. Определить: номинальный ток статора $I_{1\text{H}}$, номинальный M_{H} и максимальный M_{M} моменты, сопротивления r_2' , x_{K} , r_{10} , x_{10} в Г-

образной схеме замещения (см. рис. 5.3), приведенный ток ротора I'_2 , ток в статоре в режиме холостого хода I_{10} и коэффициент мощности $\cos \varphi_{10}$. Данные для расчета приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Данные к задаче № 5
(варианты 0–25)

Вариант	$U_n, В$	$P_n, кВт$	$n_n, \text{МИН}^{-1}$	$\eta_n, \%$	$\cos \varphi_n$	$\frac{M_m}{M_n}$	$r_1, Ом$	$m_1 = m_2$	p
0	220	40	1140	90,0	0,84	2,0	0,072	3	2
1	220	55	1440	90,5	0,84	2,0	0,039	3	2
2	220	75	1450	90,5	0,85	2,0	0,032	3	2
3	220	100	1450	90,5	0,85	2,0	0,021	3	2
4	220	30	960	89,0	0,84	1,8	0,092	3	3
5	220	40	960	89,0	0,85	1,8	0,060	3	3
6	220	55	960	89,0	0,86	1,8	0,059	3	3
7	220	75	960	90,5	0,86	1,8	0,035	3	3
8	220	22	720	87,5	0,79	1,7	0,157	3	4
9	220	30	720	87,5	0,79	1,7	0,093	3	4
10	220	40	720	87,5	0,81	1,7	0,086	3	4
11	220	55	720	90,0	0,81	1,7	0,051	3	4
12	220	10	1420	85,0	0,82	2,0	0,270	3	2
13	220	7,5	960	84,0	0,82	1,8	0,495	3	3
14	220	10	960	85,0	0,83	1,8	0,340	3	3
15	220	5,5	710	82,0	0,72	1,7	0,645	3	4
16	220	2,2	875	64,0	0,72	2,3	0,750	3	3
17	220	3,5	910	70,5	0,73	2,5	0,740	3	3
18	220	5,0	940	74,5	0,68	2,9	0,685	3	3
19	220	7,5	945	78,5	0,69	2,8	0,490	3	3
20	220	11	953	82,5	0,71	3,1	0,325	3	3
21	220	7,5	720	77,5	0,69	2,6	0,450	3	4
22	220	11	720	81,0	0,70	2,9	0,475	3	4
23	220	16	710	82,5	0,74	3,0	0,355	3	4
24	220	22	710	84,5	0,67	3,0	0,180	3	4
25	220	30,6	720	86,0	0,71	3,0	0,095	3	4

Вариант 26–50

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, номинальная мощность которого P_n , включен в сеть под номинальное напряжение U_n с частотой $f = 50$ Гц. Определить: номинальный I_n и пусковой I_n токи, номинальный M_n , пусковой M_n и максимальный M_m моменты, полные потери в двигателе при номинальной нагрузке ΔP_n . Как изменится пусковой момент двигателя при

снижении напряжения на его зажимах на 15 % и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой? Данные для расчета приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Данные к задаче № 5
(варианты 26–50)

Вариант	$U_n, В$	$P_n, кВт$	$s_n, \%$	$\eta_n, \%$	$\cos \varphi_n$	$\frac{M_m}{M_n}$	$\frac{M_{II}}{M_n}$	$\frac{I_{II}}{I_n}$	P
26	220	0,8	3,0	78,0	0,86	2,2	1,9	7,0	1
27	220	1.1	3,0	79,5	0,87	2,2	1,9	7,0	1
28	220	1,5	4,0	80,5	0,88	2,2	1,8	7,0	1
29	220	2,2	4,5	83,0	0,89	2,2	1,8	7,0	1
30	220	3,0	3,5	84,5	0,89	2,2	1,7	7,0	1
31	220	4,0	2,0	85,5	0,89	2,2	1,7	7,0	1
32	220	5,5	3,0	86,0	0,89	2,2	1,7	7,0	1
33	220	7,5	3,5	87,0	0,89	2,2	1,6	7,0	1
34	220	10	4,0	88,0	0,89	2,2	1,5	7,0	1
35	220	13	3,5	88,0	0,89	2,2	1,5	7,0	1
36	220	17	3,5	88,0	0,90	2,2	1,2	7,0	1
37	220	22	3,5	88,0	0,90	2,2	1,1	7,0	1
38	220	30	3,0	89,0	0,90	2,2	1,1	7,0	1
39	220	40	3,0	89,0	0,91	2,2	1,0	7,0	1
40	220	55	3,0	90,0	0,92	2,2	1,0	7,0	1
41	220	75	3,0	90,0	0,92	2,2	1,0	7,0	1
42	220	100	2,5	91,5	0,92	2,2	1,0	7,0	1
43	380	10	3,0	88,5	0,87	2,0	1,4	7,0	2
44	380	13	3,0	88,5	0,89	2,0	1,3	7,0	2
45	380	17	3,0	89,0	0,89	2,0	1,3	7,0	2
46	380	22	3,0	90,0	0,90	2,0	1,2	7,0	2
47	380	30	3,0	91,0	0,91	2,0	1,2	7,0	2
48	380	40	3,0	92,5	0,92	2,0	1,1	7,0	2
49	380	55	3,0	92,5	0,92	2,0	1,1	7,0	2
50	380	75	3,0	92,5	0,92	2,0	1,1	7,0	2

6. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Основными вопросами, которые нужно изучить в данной теме, являются: сравнительная оценка свойств и область применения электрических двигателей как постоянного, так и переменного токов, выбор мощности двигателя для различных режимов работы; аппаратура управления электродвигателями; схемы

электроснабжения предприятия; внутривозовские силовые и осветительные сети, их устройства и расчет.

После изучения настоящего раздела магистранты должны:

1. Знать области применения электропривода и его преимущества перед другими типами приводов; основные электротехнические и механические устройства, входящие в состав электропривода; режимы работы электропривода; типы электропривода; механические характеристики основных производственных механизмов; основные аппараты ручного и автоматического управления электроприводом; условные графические обозначения двигателей и элементов устройств управления; основные аппараты защиты электротехнических устройств.

2. Понимать нагрузочные диаграммы и их построение; влияние температуры окружающей среды на нагрузочную способность двигателя; сущность методов эквивалентного тока, момента и мощности для расчета мощности приводного электродвигателя; назначение и принцип действия аппаратов управления; работу типовых схем и управления электроприводом; назначение и принцип действия аппаратуры защиты.

3. Уметь определять по механическим характеристикам двигателя и рабочего механизма частоту вращения и момент в установившемся режиме; рассчитывать мощность двигателя по нагрузочной диаграмме рабочего механизма; выбирать по каталогу двигатель нужного исполнения, соответствующего условиям окружающей среды и режиму работы производственного механизма.

Расчетная часть

Рассмотрим примеры выбора электродвигателей для производственных механизмов.

Задача 1. Определить необходимую мощность двигателя для привода механизма, режим работы которого задан нагрузочной диаграммой на рис. 6.1. По технологическим условиям следует использовать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Частота вращения вала двигателя 980 мин^{-1} . Помещение, где будет установлен двигатель – сухое, без пыли и грязи.

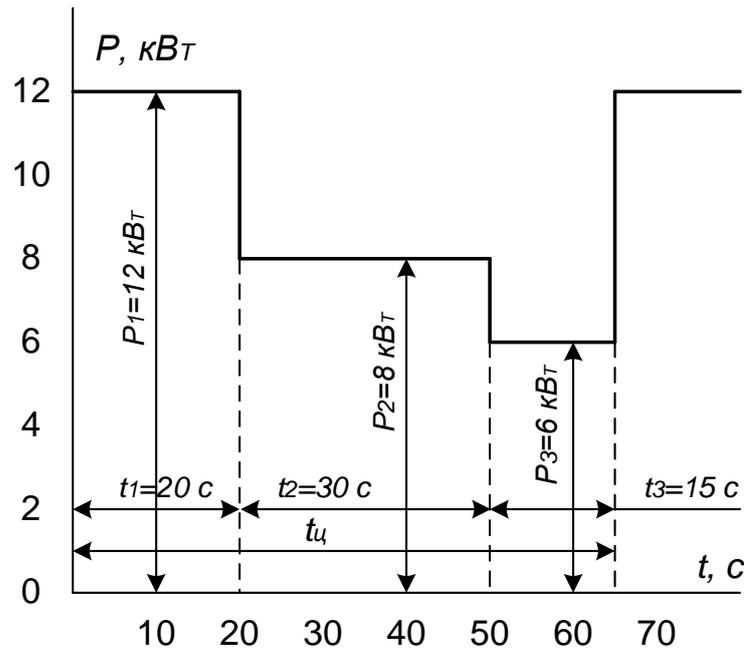


Рис. 6.1. Нагрузочная диаграмма двигателя

Решение. В данном случае режим работы представляет собой длительную переменную нагрузку. Мощность двигателя подбирается при подобных режимах работы по эквивалентной мощности:

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3}{t_{ц}}} = \sqrt{\frac{12^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{65}} = 9,05 \text{ кВт},$$

где $t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 65$ с – время цикла работы.

По данным каталога или прил. 4 в качестве приводного двигателя может быть использован трехфазный асинхронный двигатель в защищенном исполнении типа А4-61-6: 380/220 В; $P_H = 10$ кВт; $n_H = 965$ мин⁻¹; $\eta_H = 0,87$; $M_{ц} / M_H = 1,2$; $M_M / M_H = 1,8$.

В ряде случаев момент нагрузки на отдельных участках может оказаться больше максимально допустимого момента и асинхронный двигатель может остановиться. Поэтому после выбора двигателя его необходимо проверить по перегрузочной способности, исходя из условия $0,9M_M \geq M_{ст.м}$, где M_M – максимальный момент; $M_{ст.м}$ – максимальный статический момент.

В данном примере номинальный момент двигателя

$$M_H = \frac{9550 \cdot P_H}{n_H} = \frac{9550 \cdot 10}{965} = 99 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальный момент

$$M_M = 1,8 \cdot M_H = 1,8 \cdot 99 = 178 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

максимальный статический момент

$$M_{\text{ст.м}} = \frac{9550 \cdot P_1}{n} = \frac{9550 \cdot 12}{960} = 119 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

По перегрузочной способности двигатель подходит, так как выполняется условие $0,9 \cdot M_M = 0,9 \cdot 178 = 160 > M_{\text{ст.м}} = 119$.

В том случае, когда нагрузочные диаграммы заданы моментом $M = f(t)$ или током $I = f(t)$, мощность двигателей выбирают либо по эквивалентному моменту

$$M_э = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (M_k^2 \cdot t_k)}{t_{ц}}}, \text{ либо по эквивалентному току } I_э = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k^2 \cdot t_k)}{t_{ц}}}.$$

Задача 2. Определить мощность двигателя для привода механизма, работающего в повторно-кратковременном режиме, который задан нагрузочной диаграммой, изображенной на рис. 6.2. Частота вращения вала $n = 720 \text{ мин}^{-1}$.

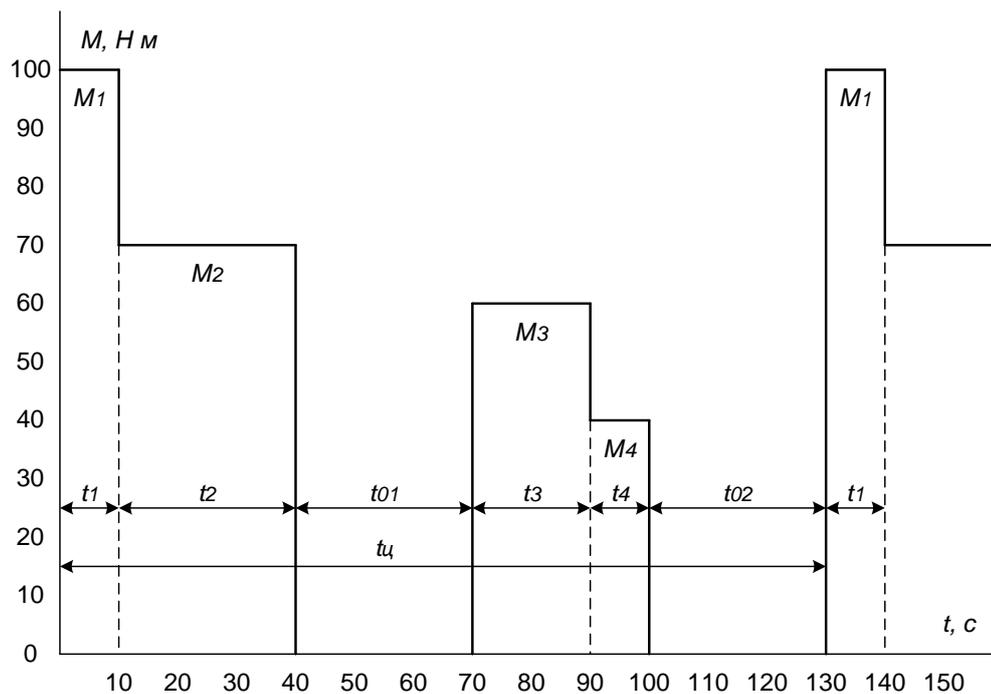


Рис. 6.2. Нагрузочная диаграмма двигателя

Решение. Определяем эквивалентный момент за рабочее время:

$$M_{\text{раб}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3 + M_4^2 \cdot t_4}{t_{\text{раб}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{100^2 \cdot 10 + 70^2 \cdot 30 + 60^2 \cdot 20 + 40^2 \cdot 10}{10 + 30 + 20 + 10}} = 63,2 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем мощность, соответствующую эквивалентному моменту за рабочее время:

$$P_{\text{раб}} = \frac{M_{\text{раб}} \cdot n}{9550} = \frac{63,2 \cdot 720}{9550} = 4,75 \text{ кВт}.$$

Определяем относительную продолжительность включения:

$$\text{ПВ}_{\text{раб}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{t_{\text{раб}}}{t_{\text{раб}} + t_{01} + t_{02}} = \frac{70}{70 + 30 + 30} = 0,54.$$

В каталогах для двигателей повторно-кратковременного режима номинальная мощность указывается для следующих стандартных значений относительной продолжительности включения ПВ: 0,15; 0,25; 0,4 и 0,6. В том случае, когда расчетная ПВ отличается от стандартного значения, рассчитанная по нагрузочной диаграмме мощность пересчитывается по формуле

$$P'_{\text{раб}} = P_{\text{раб}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{раб}}}{\text{ПВ}_{\text{ном}}}}$$

Для $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 0,6$ получим

$$P'_{\text{раб}} = 4,75 \sqrt{\frac{0,54}{0,6}} = 4,5 \text{ кВт}.$$

По данным каталога по аналогии с задачей 1 выбираем двигатель для расчетной мощности 4,5 кВт и $\text{ПВ}_{\text{ном}} = 0,6$.

Задача № 6 для контрольной работы

Для заданного в табл. 6.1 режима нагрузки производственного механизма построить нагрузочную диаграмму $P = f(t)$ и выбрать мощность трехфазного

асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Частота вращения вала 2850 мин^{-1} . Проверить выбранный двигатель по перегрузочной способности.

Таблица 6.1

Данные к задаче № 6

Вариант	$t, \text{ с}$	$P, \text{ кВт}$
---------	----------------	------------------

0	20	10	50	20	15	25	10	0	13,5	8
1	18	30	10	20	23,5	8	5	0	25	10
2	60	100	10	45	30	8	4	15	10	25
3	30	15	60	60	10	25	10	0	18	30
4	50	20	40	50	45	0	4	8	0	5
5	15	25	20	35	30	15	4	30	15	10
6	10	75	60	50	10	30	5	0	15	25
7	7	3	15	4	12	6	20	3	15	30
8	1	1,5	2,5	1,5	1,5	8	6	0	4	3,5
9	1,5	4	2,5	3,5	3	20	10	6	8	8
10	20	10	50	10	15	20	10	6	8	8
11	18	30	10	20	23,5	8	6	0	4	3,5
12	60	100	10	45	3	8	4	15	10	25
13	30	15	60	60	10	6	20	3	15	30
14	50	20	40	50	45	30	5	0	15	25
15	15	25	10	35	30	8	6	0	4	3,5
16	10	75	60	50	10	15	4	30	15	10
17	7	3	15	4	20	0	4	8	0	5
18	1	1,5	2,5	1,5	1,5	10	10	0	18	30
19	1	4	2,5	3,5	3	8	4	15	10	25
20	20	10	50	10	15	8	6	0	4	3,5
21	18	30	10	20	23,5	20	10	6	8	8
22	60	100	10	45	30	26	20	13	15	30
23	30	15	60	60	10	30	5	0	15	25
24	50	20	40	50	45	15	4	30	15	10
25	15	25	10	35	30	0	4	8	0	5
26	20	75	60	50	10	30	5	0	15	25
27	7	3	15	4	2	25	10	0	13,5	8
28	1	1,5	2,5	1,5	1,5	8	5	0	25	10
29	1	4	2,5	3,5	3	0	4	8	0	50
30	30	45	30	15	20	8	5	0	25	10
31	10	15	20	40	40	20	10	6	8	8
32	20	10	10	20	30	8	5	0	25	10
33	50	10	15	20	35	8	4	15	10	25
34	20	10	15	15	20	30	5	0	15	25
35	15	55	20	30	30	20	10	6	8	8
36	20	55	15	25	25	8	6	0	4	3,5
37	10	55	20	15	15	8	6	10	6	5
38	25	55	50	5	10	30	5	0	15	25
39	10	45	50	60	60	0	4	8	0	5
40	40	30	30	15	10	25	10	0	18	30

Окончание табл. 6.1

Вариант	t , с	P , кВт
---------	---------	-----------

41	20	15	15	10	5	8	6	0	6	5
42	8	8	10	10	12	8	4	15	10	25
43	16	5	3	2	12	15	10	0	10	8
44	15	15	20	25	15	20	10	6	8	8
45	20	35	35	25	25	30	0	25	25	10
46	10	25	10	15	20	6	0	0	6	5
47	15	30	35	40	40	8	6	0	4	3,5
48	40	30	30	20	15	20	10	6	8	8
49	20	15	15	10	5	0	4	8	0	5
50	35	35	20	15	10	15	4	30	15	10

7. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

К электронным устройствам относятся неуправляемые и управляемые полупроводниковые выпрямители, усилители, генераторы синусоидальных колебаний, генераторы пилообразного напряжения, мультивибраторы, логические элементы и т. д. Все эти устройства могут выполняться на транзисторах, диодах, резисторах, конденсаторах или в микроминиатюрном исполнении – на микросхемах.

После изучения данного раздела магистранты должны:

1. Знать принцип работы и область применения полупроводниковых приборов, их основные характеристики, тенденции развития полупроводниковой техники.
2. Понимать принцип работы электрических схем с полупроводниковыми приборами; влияние внешних факторов на работу электронных устройств.
3. Уметь различать по внешнему виду полупроводниковые элементы; ориентироваться в паспортных данных полупроводниковых приборов; выбирать полупроводниковые приборы и устройства в соответствии с заданными техническими условиями.

Усилители являются одними из самых распространенных электронных устройств, применяемых в системах автоматики, радиотехнике, в автомобильной технике, строительных машинах и т. д. Усилители подразделяются на предварительные (усилители напряжения) и усилители мощности. Предварительные транзисторные усилители содержат один или несколько каскадов усиления. При этом все каскады усилителя обладают общими свойствами, различие между ними может быть только количественное: разные токи, напряжения, разные значения резисторов, конденсаторов и т. п.

Для каскадов предварительного усиления наибольшее распространение получили схемы с применением резисторов. В зависимости от способа подачи входного сигнала и получения выходного усилительные схемы получили следующие названия: с общим эмиттером; с общей базой; с общим коллектором. Наиболее

распространенным является каскад с общим эмиттером, который обладает наибольшим входным и наименьшим выходным сопротивлениями.

Расчетная часть

Рассмотрим пример расчета каскада транзисторного усилителя напряжения низкой частоты (рис. 7.3 к задаче № 7 для контрольной работы).

Задача. Исходные данные: напряжение на выходе каскада $U_{\text{вых.м}}$ (напряжение на нагрузке); сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$; нижняя граничная частота $f_{\text{н}}$; допустимое значение коэффициента частотных искажений каскада в области нижних частот $M_{\text{н}}$; напряжение источника питания $E_{\text{п}}$; каскад работает в стационарных условиях $T_{\text{мин}} = +15 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{макс}} = +25 \text{ }^\circ\text{C}$, поэтому при расчете влиянием температуры на режим работы транзистора пренебрегаем.

Определить: тип транзистора; режим работы транзистора; сопротивление коллекторной нагрузки $R_{\text{к}}$; сопротивление в цепи эмиттера $R_{\text{э}}$; сопротивления делителя напряжения R_1 и R_2 , стабилизирующие режим работы транзистора; емкость разделительного конденсатора $C_{\text{р}}$; емкость конденсатора в цепи эмиттера $C_{\text{э}}$; коэффициент усиления каскада по напряжению $K_{\text{у}}$.

Выбираем тип транзистора, руководствуясь следующими соображениями: $U_{\text{кэ.доп}} \geq (1,1-1,3) E_{\text{п}}$; $U_{\text{кэ.доп}}$ – наибольшее допустимое напряжение между коллектором и эмиттером, приводится в справочниках; $I_{\text{к.доп}} > 2I_{\text{н.м}} = 2U_{\text{вых.м}}/R_{\text{н}}$; $I_{\text{н.м}}$ – наибольшая амплитуда тока нагрузки; $I_{\text{к.доп}}$ – наибольший допустимый ток коллектора, приводится в справочниках.

Заданному диапазону температур удовлетворяет любой транзистор. Для выбранного типа транзистора необходимо выписать из справочника значения коэффициентов усиления по току для схемы с ОЭ – $\beta_{\text{мин}}$ и $\beta_{\text{макс}}$. В некоторых справочниках дается коэффициент усиления α по току для схемы ОБ и начальный ток коллектора $I_{\text{к.н}}$. Тогда $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ (при выборе режима работы транзистора необходимо выполнять условие $I_{\text{к.мин}} \geq I_{\text{к.н}}$). Для каскадов предварительного усиления обычно применяют маломощные транзисторы типа КТ361, КТ3107, КТ363 и др.

Режим работы транзистора определяется по нагрузочной прямой, построенной на выходных статических (коллекторных) характеристиках для схемы с ОЭ. Построение нагрузочной прямой показано на рис. 7.1. Нагрузочная прямая строится по двум точкам: точка 0 – точка покоя (рабочая) и точка 1, которая определяется величиной напряжения источника питания $E_{\text{п}}$.

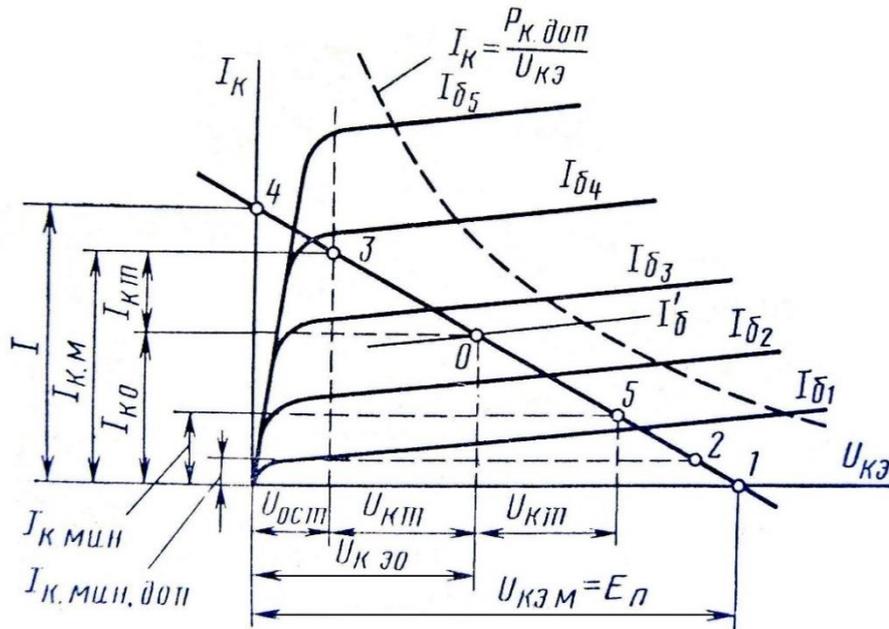


Рис. 7.1. Выходные статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ

Координатами точки 0 являются ток покоя $I_{К0}$ и напряжение покоя $U_{КЭ0}$ (т. е. ток и напряжение, соответствующие $U_{вх} = 0$). Можно принять $I_{К0} = (1,05-1,2) I_{вых} \approx (1,05-1,2) I_{н.м.}$ Напряжение покоя $U_{КЭ0} = U_{вх.м} + U_{ост} = U_{км} + U_{ост}$, где $U_{ост}$ – наименьшее допустимое напряжение $U_{КЭ}$.

При $U_{КЭ} < U_{ост}$ возникают значительные нелинейные искажения, так как в рабочую зону попадают нелинейные участки характеристик. Для маломощных транзисторов можно принять $U_{ост} = (0,5-1,0)$ В.

Определяем величины резисторов R_k и $R_э$. По выходным характеристикам рис. 7.1 определяем $R_{об} = R_k + R$. Общее сопротивление в цепи эмиттер-коллектор $R_{об} = E_{п}/I$, где I – ток, определяемый точкой пересечения нагрузочной прямой с осью токов.

Принимая $R_э = (0,15-0,25) R_k$, получим

$$R_k = \frac{R_{об}}{(1,15-1,25)}; R_э = R_{об} - R_k.$$

Определяем наибольшие амплитудные значения тока $I_{вх.м}$ и напряжения $U_{вх.м}$ входного сигнала, необходимые для обеспечения заданного значения $U_{вх.м}$. Задавшись наименьшим значением коэффициента усиления транзистора по току $\beta_{мин}$, получим

$$I_{вх.м} = I_{б.м} = \frac{I_{к.м}}{\beta_{мин}},$$

причем $I_{вх.м}$ не должен превышать величины $\frac{I_{б.м} - I_{б.мин}}{2}$, где для маломощных транзисторов $I_{б.м} \approx (1-2)$ мА; $I_{б.мин} \approx 0,05$ мА.

По входной статической характеристике рис. 7.2 и вычисленным значениям $I_{б.м}$ и $I_{б.мин}$ находят величину $2U_{вх.м}$.

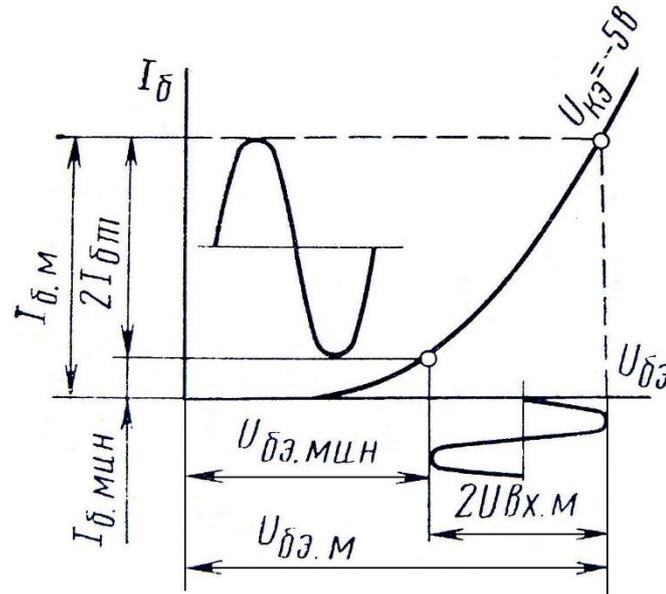


Рис. 7.2. Входная статическая характеристика транзистора в схеме с ОЭ

Определяем входное сопротивление $R_{вх}$ каскада переменному току (без учета делителя напряжения R_1 и R_2):

$$R_{вх} = \frac{2U_{вх.м}}{2I_{б.м}} \approx \frac{2U_{вх.м}}{2I_{б.м}}$$

Определяем сопротивления делителя R_1 и R_2 . Для уменьшения шунтирующего действия делителя на входную цепь каскада принимаем:

$$R_{1-2} \geq (8 - 12)R_{вх},$$

где $R_{1-2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Тогда

$$R_1 = \frac{E_{п} \cdot R_{1-2}}{R_{э} \cdot I_{э}} = \frac{E_{п} \cdot R_{1-2}}{R_{э} \cdot I_{к0}}; R_2 = \frac{R_1 \cdot R_{1-2}}{R_1 - R_{1-2}}$$

Определяем коэффициент нестабильности работы каскада:

$$S = \frac{R_{э} (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_{э} (R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{1 + \beta_{макс}}}$$

где $\beta_{макс}$ – наибольший коэффициент усиления по току выбранного типа транзистора.

Для нормальной работы каскада коэффициент нестабильности S не должен превышать нескольких единиц.

Определяем емкость разделительного конденсатора:

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H R_{\text{ВЫХ}} \sqrt{M_H^2 - 1}}; \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ.Т}} \cdot R_K}{R_{\text{ВЫХ.Т}} + R_K} + R_H,$$

где $R_{\text{ВЫХ.Т}}$ – выходное сопротивление транзистора, определяемое по выходным статическим характеристикам.

В большинстве случаев $R_{\text{ВЫХ.Т}} \gg R_K$, поэтому можно принять $R_{\text{ВЫХ}} \approx R_K + R_H$.

Принимаем $C_p = (10-30)$ мкФ.

Определяем коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ.М}}}{U_{\text{ВХ.М}}}$$

Задача № 7 для контрольной работы

Рассчитать каскад транзисторного усилителя напряжения, принципиальная схема которого приведена на рис. 7.3. Данные для расчета приведены в табл. 7.1.

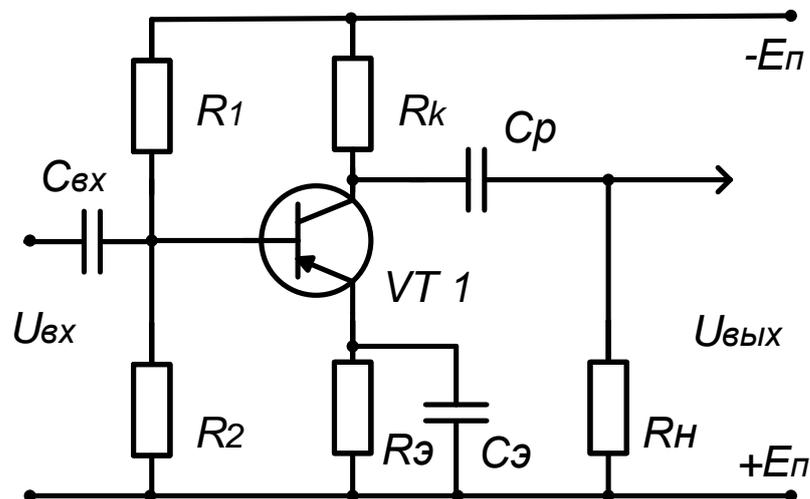


Рис. 7.3. Схема к задаче № 7

Данные к задаче № 7

Вариант	$U_{\text{вых.м}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	$f_{\text{н}}, \text{Гц}$	$E_{\text{п}}, \text{В}$
0	3,0	600	100	12
1	2,0	400	90	6
2	1,0	250	120	9
3	5,0	450	200	27
4	2,0	350	150	12
5	2,4	600	180	3
6	3,4	550	140	12
7	1,6	280	160	6
8	4,0	590	170	27
9	2,2	440	110	9
10	3,4	600	150	12
11	1,5	200	60	3
12	1,7	250	70	6
13	1,8	300	80	9
14	2,0	350	90	12
15	2,1	400	120	15
16	2,3	450	140	18
17	2,5	480	150	24
18	2,7	500	160	27
19	2,8	520	170	24
20	3,0	540	180	20
21	3,1	550	200	18
22	3,2	580	220	15
23	3,5	560	230	12
24	3,6	480	250	9
25	1,8	320	270	6
26	3,5	550	100	24
27	2,5	350	110	6
28	1,5	250	120	12
29	4,5	400	210	27
30	2,5	300	250	12
31	2,7	600	160	3
32	3,6	550	130	12
33	1,8	290	140	6
34	3,0	580	180	27
35	2,7	440	130	9
36	3,8	580	160	12
37	1,9	210	50	3
38	2,7	240	80	6
39	1,5	310	100	9
40	2,4	370	90	12
41	2,8	350	130	15

Окончание табл. 7.1

Вариант	$U_{\text{вых.м}}, \text{В}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	$f_{\text{н}}, \text{Гц}$	$E_{\text{п}}, \text{В}$
42	2,9	480	160	18
43	2,2	450	150	24
44	2,6	520	140	27
45	2,7	560	180	24
46	3,4	540	140	20
47	3,0	550	210	18
48	3,1	600	220	15
49	3,8	580	200	12
50	3,4	490	260	9

Рекомендуемая литература

1. Бондарь И.М. Электротехника и электроника: учеб. пособие / И.М. Бондарь. – Ростов-на-Дону: Изд. центр «МарТ»; Феникс, 2010. – 340 с.
2. Бондарь И.М. Электротехника и основы электроники в примерах и задачах: учеб. пособие для вузов/ И.М. Бондарь. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 388 с.
3. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 736 с.
4. Марченко А.А. Электротехника и электроника: учебник: в 2 т.: Электротехника/А.А. Марченко, Ю.Ф. Опачий. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 574 с. + Доп. материалы. [Электронный ресурс].
5. Поляков А.Е. Электротехника и электроника. Дистанционный курс: уч. пособие/А.Е. Поляков, М.С. Иванов; под редакцией А.Е. Полякова. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 352 с.
6. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: уч. пособие / Ю.Г. Синдеев. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2019. – 407 с.
7. Шандриков А.С. Электротехника с основами электроники: уч. пособие /А.С. Шандриков. – Минск: РИПО, 2016. – 318 с.
8. Электротехника. URL: <http://www.electrotehnika.info.ru> (дата обращения: 04.04.2023).
9. Электротехника и электроника. URL: <http://bondaruniver.jimdofree.com/> (дата обращения: 04.04.2023).

Пример оформления контрольной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»Факультет «Автоматизация, мехатроника и управление»
Кафедра «Электротехника и электроника»

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ
СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ»

Задача № 4

Выполнил Иванов И.И. магистрант МЭЭС21 _____
(Ф.И.О.) (группа) (шифр)

Номер варианта 27

Принял доцент Бондарь И.М.
(ФИО)

Дата _____

Ростов-на-Дону
2024

Задача № 4. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения (рисунок) используется для привода центробежного насоса. Мощность на валу

$P_{2н} = 10$ кВт при напряжении $U_H = 220$ В, частота вращения вала $n_H = 2250$ мин⁻¹. Потери мощности в цепи возбуждения $\Delta P_B = 5\% P_{1н}$, в цепи якоря — $\Delta P_я = 4,6\% P_{1н}$, коэффициент полезного действия двигателя $\eta = 86\%$.

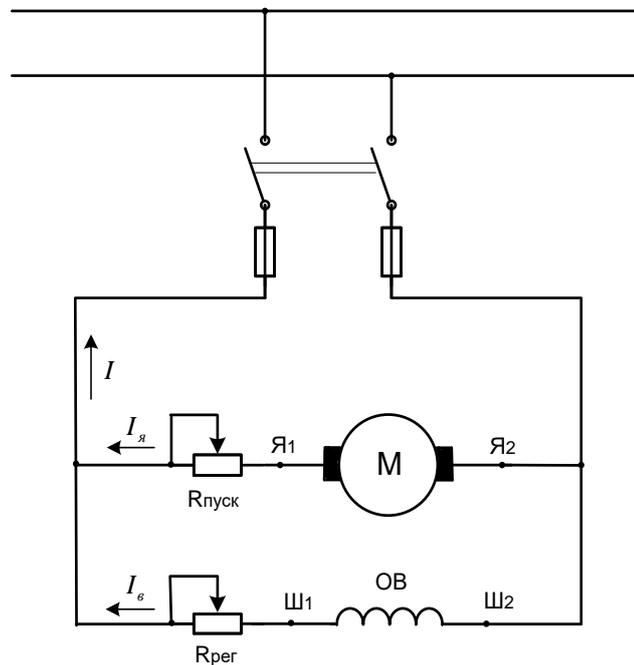


Схема включения в сеть двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Требуется определить: величину сопротивления пускового реостата $R_{пуск}$ для пуска двигателя с отношением $\frac{I_{яп}}{I_{ян}} = 2$; величину номинального вращающего момента M_H ; величину пускового вращающего момента $M_п$, полагая, что магнитный поток $\Phi = \text{const}$.

Решение. Определяем мощность, потребляемую двигателем из сети:

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta} = \frac{10}{0,86} = 11,63 \text{ кВт.}$$

Номинальный ток двигателя

$$I_H = \frac{P_{1н}}{U_H} = \frac{11\,630}{220} = 53 \text{ А.}$$

Ток возбуждения

$$I_B = \frac{\Delta P_B \%}{100 \cdot U_H} = \frac{5 \cdot 11\,630}{100 \cdot 200} = 2,64 \text{ А.}$$

Номинальный ток якоря

$$I_{ян} = I_H - I_B = 53 - 2,64 = 50,36 \text{ А.}$$

Сопротивление обмотки якоря

$$R_{\text{я}} = \frac{\Delta P_{\text{я}} \% \cdot P_{1\text{H}}}{I_{\text{ян}}^2} = \frac{4,6 \cdot 11\,630}{100 \cdot 50,36^2} = 0,212 \text{ Ом.}$$

Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{пуск}} = \frac{U_{\text{H}}}{2I_{\text{ян}}} - R_{\text{я}} = \frac{220}{2 \cdot 50,36} = 1,97 \text{ Ом.}$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{H}} = 9\,550 \frac{P_{2\text{H}}}{n_{\text{H}}} = 9\,550 \frac{10}{2\,250} = 42,44 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Определяем пусковой вращающий момент. Из теории известно, что вращающий момент пропорционален магнитному потоку и току якоря

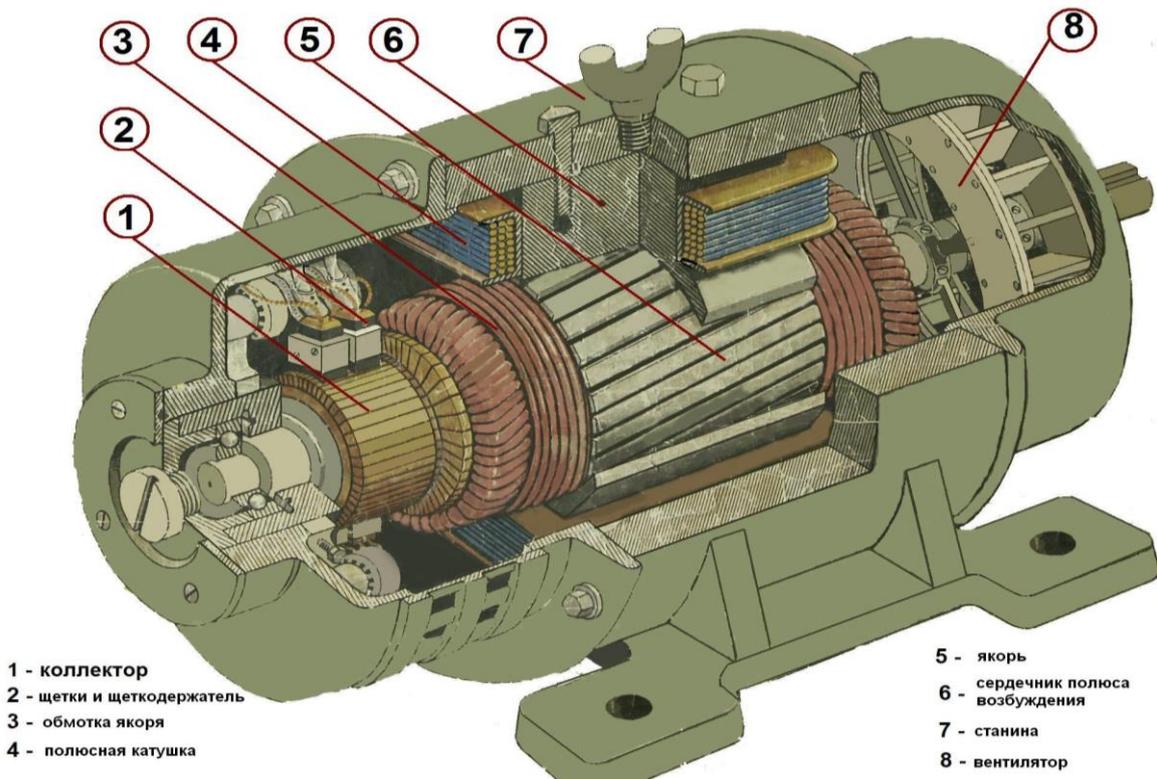
$$M = C_{\text{M}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}}.$$

Так как по условию задачи магнитный поток Φ не изменяется, то пусковой момент пропорционален току якоря. Пусковой ток согласно условию задачи в два раза больше номинального, следовательно, и пусковой момент будет в два раза превышать номинальный:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{H}} \frac{I_{\text{яп}}}{I_{\text{ян}}} = 42,44 \cdot 2 = 84,88 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

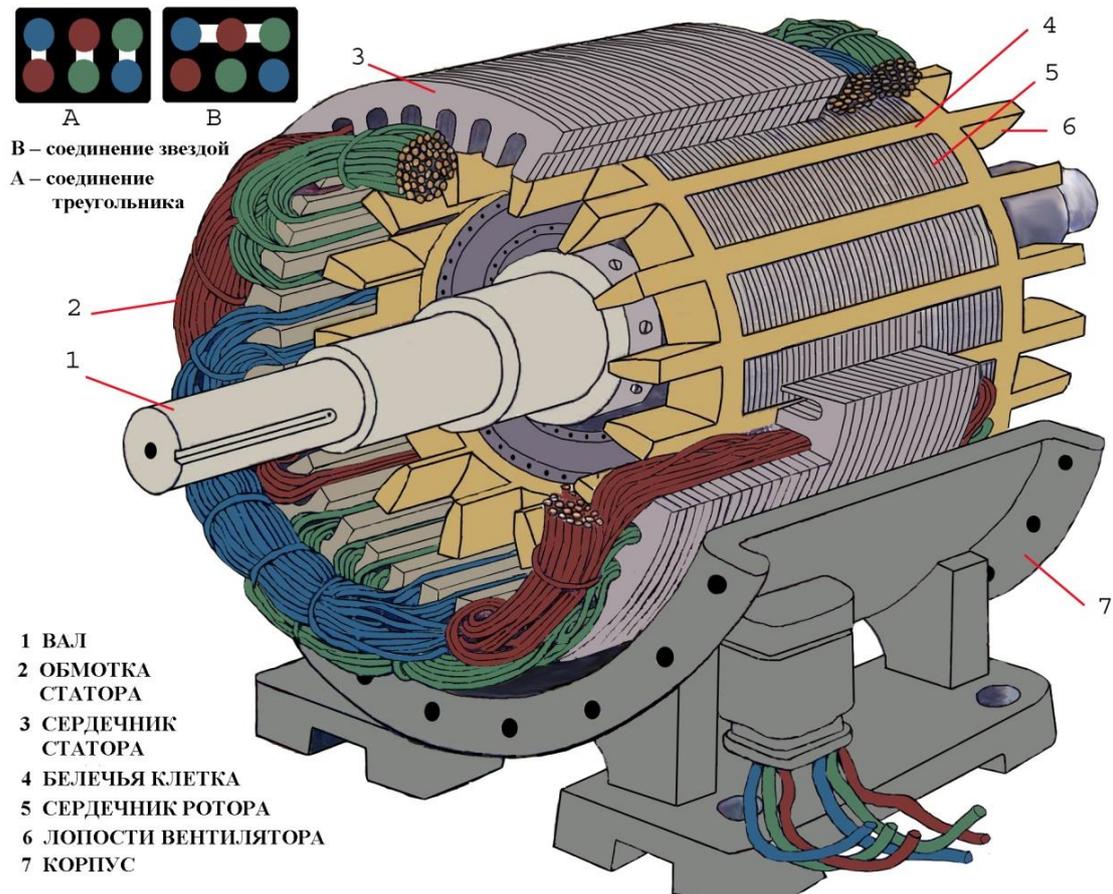
Дата _____

Подпись _____



Конструкция машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки и щеткодержатель; 3 – обмотка якоря; 4 – полюсная катушка;
 5 – якорь; 6 – сердечник полюса возбуждения; 7 – станина; 8 – вентилятор



Конструкция трёхфазного асинхронного двигателя

Технические данные двигателей серии АИР

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{min}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$
		Скольжение, %	КПД, %	$\cos \varphi$				
Синхронная скорость вращения 3000 об/мин								
АИР71А2	0,75	6	78,5	0,83	2,1	2,2	1,6	6
АИР71В2	1,1	6,5	79	0,83	2,1	2,2	1,6	6
АИР80А2	1,5	5	81	0,85	2,1	2,2	1,6	7
АИР80В2	2,2	5	83	0,87	2	2,2	1,6	7
АИР90L2	3	5	84,5	0,88	2	2,2	1,6	7
АИР100S2	4	5	87	0,88	2	2,2	1,6	7,5
АИР100L2	5,5	5	88	0,89	2	2,2	1,6	7,5
АИР112M2 АИРХ112M2	7,5	3,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7,5
АИР132M2 АИРХ132M2	11	3	88	0,9	1,6	2,2	1,2	7,5
АИР160S2 АИРХ160S2	15	3	89	0,89	1,8	2,7	1,7	7
АИР160M2 АИРХ160M2	18,5	3	89,5	0,9	1,8	2,7	1,7	7
АИР180S2	22	2,7	89,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7
АИР180M2	30	2,5	90,5	0,88	1,7	2,7	1,6	7,5
Синхронная скорость вращения 1500 об/мин								
АИР71А4	0,55	9,5	70,5	0,7	2,3	2,2	1,8	5
АИР71В4	0,75	10	73	0,73	2,2	2,2	1,6	5
АИР80А4	1,1	7	75	0,81	2,2	2,2	1,6	5,5
АИР80В4	1,5	7	78	0,83	2,2	2,2	1,6	5,5
АИР90L4	2,2	7	81	0,83	2,1	2,2	1,6	6,5
АИР100S4	3	6	82	0,83	2	2,2	1,6	7
АИР100L4	4	6	85	0,84	2	2,2	1,6	7
АИР112M4 АИРХ112M4	5,5	4,5	87,5	0,88	2	2,2	1,6	7
АИР132S4 АИРХ132S4	7,5	4	87,5	0,86	2	2,2	1,6	7,5
АИР132M4 АИРХ132M4	11	3,5	87,5	0,87	2	2,2	1,6	7,5
АИР160S4 АИРХ160S4	15	3	89,5	0,89	1,9	2,9	1,8	7
АИР160M4 АИРХ160M4	18,5	3	90	0,89	1,9	2,9	1,8	7
АИР180S4	22	2,5	90	0,87	1,5	2,4	1,3	6,5
АИР180M4	30	2	91,5	0,86	1,7	2,7	1,6	7