



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИЙ (ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
В Г. ВОЛГОДОНСКЕ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ**

(Институт технологий (филиал) ДГТУ в г. Волгодонске)



УТВЕРЖДАЮ
Директор
И.В. Столяр
«26» апреля 2022 г.

Методические указания

по дисциплине

«Электротехника и электроника»

для обучающихся по направлению подготовки

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств

профиль Технология машиностроения

2022 года набора

Волгодонск
2022

Лист согласования

Методические указания по дисциплине «Электротехника и электроника»
составлены в соответствии с требованиями Федерального государственного
образовательного стандарта высшего образования по направлению
подготовки (специальности)

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств

Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «ТСиИТ» протокол № 9 от
«26» апреля 2022 г.

Оглавление

1. Линейные электрические цепи постоянного тока.....	4
1.1. Примеры расчета сложных цепей.....	4
1.2. Задачи для самостоятельного решения.	11
1.3. Индивидуальное задание №1 для самостоятельной работы «Расчет разветвленной цепи постоянного тока».....	13
2. Однофазные цепи переменного тока	19
2.1. Задачи для самостоятельного решения	19
2.2. Индивидуальное задание № 2 для самостоятельной работы «Расчет однофазной цепи переменного тока»	20
3. Трехфазные цепи	23
3.1. Задачи для самостоятельного решения.....	23
3.2. Индивидуальное задание №3 для самостоятельного решения «Расчет трехфазной цепи переменного тока».....	25
4. Трансформаторы	32
4.1. Примеры решения задач	32
4.2. Задачи для самостоятельного решения	35
4.3. Индивидуальное задание № 4 для самостоятельной работы «Расчет параметров трансформатора».....	36
5. Асинхронные двигатели.....	41
5.1. Примеры решения задач.....	41
5.2. Задачи для самостоятельного решения.....	44
5.3. Индивидуальное задание № 5 для самостоятельной работы «Расчет параметров асинхронного двигателя»	45
6. Синхронные генераторы	48
6.1. Примеры решения задач.....	48
6.2. . Задачи для самостоятельного решения.....	50
7. Машины постоянного тока.....	51
7.1. Примеры решения задач.....	51
7.2. Задачи для самостоятельного решения.....	54
7.3. Индивидуальное задание №6 для самостоятельного решения «Расчет параметров генератора постоянного тока».....	55
Ответы к задачам для самостоятельного решения	58

1. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1 Примеры расчета сложных цепей различными методами

Пример 1.1. В схеме 1.1 определить токи всех ветвей методом уравнений Кирхгофа.

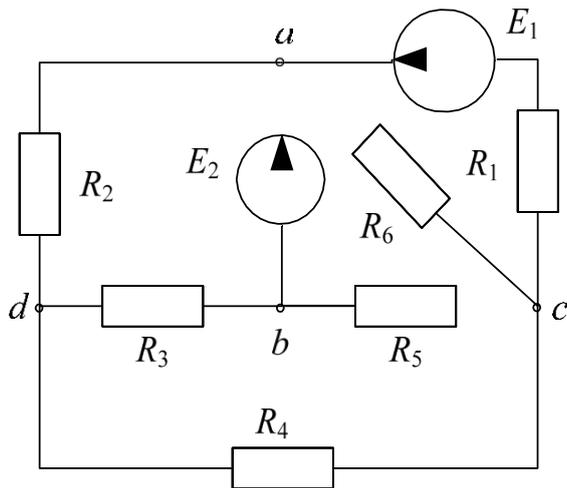
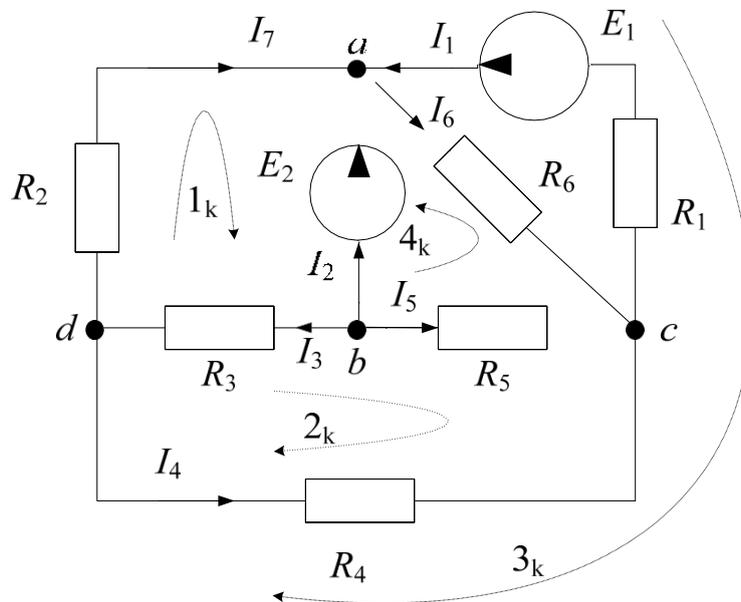


Схема 1.1

Решение: Расставим направление токов в ветвях заданной схемы и выберем направления обхода контура.



В схеме количество узлов $n_y = 4$ (a, b, c, d) и число ветвей $n_b = 7$.
Значит по 1-му закону Кирхгофа необходимо составить

$n_I \square n_U \square 1 \square 4 \square 1 \square 3$ уравнения, для $n_{II} \square n_e \square \square 7 \square 3 \square$ В нашей любых трех узлов составляем $n_I \square 4$.
уравнения (втекающие в узел токи возьмем со знаком «-», вытекающие со знаком «+»):

$$a: I_6 \square I_1 \square I_2 \square I_7 \square 0,$$

$$b: I_5 \square I_2 \square I_3 \square 0,$$

$$c: \square I_6 \square I_5 \square I_4 \square I_1 \square 0.$$

По 2 закону Кирхгофа составим схеме 4 независимых контура, значит по 2 закону Кирхгофа необходимо составить 4 уравнения:

$$1к: I_7 R_2 \square I_3 R_3 \square \square E_2 ,$$

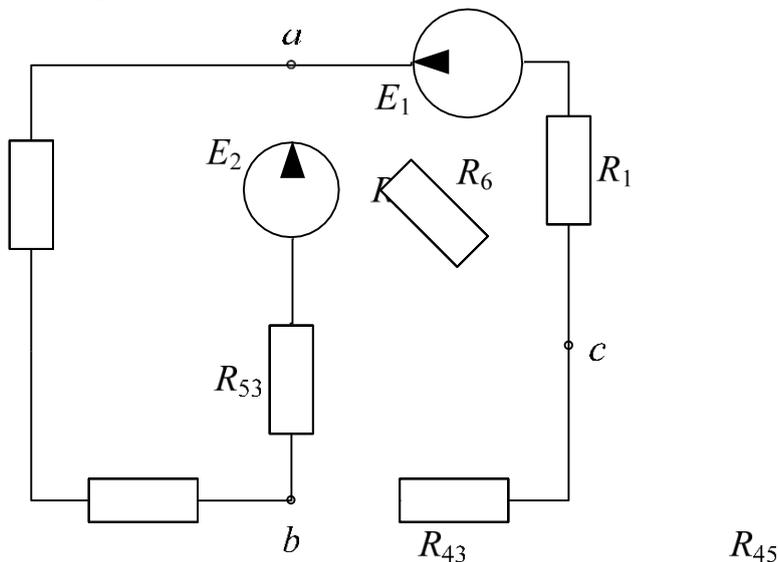
$$2к: I_5 \square R_5 \square I_3 \square R_3 \square I_4 \square R_4 \square 0,$$

$$3к: \square I_1 \square R_1 \square I_4 \square R_4 \square I_7 \square R_2 \square \square E_1 ,$$

$$4к: I_5 \square R_5 \square I_6 \square R_6 \square \square E_2 .$$

Пример 1.2. В схеме 1.1 сделать преобразование до двух контуров. $R_1 = R_6 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 1 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = R_5 = 3 \text{ Ом}$.

Решение: Сопротивления R_3, R_4, R_5 соединены в треугольник, преобразуем его в звезду:



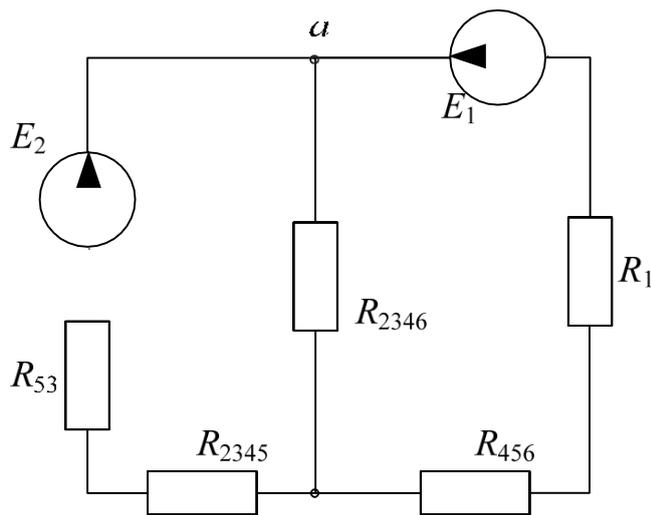
Тогда

$$R_4 = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом}, R_{43} = \frac{R_4 \cdot R_3}{R_4 + R_5 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом},$$

$$R = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_3} = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3 + 3} = 1 \text{ Ом.}$$

Сопротивления R_2 и R_{43} соединены последовательно, сложим их и получим сопротивление $R_{234} = R_2 + R_{43} = 1 + 1 = 2 \text{ Ом.}$

Сопротивления R_{234} , R_{45} , R_6 соединены в треугольник, преобразуем звезду



b

$$R_{456} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_6 + R_{234}} = \frac{1 \cdot 2}{1 + 2 + 2} = 0,4 \text{ Ом},$$

$$R_{2345} = \frac{R_{234} \cdot R_5}{R_{234} + R_5 + R_{456}} = \frac{2 \cdot 1}{2 + 1 + 0,4} = 0,4 \text{ Ом},$$

$$R_{23456} = R_{2345} + R_{456} = 0,4 + 0,4 = 0,8 \text{ Ом}.$$

Сопротивления R_{53} и R_{2345} соединены последовательно, сложим их в одно $R_{92} = R_{234553} = R_{2345} + R_{53} = 0,4 + 1 = 1,4 \text{ Ом}$, сопротивления R_1 и R_{456} соединены тоже последовательно, сложим их в одно $R_{91} = R_{1456} = R_1 + R_{456} = 2 + 0,4 = 2,4 \text{ Ом}$. Получили схему с двумя контурами.

Пример 1.3. В схеме 1.12 известны следующие параметры: $E_1 = 10\text{В}$, $E_2 = 5\text{В}$, $R_1 = 2,4 \text{ Ом}$, $R_2 = 1,4 \text{ Ом}$, $R_3 = 0,8 \text{ Ом}$. Определить токи ветвей по методу контурных токов. Проверить расчет с помощью баланса мощностей.

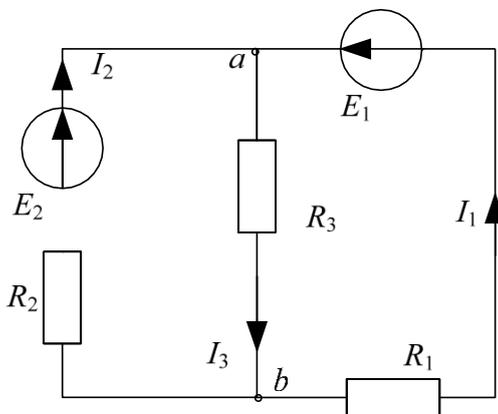
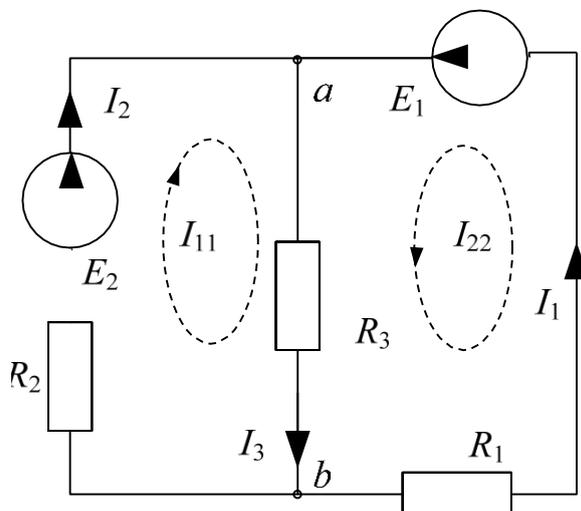


Схема 1.2

Решение: В начале выберем направления контурных токов.
Составим уравнения контурных токов:

$$\begin{aligned} I_{11}(R_{\vartheta 1} + R_{\vartheta 3}) + I_{22}R_{\vartheta 3} &= E_1, \\ I_{22}(R_{\vartheta 2} + R_{\vartheta 3}) + I_{11} \cdot R_{\vartheta 3} &= E_2 \end{aligned}$$



Решим систему методом подстановки, в результате получим:

$$I_{11} = 2,813 \text{ А}, I_{22} = 1,25 \text{ А}.$$

Определим токи в ветвях через найденные контурные токи:

$$\begin{aligned} I_1 = I_{11} &= 2,813 \text{ А}, I_2 = I_{22} = 1,25 \text{ А}, \\ I_3 = I_{11} + I_{22} &= 2,813 + 1,25 = 4,063 \text{ А}. \end{aligned}$$

Составим баланс мощностей:

$$\begin{aligned} P_B = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 &= 10 \cdot 2,812 + 5 \cdot 1,25 = 34,37 \text{ Вт}, \\ P_{II} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + (I_1 + I_2)^2 \cdot R_3 &= \\ &= (2,812)^2 \cdot 2,4 + (1,25)^2 \cdot 1,4 + (4,0625)^2 \cdot 0,8 = 34,3 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Погрешность вычислений:

$$\delta_{\%} = \frac{|P_B - P_{II}|}{P_B} 100\% = \frac{|34,37 - 34,3|}{34,37} 100\% = 0,2\% \leq 3\%.$$

Расчет верен.

Пример 1.4. В схеме 1.12 известны следующие параметры: $E_1 = 10\text{В}$, $E_2 = 5\text{В}$, $R_1 = 2,4\text{ Ом}$, $R_2 = 1,4\text{ Ом}$, $R_3 = 0,8\text{ Ом}$. Найдём токи ветвей методом межузловых напряжений. Построить потенциальную диаграмму.

Решение: Составим уравнения для напряжения U_{ab} :

$$U_{ab} = \frac{E_1 \cdot Y_1 + E_2 \cdot Y_2}{(Y_1 + Y_2 + Y_3)},$$

где Y_1, Y_2, Y_3 – проводимости ветвей. $Y_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2,4} = 0,416 \text{ См},$

$$Y_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{1,4} = 0,714 \text{ См}, Y_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \text{ См}.$$

Тогда получили:

$$U_{ab} = \frac{10 \cdot 0,416 + 5 \cdot 0,714}{0,416 + 0,714 + 1,25} = 3,25 \text{ В}.$$

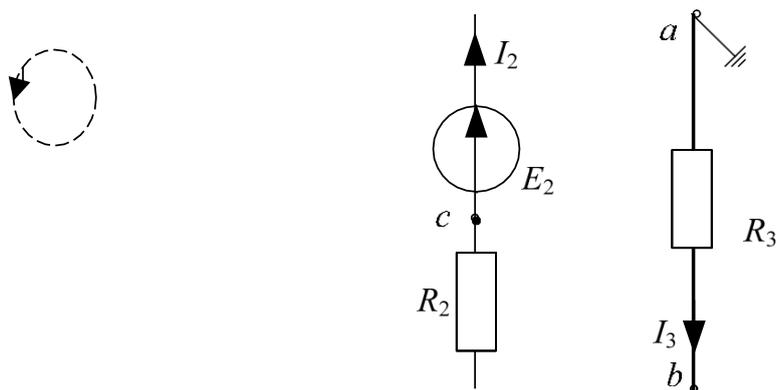
По обобщенному закону Ома найдем токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1} = \frac{10 - 3,25}{2,4} = 2,812 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2} = \frac{5 - 3,25}{1,4} = 1,25 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{3,25}{0,8} = 4,0625 \text{ А}.$$

Построим потенциальную диаграмму для любого контура без источника тока.



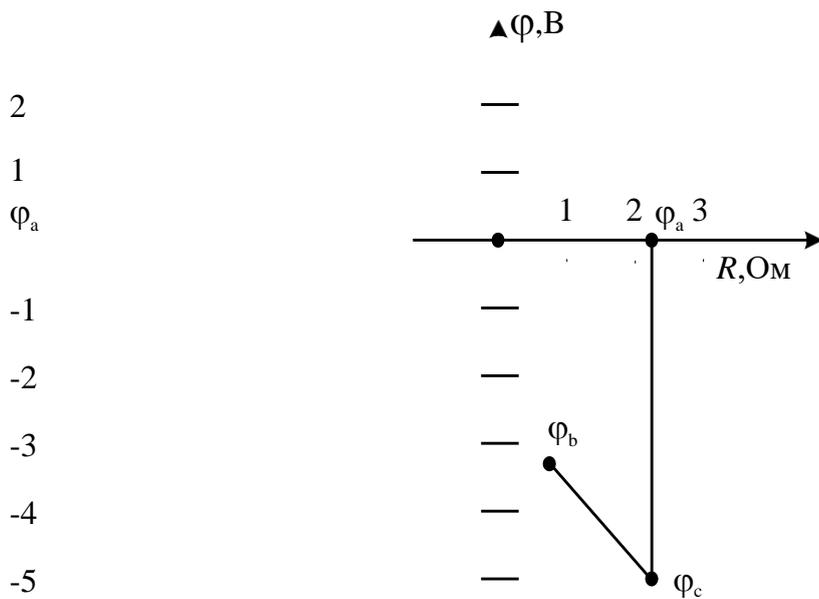
Выберем в контуре любую точку, допустим a и примем потенциал этой точки равным нулю $\varphi_a = 0$.

Далее пойдем по обходу контура:

$$\varphi_c = \varphi_b - I_2 \cdot R_2 = -3,25 - 1,25 \cdot 1,4 = -5 \text{ В},$$

$$\varphi_a = \varphi_c + E_2 = -5 + 5 = 0 \text{ В}.$$

Выходим из точки c с потенциалом равным нулю и, обойдя контур, приходим в точку a с таким же потенциалом, диаграмма подтверждает правильность расчетов.

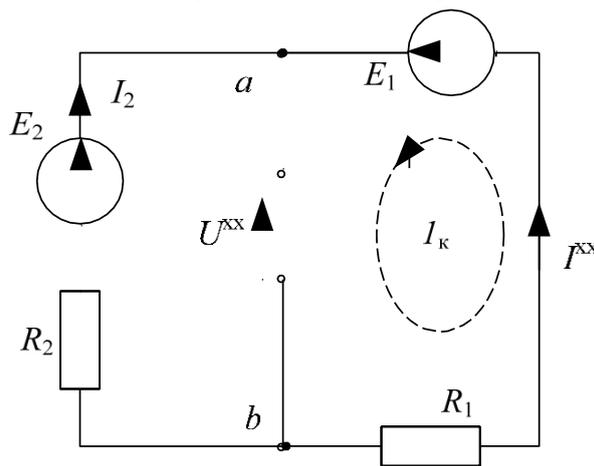


Пример 1.5. В схеме 1.2 известны следующие параметры: $E_1 = 10\text{В}$, $E_2 = 5\text{В}$, $R_1 = 2,4\text{ Ом}$, $R_2 = 1,4\text{ Ом}$, $R_3 = 0,8\text{ Ом}$. Найдём ток в ветви без ЭДС методом эквивалентного генератора.

Решение: Ток в ветви без ЭДС – это ветвь с сопротивлением R_3 . Уберем это сопротивление из ветви и относительно получившихся зажимов найдем напряжение холостого хода U^{XX} .

Для определения U^{XX} обойдем 1 контур по 2 закону Кирхгофа:

$$U^{XX} = E - I^{XX} \cdot R_1$$



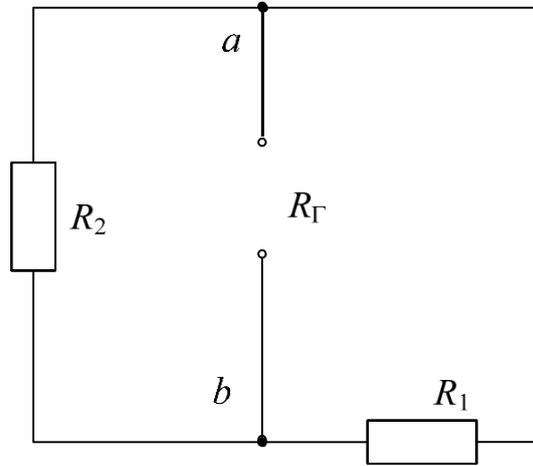
Ток I^{XX} определим из закона Ома:

$$I^{XX} = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 - 5}{2,4 + 1,4} = 1,315\text{ А.}$$

Подставим найденное значение тока I^{xx} и получим:

$$U^{xx} = 10 - 1,315 \cdot 2,4 = 6,842 \text{ В.}$$

Определим сопротивление генератора R_{Γ} .



Здесь сопротивления R_1 и R_2 соединены параллельно, тогда:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,4 \cdot 1,4}{2,4 + 1,4} = 0,884 \text{ Ом.}$$

Искомый ток будет равен:

$$I_{\Gamma} = \frac{U^{xx}}{R + R_{\Gamma}} = \frac{6,842}{0,884 + 0,8} = 4,0629 \text{ А.}$$

1.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.1. Определить эквивалентное сопротивление R_{ab} пассивной цепи (схема 1.13), если $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 3 \text{ Ом}$.

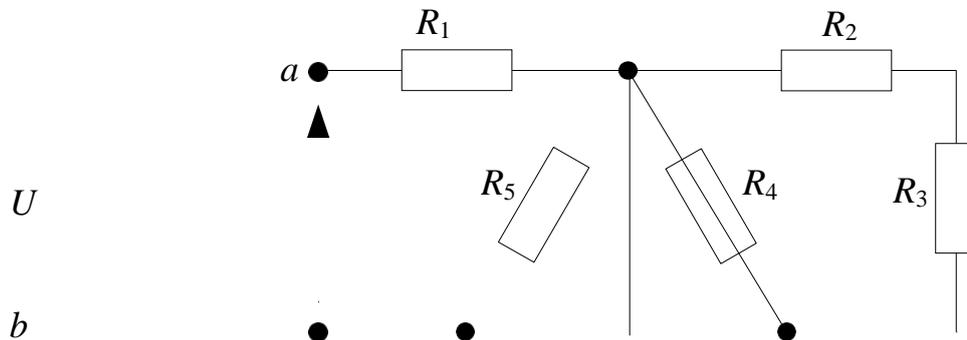


Схема 1.3

Задача 1.2. Определить эквивалентное сопротивление R_{ab} пассивной цепи (схема 1.14), если $R_1 = 3 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 6 \text{ Ом}$, $R_6 = 2 \text{ Ом}$.

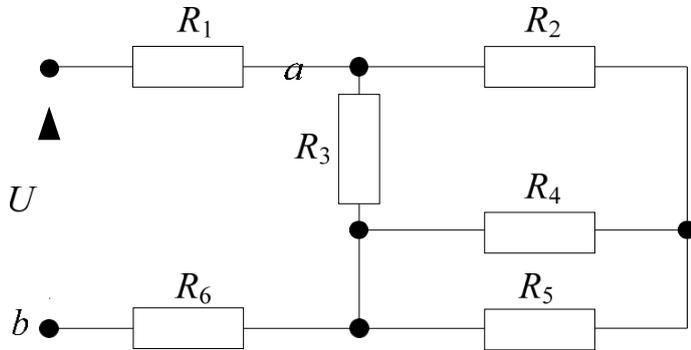


Схема 1.4

Задача 1.3. Определить эквивалентное сопротивление R_{ab} пассивной цепи (схема 1.15), если $R_1 = R_2 = R_3 = 3 \text{ Ом}$, $R_4 = R_5 = 3 \text{ Ом}$.

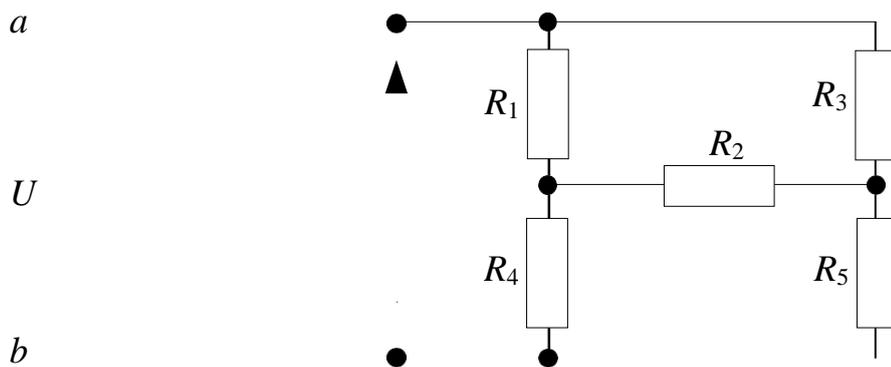


Схема 1.5

Задача 1.4. Определить ток I в цепи (схема 1.16), если ключ разомкнут $U = 100 \text{ В}$, $R_1 = 8 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 3 \text{ Ом}$.

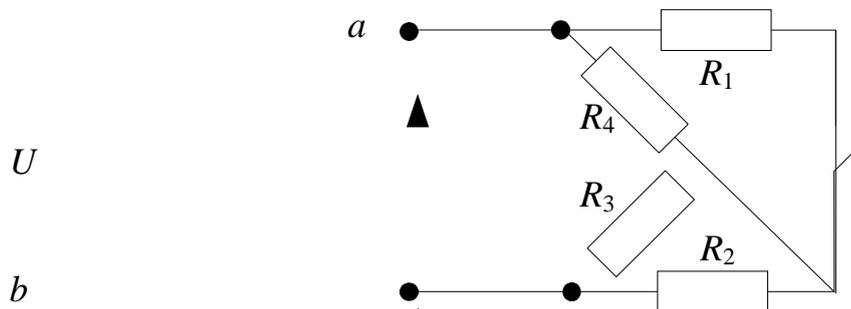


Схема 1.6

Задача 1.5. Определить входной ток в цепи (схема 1.17), если $E = 30 \text{ В}$, $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 4 \text{ Ом}$, $R_3 = 2 \text{ Ом}$, $R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 3 \text{ Ом}$.

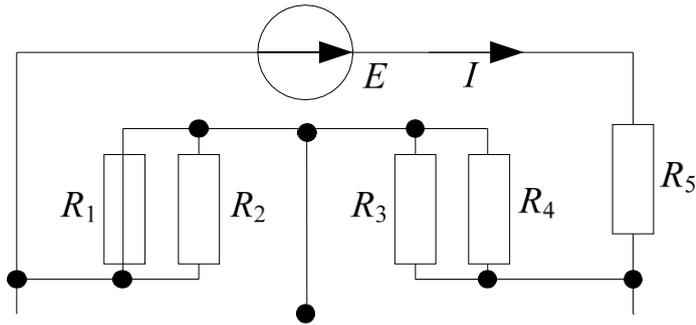


Схема 1.7

1.3. Индивидуальное задание №1 для самостоятельной работы «Расчет разветвленной цепи постоянного тока»

1. Составить систему уравнений для определения токов в ветвях методом законов Кирхгофа.
2. Преобразовать схему до двух контуров. Рассчитать токи во всех ветвях схемы:
 - методом контурных токов,
 - методом межузлового напряжения.
3. Составить баланс мощностей.
4. Рассчитать ток одной ветви без источника методом эквивалентного генератора.
5. Определить показание вольтметра в любой ветви.
6. Построить потенциальную диаграмму.

Таблица 1.1
Параметры источников

№	$E_1, В$	$E_2, В$	$J, А$
1	40	20	4
2	20	40	2
3	40	10	6
4	10	40	8
5	50	20	1
6	20	50	3
7	60	20	7
8	20	60	9
9	10	30	5
10	30	10	10

Таблица 1.2

Параметры элементов

№	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
1	5	2	10	5	6	8
2	2	1	30	10	10	2
3	4	5	3	3	4	2
4	6	3	5	5	10	5
5	2	1	30	10	10	2
6	6	8	5	10	9	4
7	4	2	6	6	8	5
8	3	1	2	8	10	4
9	5	4	1	4	5	8
10	3	4	10	4	6	3

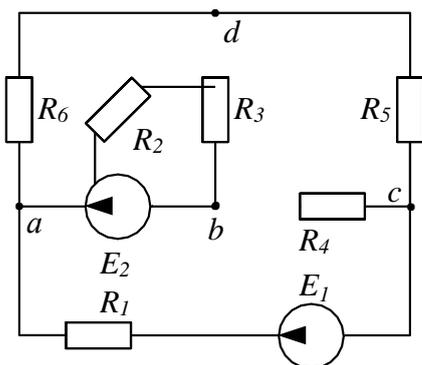
Окончание таб.1.1

Окончание таб.1.2

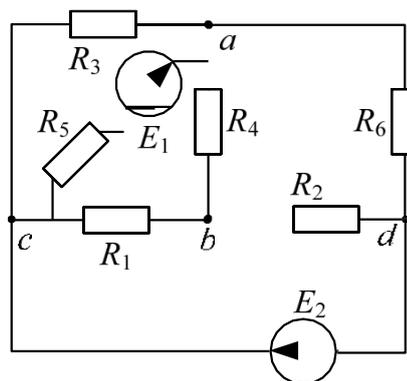
№	$E_1, В$	$E_2, В$	$J, А$	№	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$
11	10	50	4	11	6	7	8	6	3	5
12	50	10	2	12	7	8	9	10	5	7
13	60	10	6	13	6	7	10	5	3	2
14	10	60	8	14	7	9	6	10	8	6
15	10	70	1	15	6	8	9	5	7	9
16	70	10	3	16	8	9	10	7	5	6
17	80	20	7	17	7	8	6	9	5	10
18	20	80	9	18	6	9	10	5	7	8
19	80	10	5	19	7	8	9	10	5	7
20	10	80	10	20	6	7	9	8	10	8

Примечание: объем задания уточняет лектор.

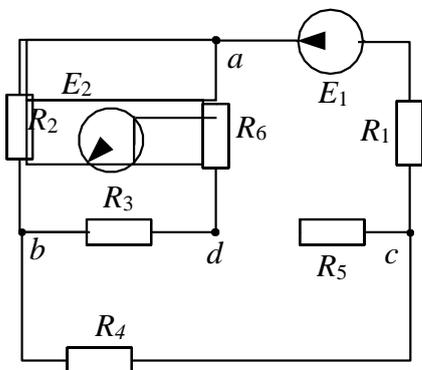
Схемы для расчетов



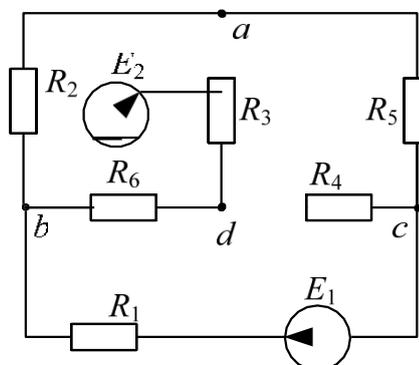
№ 1



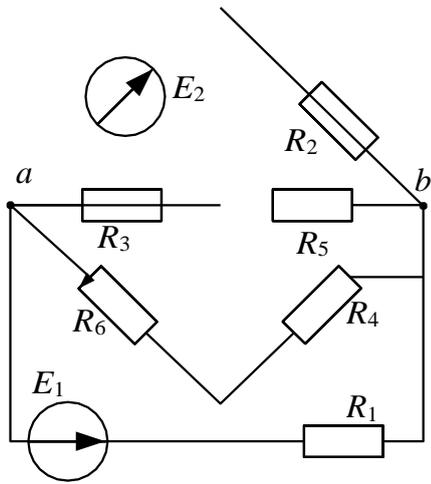
№ 2



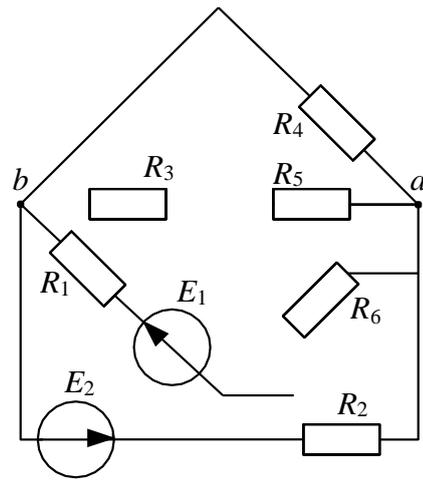
№ 3



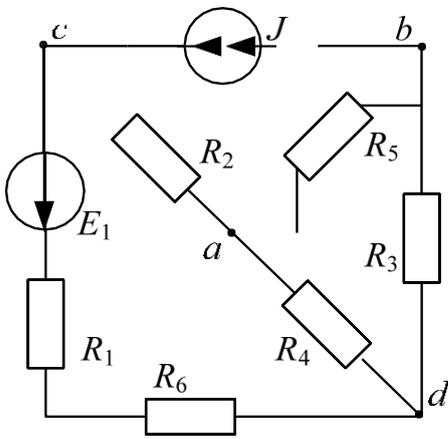
№ 4



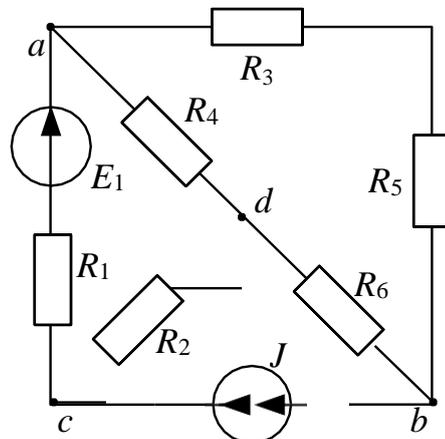
№ 5



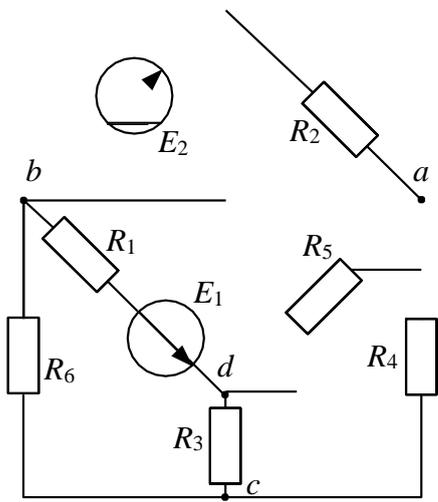
№ 6



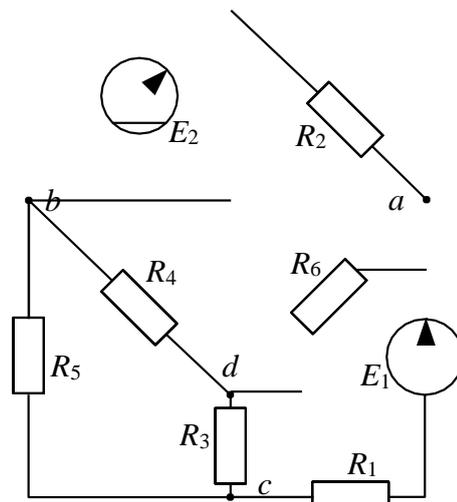
№ 7



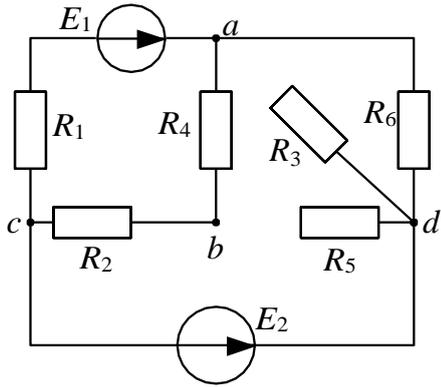
№ 8



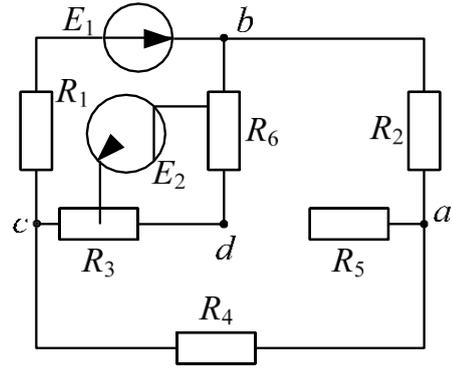
№ 9



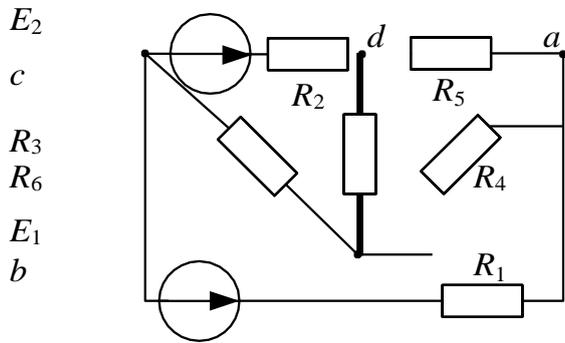
№ 10



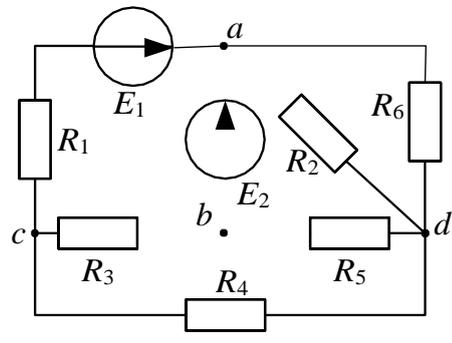
№ 11



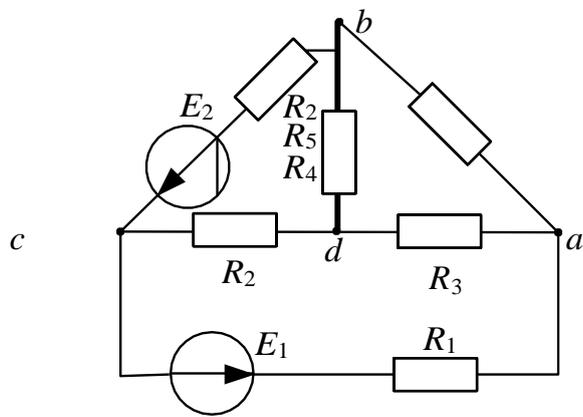
№ 12



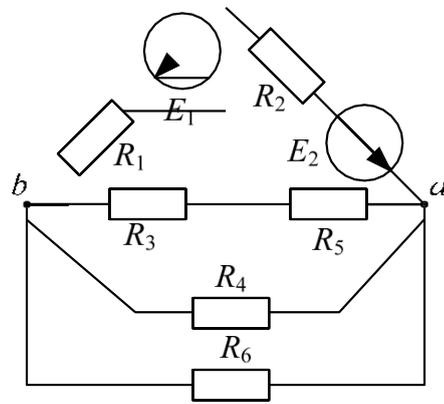
№ 13



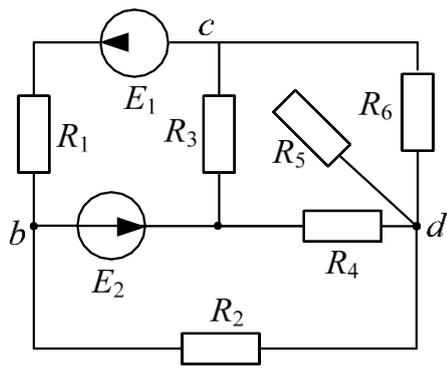
№ 14



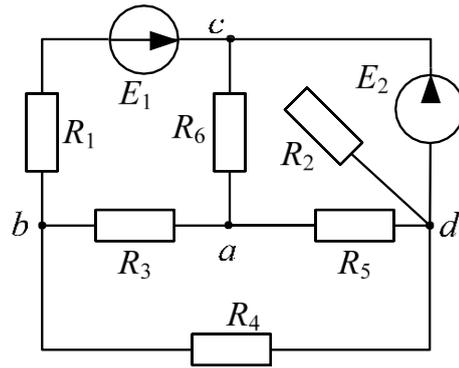
№ 15



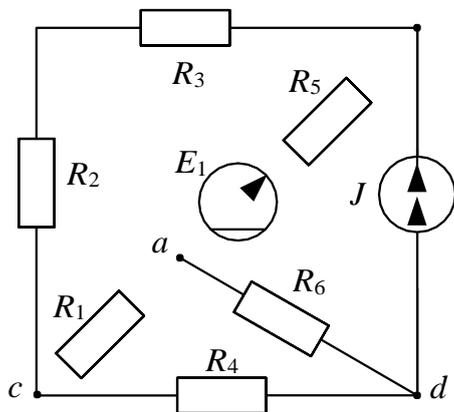
№ 16



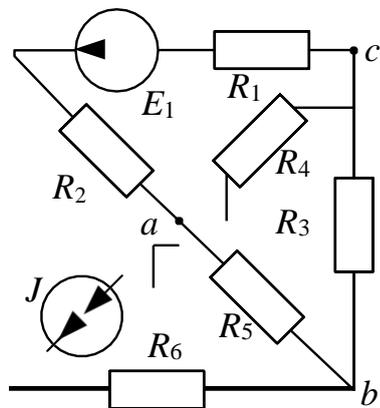
№ 17



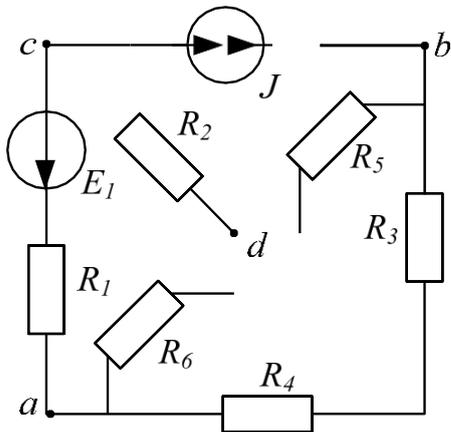
№ 18



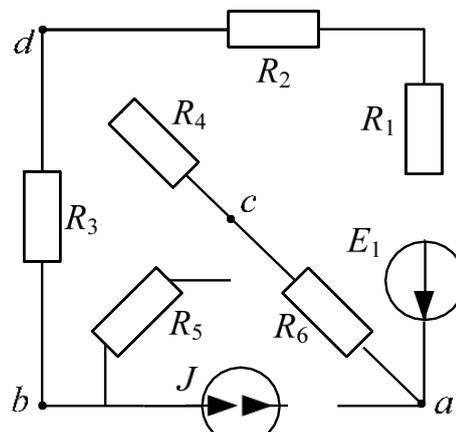
№ 19



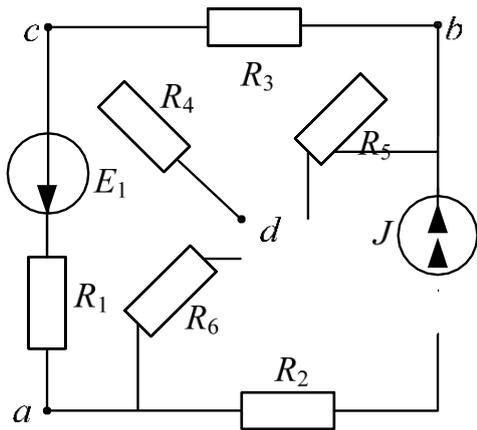
№ 20



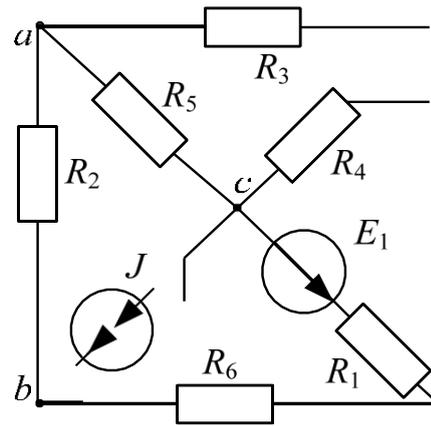
№ 21



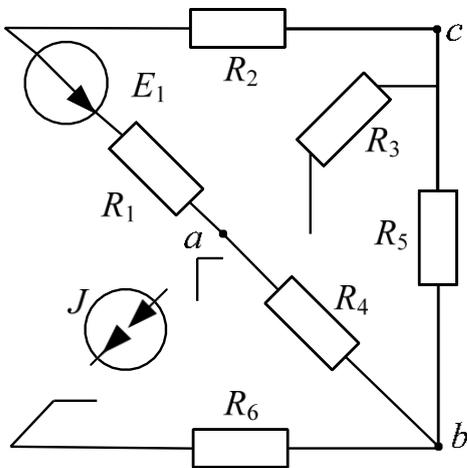
№ 22



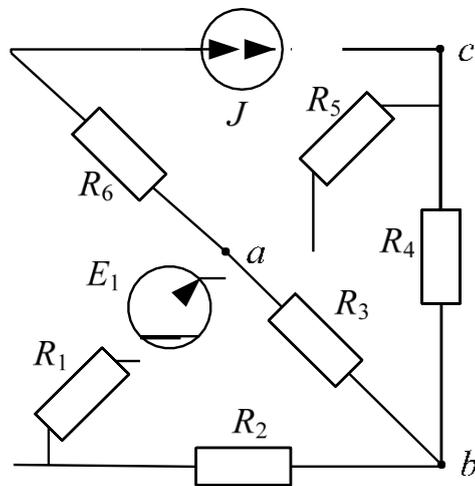
№ 23



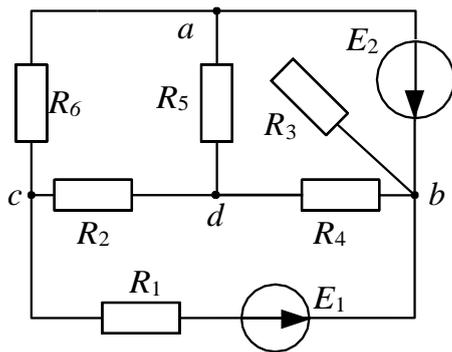
№ 24



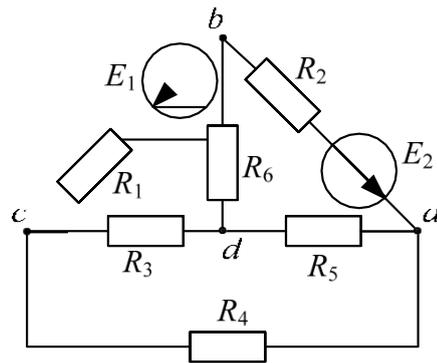
№ 25



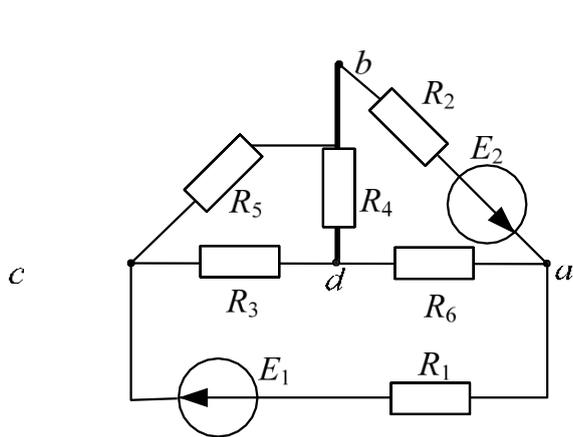
№ 26



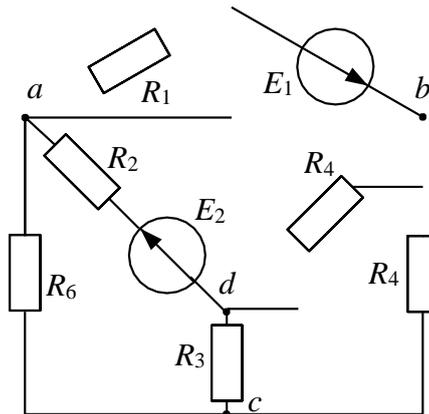
№ 27



№ 28



№ 29



№ 30

2. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

2.1. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.1. Определить мгновенное значение входного напряжения, если известны: угловая частота 10^4 рад/с, емкость конденсатора $C = 20$ мкФ и сопротивление приемника $R = 5$ Ом, схема 2.4 подключена к переменному току $i(t) = 4\sin(\omega t + 135^\circ)$, А.

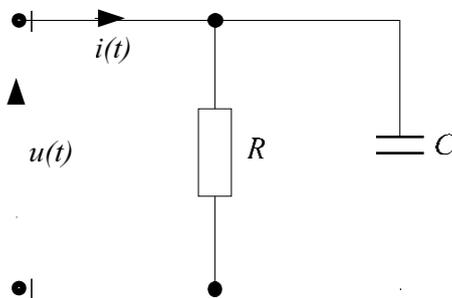


Схема 2.1

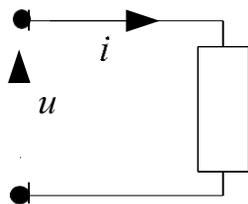
Задача 2.2. Записать действующее значение напряжения и тока в комплексной форме, если мгновенное значение описывается выражением $u = 100\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{4}\right)$, В, $i = 3\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$, А. Построить векторы U и I .

Найти сдвиг фаз между напряжением и током.

Задача 2.3. К приемнику с сопротивлением Z на схеме 2.5 приложено напряжение $u = 200\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$, В. Ток в этой цепи изменяется по закону:

$i = 4\sin(\omega t)$, А. Определить полное сопротивление синусоидаль-

ной цепи. Чему равны активная, реактивная и полная мощности?



Z

Схема 2.2

Задача 2.4. Дана схема 2.3 переменного тока с частотой 50 Гц. Приборы измерения показывают следующие данные: $U = 90\text{В}$, $I = 2\text{А}$, $P = 127\text{Вт}$. Определить активное сопротивление и индуктивность катушки.

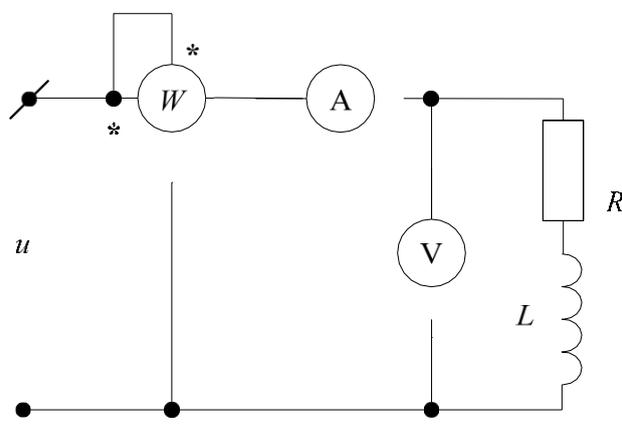


Схема 2.3

Задача 2.5. Конденсатор емкостью C и катушка с параметрами $R = 10\text{ Ом}$ и $L = 0,032\text{ Гн}$ включены последовательно к источнику синусоидального напряжения, действующее значение которого $U = 100\text{ В}$, при частоте 50 Гц. Определить емкость конденсатора, при которой в цепи возникнет резонанс напряжений и величину тока I .

2.2. Индивидуальное задание № 2 для самостоятельной работы «Расчет однофазной цепи переменного тока»

1. Согласно выбранному в таблице 2.1 варианту рассчитать комплексные сопротивления элементов (круговая частота $\omega = 314\text{ рад/с}$) цепи.

2. Согласно полученным сопротивлениям начертить комплексную расчетную схему, используя общую схему, представленную на рис. 2.13.

3. Выбрать любой метод расчета и определить в комплексной форме токи и напряжения во всех ветвях.

4. Проверить результаты расчета, рассчитав баланс мощности цепи.

5. Определить показание ваттметра.

6. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений, соответствующую рассчитанной схеме (построение диаграмм следует выполнить в одних осях).

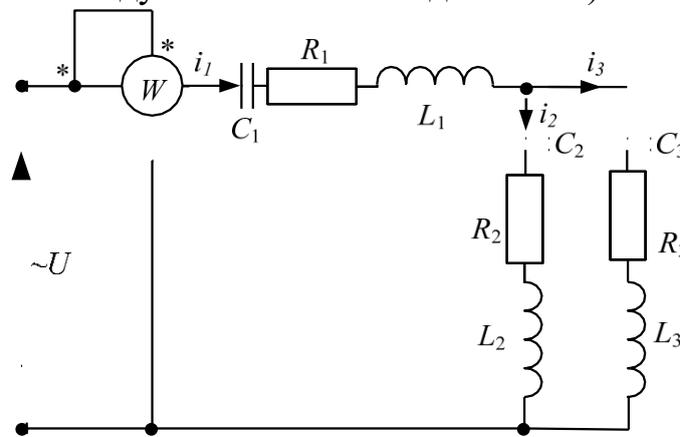


Рис.2.4. Общая схема задания

Таблица 2.1

Исходные данные параметров схемы

№		$R_1,$	$R_2,$	$R_3,$	$L_1,$	$L_2,$	$L_3,$	$C_1,$	$C_2,$	$C_3,$
		ОМ	ОМ	ОМ	мГн	мГн	мГн	мкФ	мкФ	мкФ
1	$\dot{U} = 70,7 \cdot e^{j45^\circ}, \text{ B}$	13	0	0	0	32	0	∞	∞	64
2	$\dot{I}_2 = 2,1 \cdot e^{-j92^\circ}, \text{ A}$	20	51	24	32	0	0	∞	∞	∞
3	$\dot{U} = 80 \cdot e^{j60^\circ}, \text{ B}$	0	25	50	175	0	0	∞	∞	∞
4	$\dot{U} = 25 \cdot e^{j35^\circ}, \text{ B}$	0	25	60	48	0	0	106	∞	∞
5	$\dot{U} = 282 \cdot e^{-j45^\circ}, \text{ B}$	0	47	23	0	0	0	64	∞	∞
6	$\dot{I}_3 = 1 \cdot e^{-j62^\circ}, \text{ A}$	50	55	100	0	0	0	70	∞	∞
7	$\dot{I}_2 = 10 \cdot e^{j80^\circ}, \text{ A}$	61	0	0	0	0	64	∞	106	∞
8	$\dot{I}_2 = 9 \cdot e^{j90^\circ}, \text{ A}$	0	25	50	0	0	207	∞	∞	∞
9	$\dot{I}_3 = 4 \cdot e^{-j30^\circ}, \text{ A}$	0	72	3	83	0	0	∞	∞	∞
10	$\dot{U} = 100 \cdot e^{j60^\circ}, \text{ B}$	7	0	0	0	0	0	∞	318,5	159,2
11	$\dot{U} = 200 \cdot e^{j0^\circ}, \text{ B}$	0	0	52	0	120	0	91	∞	∞
12	$\dot{I}_2 = 3 \cdot e^{-j45^\circ}, \text{ A}$	0	0	25	0	24	0	∞	132	∞
13	$\dot{U} = 59 \cdot e^{j73^\circ}, \text{ B}$	8	0	0	0	32	128	∞	∞	∞
14	$\dot{U} = 100 \cdot e^{j0^\circ}, \text{ B}$	0	0	44	0	0	0	32	159	∞
15	$\dot{U} = 87 \cdot e^{-j25^\circ}, \text{ B}$	0	44	0	41	0	121	∞	∞	∞
16	$\dot{U} = 60 \cdot e^{-j30^\circ}, \text{ B}$	0	25	40	0	80	0	∞	∞	∞
17	$\dot{I}_2 = 7 \cdot e^{-j106^\circ}, \text{ A}$	0	0	23	70	32	0	∞	∞	∞
18	$\dot{U} = 125 \cdot e^{j30^\circ}, \text{ B}$	0	40	100	0	0	0	∞	80	∞
19	$\dot{I}_2 = 4 \cdot e^{j35^\circ}, \text{ A}$	4	0	0	0	48	16	∞	∞	∞
20	$\dot{I}_2 = 3 \cdot e^{-j45^\circ}, \text{ A}$	0	25	40	0	0	0	∞	∞	80
21	$\dot{U} = 120 \cdot e^{j0^\circ}, \text{ B}$	0	28	0	137	0	0	∞	∞	177
22	$\dot{U} = 120 \cdot e^{j60^\circ}, \text{ B}$	0	70	0	0	0	80	∞	∞	80
23	$\dot{I}_2 = 2 \cdot e^{-j22^\circ}, \text{ A}$	0	30	0	0	0	223	48	∞	∞
24	$\dot{I}_3 = 6 \cdot e^{j130^\circ}, \text{ A}$	0	0	0	76	0	191	∞	90	∞
25	$\dot{I}_3 = 1 \cdot e^{j100^\circ}, \text{ A}$	0	15	0	0	0	0	57	∞	100
26	$\dot{U} = 60 \cdot e^{j45^\circ}, \text{ B}$	15	0	0	0	40	0	∞	∞	64
27	$\dot{I}_3 = 5 \cdot e^{-j87^\circ}, \text{ A}$	0	0	23	70	32	0	∞	∞	∞
28	$\dot{I}_3 = 5 \cdot e^{j45^\circ}, \text{ A}$	0	35	40	0	0	80	∞	∞	∞
29	$\dot{U} = 40 \cdot e^{j35^\circ}, \text{ B}$	7	0	0	0	32	64	∞	∞	∞

30	$\dot{I}_2 = 3 \cdot e^{j22^\circ}, \text{ A}$	15	0	0	0	0	0	∞	318,5	159,2
----	--	----	---	---	---	---	---	----------	-------	-------

Примечание: объем задания уточняет лектор.

3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

3.1. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.1. К симметричному трехфазному генератору с линейным напряжением, измеряемым вольтметром $\dot{U}_\Pi = 127 \text{ В}$ подключена симметричная нагрузка $\underline{Z} = 10 \cdot e^{j30^\circ}, \text{ Ом}$, соединенная треугольником (рис. 3.1). Определить ток амперметра.

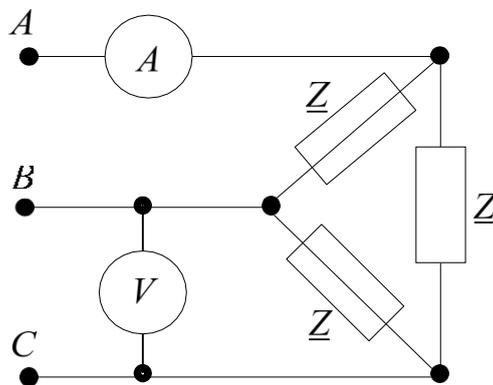


Рис. 3.1. Расчетная схема

Задача 3.2. В трехфазной цепи (рис. 3.2) с параметрами $R = 10 \text{ Ом}$, $x_L = x_C = 10 \text{ Ом}$ вольтметр показывает 220 В. Определить показание амперметра.

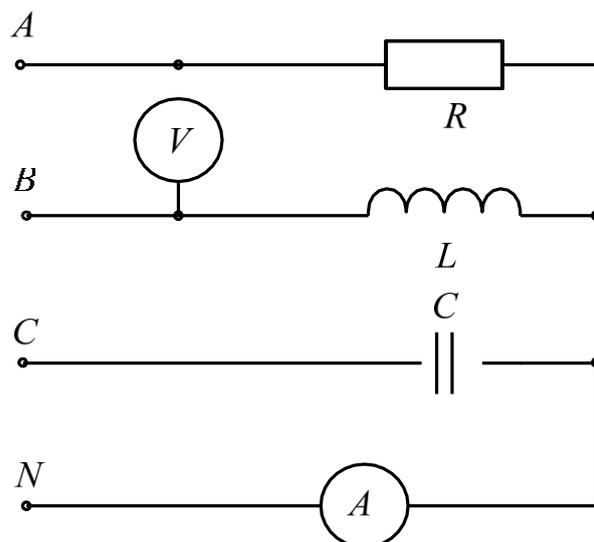


Рис. 3.2. Расчетная схема

Задача 3.3. В симметричной трехфазной цепи (рис. 3.1) с активной нагрузкой известно линейное напряжение $U_{\text{л}} = 100 \text{ В}$ и сопротивление каждой фазы $\underline{Z} = (5 + j8,66)$, Ом. Показание второго ваттметра. Определить показания первого W_1 и второго W_2 ваттметров, полную мощность цепи.

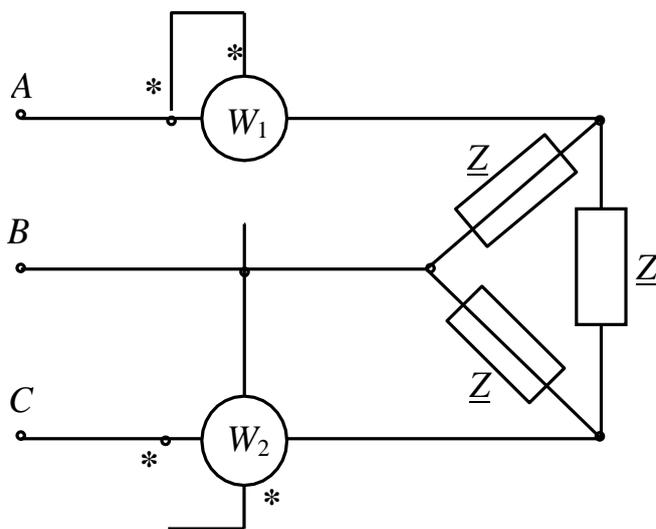


Рис. 3.3. Расчетная схема

Задача 3.4. Чему равно показание ваттметра, включенного в симметричную трехфазную цепь (рис. 3.4). Нагрузка фаз $\underline{Z} = (4 + j3)$, Ом, линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$.

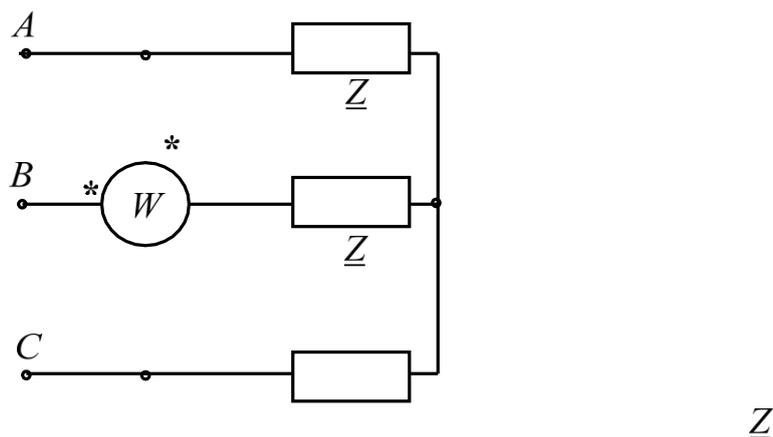


Рис. 3.4. Расчетная схема

Задача 3.5. К сети с $U_{\text{л}} = 200 \text{ В}$ подключены 3 группы ламп. Количество ламп $n_1 = 3$, $n_2 = 4$, $n_3 = 2$. Определить ток линии A, если сопротивление каждой лампы 300 Ом.

A

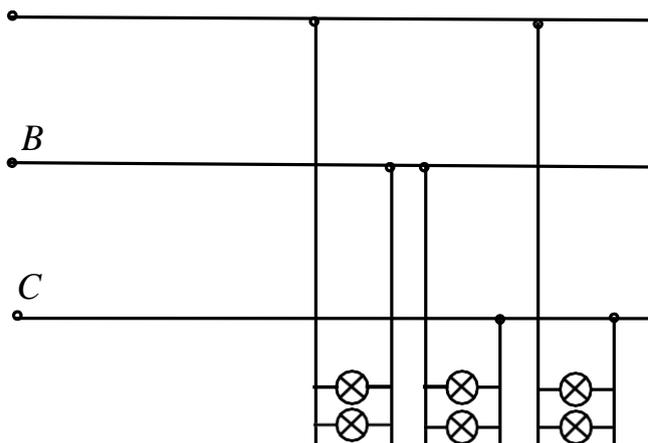


Рис. 3.5. Расчетная схема

3.2. Индивидуальное задание №3 для самостоятельного решения «Расчет трехфазной цепи переменного тока»

Трехфазный генератор создает симметричную систему ЭДС с прямой последовательностью чередования фаз:

$$e_A(t) = E_m \cdot \sin \omega t,$$

$$e_B(t) = E_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ),$$

$$e_C(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ).$$

1. Рассчитать в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на элементах цепи.

2. Определить активную и реактивную мощности источников ЭДС и сравнить их с суммой активных и реактивных мощностей пассивных элементов цепи.

3. Построить векторные диаграммы токов и топографические диаграммы напряжений:

а) для симметричной части приемника; б) для несимметричной части приемника.

Векторная диаграмма токов каждой части приемника должна быть совмещена на одном графике с соответствующей топографической диаграммой напряжений.

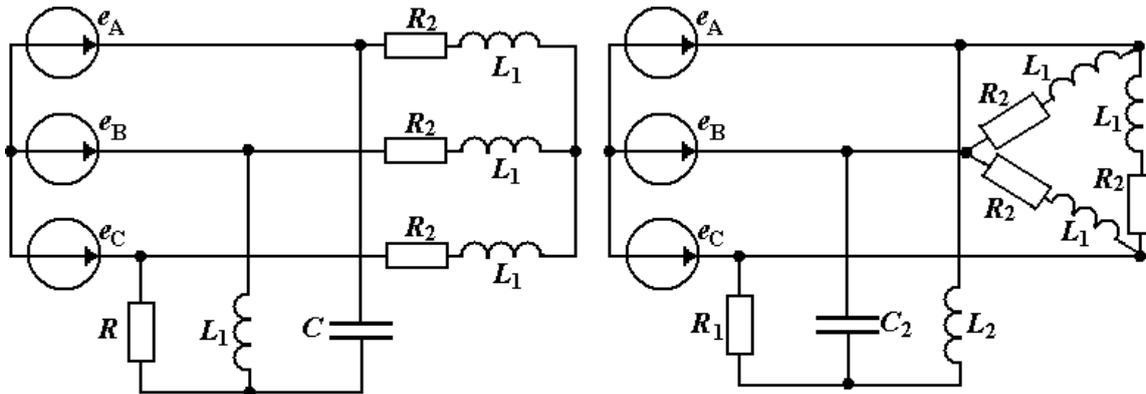
Таблица 3.1
Параметры расчетных схем

№	E , В	f , Гц	R , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L , Гн	L_1 , Гн	L_2 , Гн	C , мкФ	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
1	110	330	23	46	16	0,01	0,017	0,011	5	9	11
2	120	320	15	44	13	0,01	0,017	0,011	11	5	9
3	130	310	12	43	10	0,01	0,017	0,011	9	11	5
4	140	300	18	25	20	0,01	0,017	0,011	7	12	8
5	150	290	16	36	15	0,01	0,017	0,011	12	8	7
6	160	280	25	40	19	0,01	0,013	0,018	8	7	12
7	170	270	14	18	21	0,01	0,013	0,018	15	11	13
8	180	260	32	23	25	0,012	0,013	0,018	11	13	15
9	190	250	40	24	30	0,012	0,013	0,018	13	15	11
10	200	240	38	26	29	0,012	0,01	0,018	18	20	22
11	220	230	29	29	31	0,012	0,01	0,11	20	22	18
12	230	220	45	27	33	0,012	0,01	0,11	22	18	20
13	240	210	61	25	39	0,015	0,01	0,11	26	17	29
14	250	200	25	31	34	0,015	0,01	0,11	17	29	26
15	260	190	27	33	36	0,015	0,019	0,11	29	26	17
16	270	180	26	35	38	0,015	0,019	0,13	15	25	20
17	280	170	33	37	40	0,015	0,019	0,13	20	15	25
18	290	160	30	39	41	0,015	0,019	0,13	25	20	15
19	300	150	34	41	46	0,015	0,019	0,13	18	23	30
20	310	140	42	44	43	0,1	0,17	0,13	23	30	18
21	320	130	40	43	55	0,1	0,17	0,2	30	18	23
22	330	120	53	46	59	0,1	0,17	0,2	27	21	24

№	E , В	f , Гц	R , Ом	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L , Гн	L_1 , Гн	L_2 , Гн	C , мкФ	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
23	340	110	55	49	51	0,1	0,17	0,2	24	27	21
24	350	100	57	50	53	0,14	0,17	0,2	21	24	27
25	360	90	46	52	60	0,14	0,25	0,2	31	33	22
26	370	80	47	55	62	0,14	0,17	0,25	22	31	33
27	380	70	43	57	64	0,14	0,17	0,25	33	22	31
28	390	60	62	53	66	0,14	0,17	0,25	40	34	50
29	400	50	66	59	69	0,16	0,17	0,25	50	40	34
30	410	40	63	60	65	0,16	0,17	0,25	34	50	40

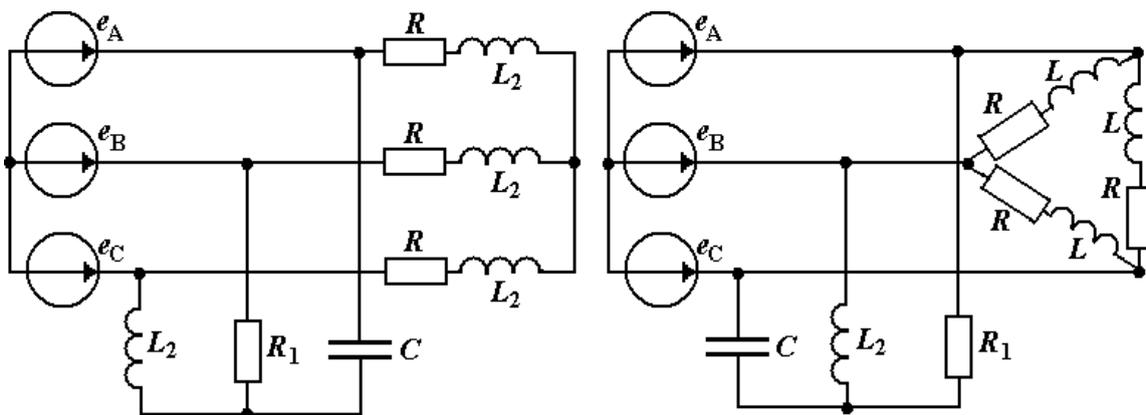
Примечание: объем задания уточняет лектор.

Схемы для расчетов



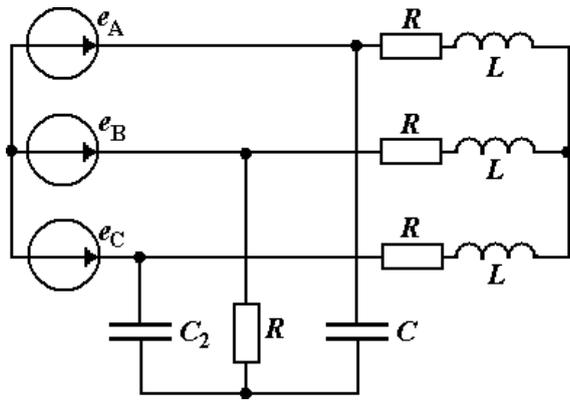
№ 1

№ 2

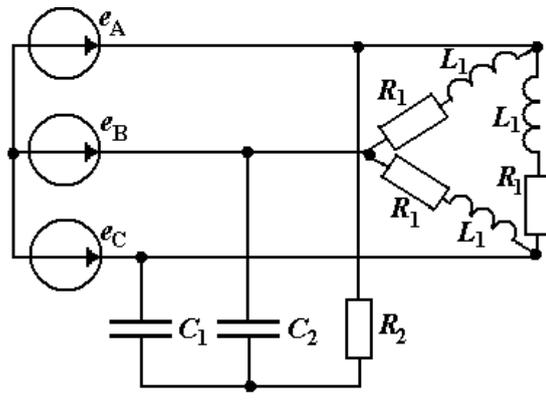


№ 3

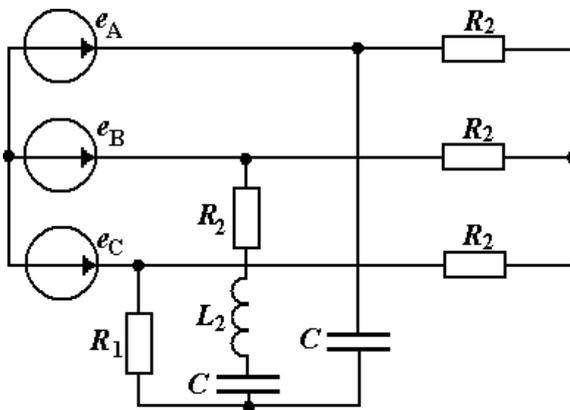
№ 4



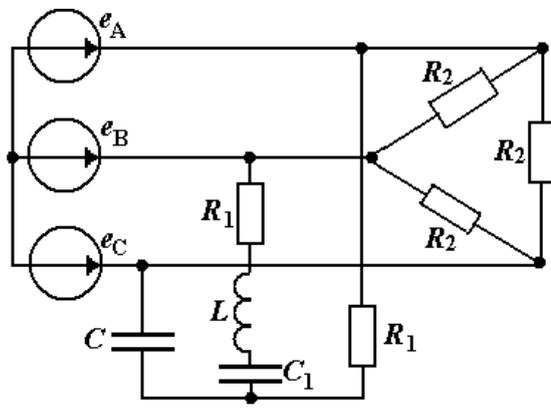
№ 5



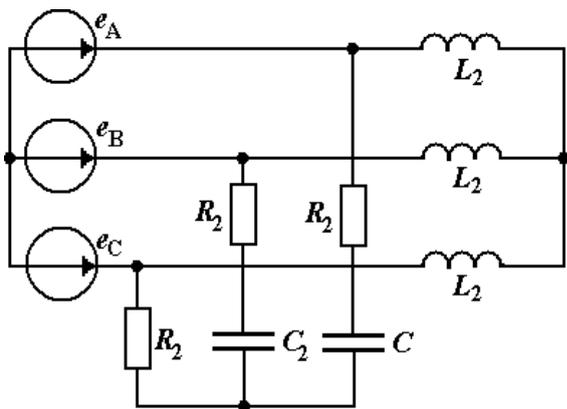
№ 6



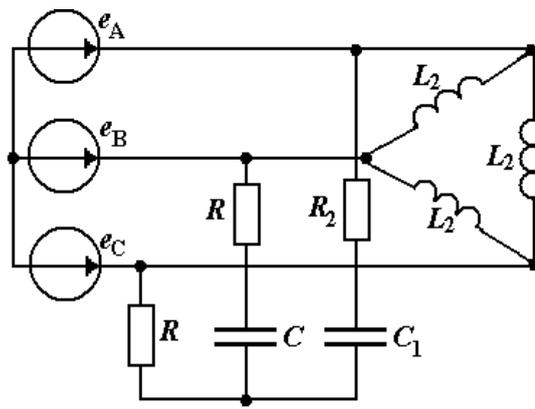
№ 7



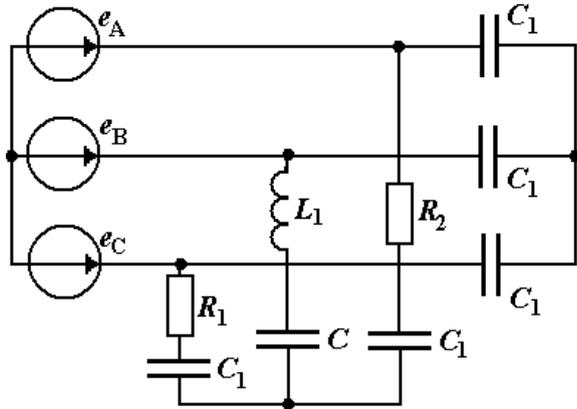
№ 8



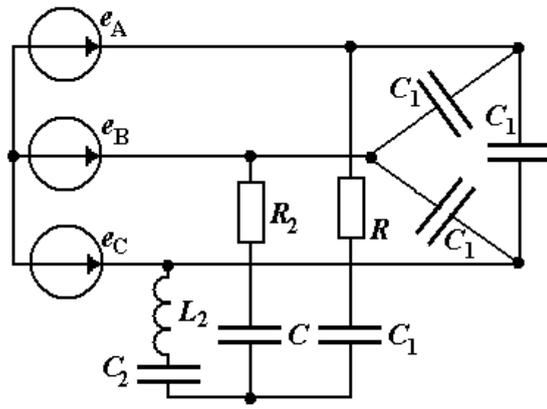
№ 9



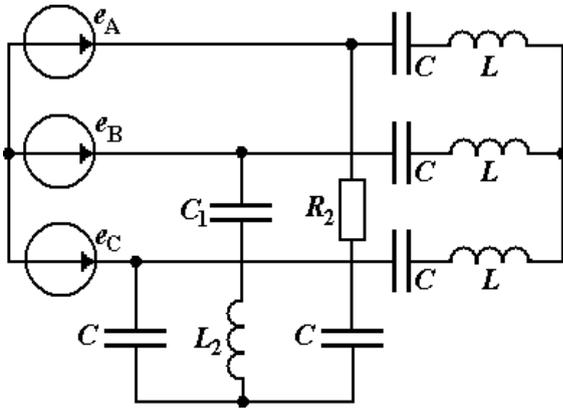
№ 10



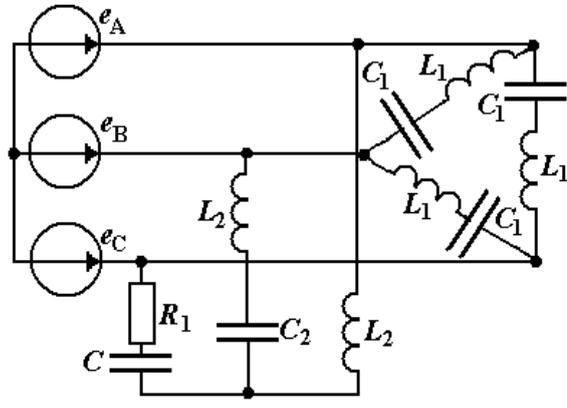
№ 11



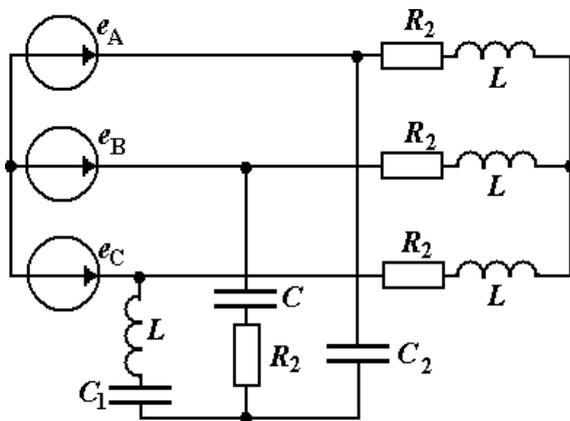
№ 12



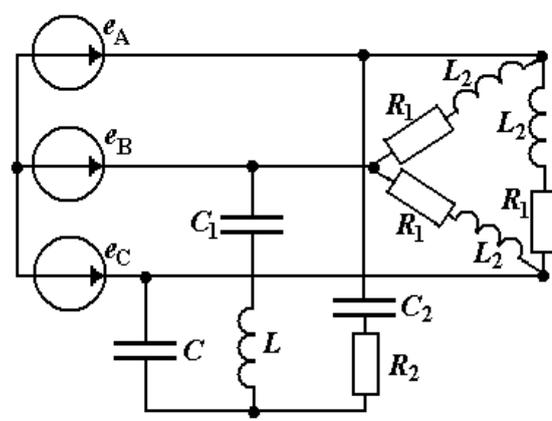
№ 13



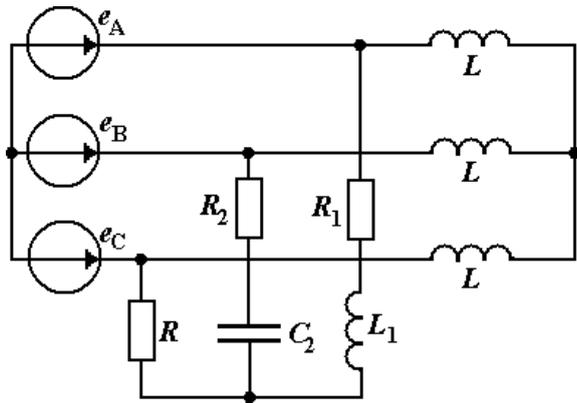
№ 14



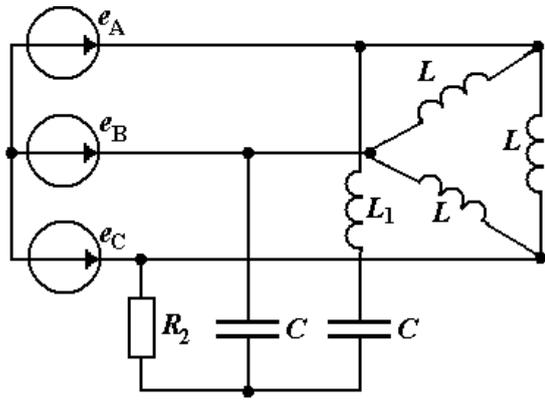
№ 15



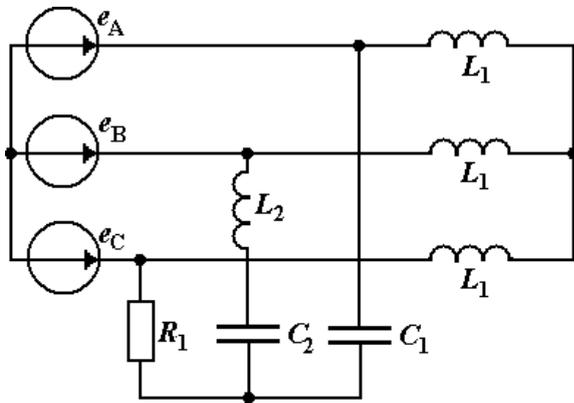
№ 16



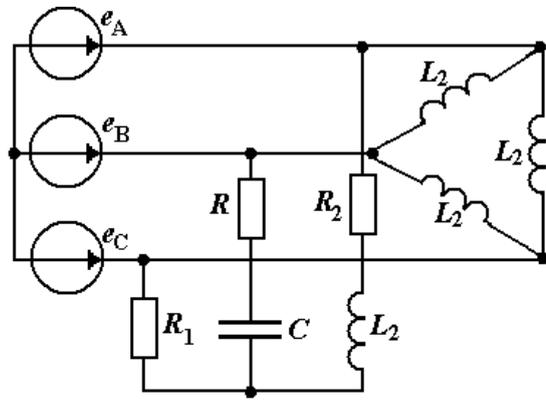
№ 17



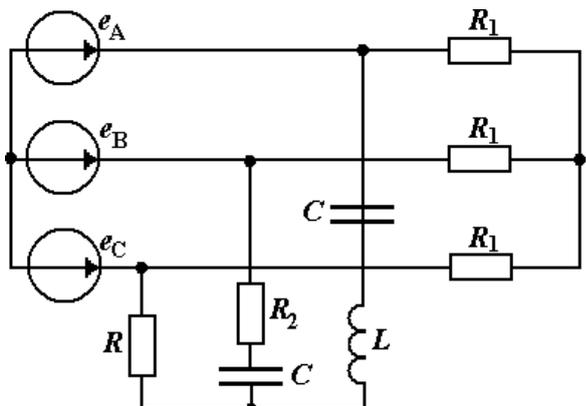
№ 18



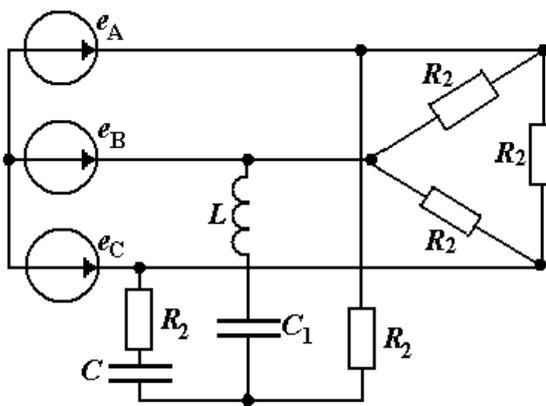
№ 19



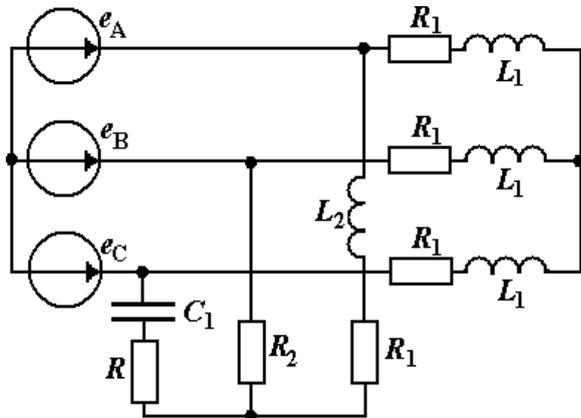
№ 20



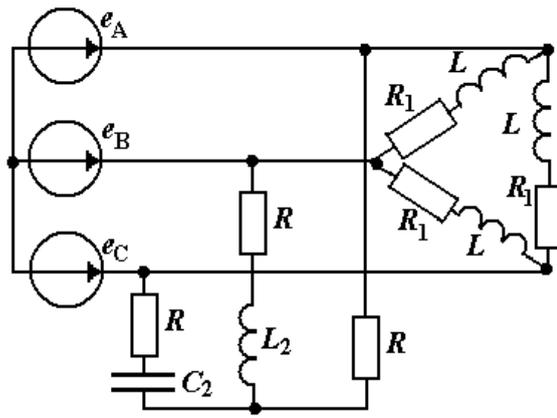
№ 21



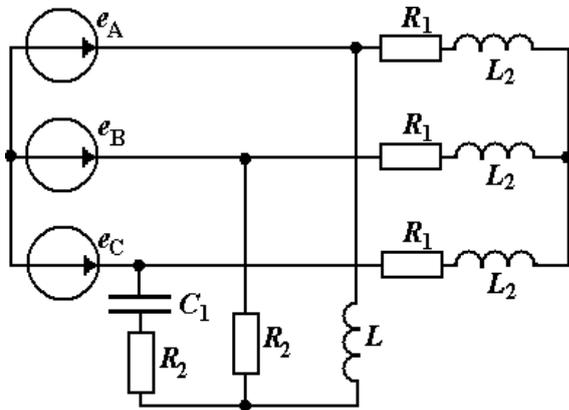
№ 22



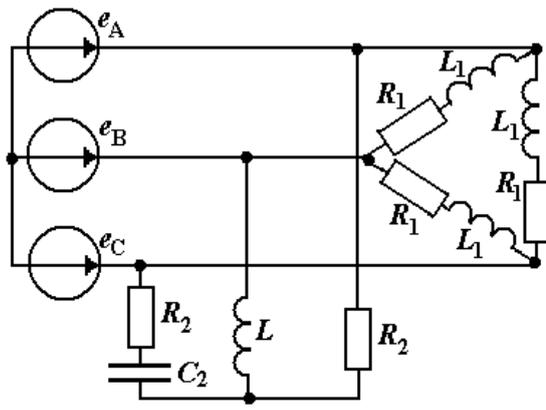
№ 23



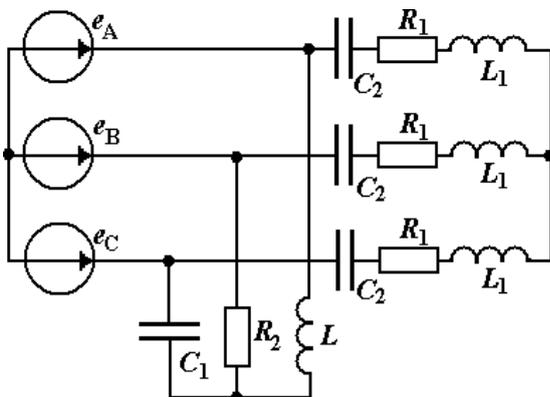
№ 24



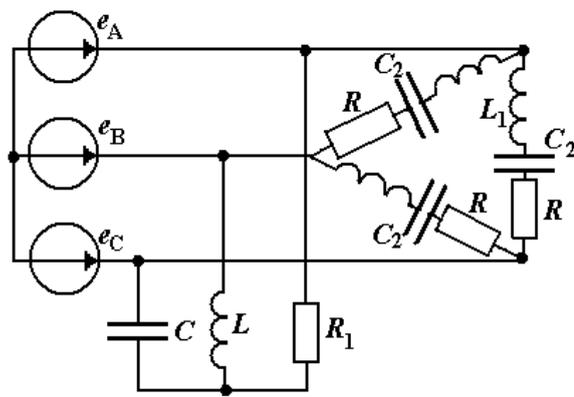
№ 25



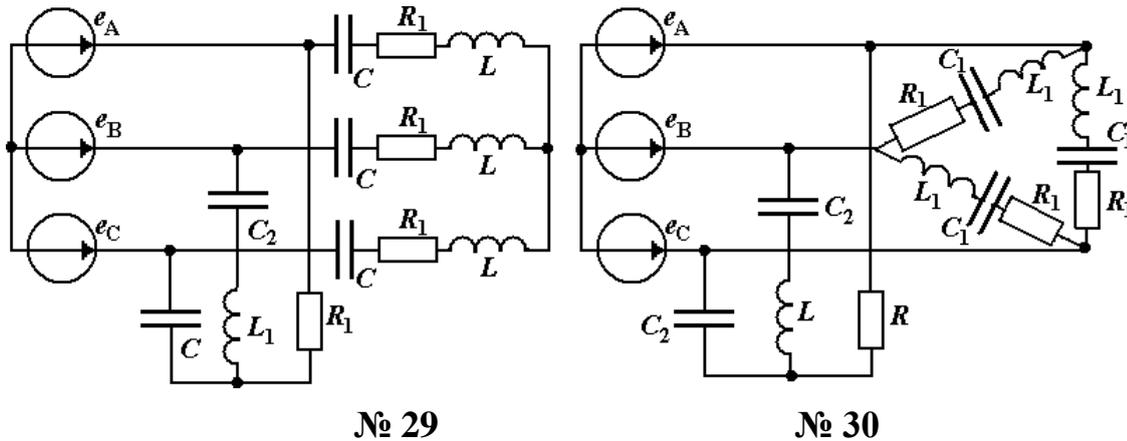
№ 26



№ 27



№ 28



4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Примеры решения задач

Пример 4.1. Трехфазный трансформатор имеет: номинальную мощность $S_{\text{НОМ}} = 1600 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальное первичное $U_{1\text{НОМ}} = 10 \text{ кВ}$ и вторичное $U_{2\text{НОМ}} = 0,4 \text{ кВ}$ напряжения, максимальное значение магнитной индукции в стержне $B_{\text{макс}} = 1,55 \text{ Тл}$, ЭДС одного витка $E_{\text{ВИТ}} = 5 \text{ В}$. Частота переменного тока сети $f = 50 \text{ Гц}$, соединение обмоток трансформатора Y/Y , коэффициент заполнения стержня сталью $k_{\text{ст}} = 0,97$.

Определить: число витков в обмотках; максимальное значение основного магнитного потока; площадь поперечного сечения стержня; номинальный ток во вторичной цепи; коэффициент трансформации.

Решение.

$$\text{Коэффициент трансформации } n = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{10}{0,4} = 25.$$

Номинальный ток во вторичной цепи

$$I_{2\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}} = \frac{1600}{1,73 \cdot 0,4} = 2312,14 \text{ А}.$$

Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\text{макс}} = \frac{E_{\text{ВИТ}}}{4,44 \cdot f \cdot w} = \frac{5}{4,44 \cdot 50 \cdot 1} = 0,0225 \text{ Вб}.$$

Площадь поперечного сечения стержня

$$Q_{\text{ст}} = \frac{\Phi_{\text{макс}}}{B_{\text{макс}} \cdot k_{\text{ст}}} = \frac{0,225}{1,55 \cdot 0,97} = 0,01497 \text{ м}^2.$$

Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_{\text{max}}} = \frac{400}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225} = 80 \text{ ВИТКОВ.}$$

Число витков первичной обмотки $w_1 = w_2 \cdot n = 80 \cdot 25 = 2000$ витков.

Замечание: ЭДС одного витка можно найти: $E_{\text{ВИТ}} = \frac{U_{2\text{НОМ}}}{w_2} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{w_1}$.

Пример 4.2. Трехфазный трансформатор имеет: номинальное напряжение $U_{1\text{НОМ}} = 127 \text{ В}$, ток холостого хода $I_{0\text{НОМ}} = 20,5 \text{ А}$, коэффициент мощности холостого хода $\cos\varphi_{0\text{НОМ}} = 0,08$. Соединение обмоток трансформатора Y/Y . Частота переменного тока сети $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить параметры намагничивающего контура.

Решение: Полное сопротивление ветви намагничивания

$$Z_m = \frac{U_{10}}{I_0} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_0} = \frac{127}{20,5} = 6,2 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление намагничивающего контура R_m :

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} = Z_m \cdot \cos\varphi_{0\text{НОМ}} = 6,2 \cdot 0,08 = 0,49 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление:

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{6,2^2 - 0,49^2} = 6,18 \text{ Ом}$$

Пример 4.3. Трехфазный трансформатор имеет: номинальную мощность $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальное первичное напряжение $U_{1\text{НОМ}} = 0,5 \text{ кВ}$, номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{НОМ}} = 0,23 \text{ кВ}$, напряжение короткого замыкания $u_k\% = 5,5\%$, ток холостого хода $i_0\% = 6,5\%$, мощности холостого хода $P_0 = 0,65 \text{ кВт}$ и короткого замыкания $P_k = 2 \text{ кВт}$, коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = 0,8$ (характер нагрузки реактивный). Соединение обмоток трансформатора Y/Y . Частота переменного тока сети $f = 50 \text{ Гц}$.

Определить: номинальный ток первичной цепи; ток холостого хода; коэффициент мощности холостого хода и короткого замыкания; напряжение короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие; сопротивление короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие; коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке и максимальный КПД; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки.

Построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(\beta)$ при номинальной нагрузке.

Решение. Номинальный ток первичной цепи (ток короткого замыкания)

$$I_{1к} = I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{100 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 0,5 \cdot 10^3} = 115,6 \text{ А.}$$

Напряжение короткого замыкания

$$U_{к} = \left(u_{к} \% \left| \begin{array}{l} \\ 100 \end{array} \right. \right) \cdot U_{1ном} = \left(5,5 \left| \begin{array}{l} \\ 100 \end{array} \right. \right) \cdot 500 = 27,5 \text{ В.}$$

Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi = \frac{P_{к}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot I_{1к}} = \frac{2000}{1,73 \cdot 27,5 \cdot 115,6} = 0,36;$$

$$\varphi_{к} = 69^{\circ}; \sin \varphi_{к} = 0,93.$$

Активная и реактивная составляющие напряжение короткого замыкания

$$u_{к,а} = u_{к} \% \cdot \cos \varphi_{к} = 5,5 \cdot 0,36 = 1,98\%,$$

$$u_{к,р} = u_{к} \% \cdot \sin \varphi_{к} = 5,5 \cdot 0,93 = 5,1\%.$$

Полное сопротивление короткого замыкания

$$\frac{U_{к}}{Z_{к}} = \frac{27,5}{\sqrt{3} \cdot I_{1к}} = \frac{27,5}{1,73 \cdot 115,6} = 0,137 \text{ Ом.}$$

Активная и реактивная составляющие сопротивление короткого замыкания

$$r_{к} = Z_{к} \cdot \cos \varphi_{к} = 0,137 \cdot 0,36 = 0,05 \text{ Ом,}$$

$$x_{к} = Z_{к} \cdot \sin \varphi_{к} = 0,137 \cdot 0,93 = 0,13 \text{ Ом.}$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \left(i_0 \% \left| \begin{array}{l} \\ 100 \end{array} \right. \right) \cdot I_{1ном} = \left(6,5 \left| \begin{array}{l} \\ 100 \end{array} \right. \right) \cdot 115,6 = 7,5 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot I_0} = \frac{650}{1,73 \cdot 500 \cdot 7,5} = 0,10.$$

Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке (коэффициент нагрузки $\beta = 1$)

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{к}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{1 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{1 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 0,65 \cdot 10^3 + 1^2 \cdot 2 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 96,7\% \end{aligned}$$

Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД:

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_0}{P_{к}}} = \sqrt{\frac{0,65}{2}}$$

Максимальный КПД

$$\eta_{\max} = \frac{\beta' \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2}{\beta' \cdot S_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_2 + 2 \cdot P_0} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,65 \cdot 10^3} \cdot 100\% = 97,2\%$$

Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки (реактивная нагрузка).

Для индуктивного характера нагрузки: $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\sin\varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{\text{к.а}} \cdot \cos\varphi_2 + u_{\text{к.р}} \cdot \sin\varphi_2 = 1,98 \cdot 0,8 + 5,1 \cdot 0,6 = 4,64\%$$

Для емкостного характера нагрузки: $\cos\varphi_2 = 0,8$ и $\sin\varphi_2 = -0,6$

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{\text{к.а}} \cdot \cos\varphi_2 + u_{\text{к.р}} \cdot \sin\varphi_2 = 1,98 \cdot 0,8 + 5,1 \cdot (-0,6) = -1,476\%$$

Для построения внешней характеристики найдем значение вторичного напряжения при номинальной нагрузке:

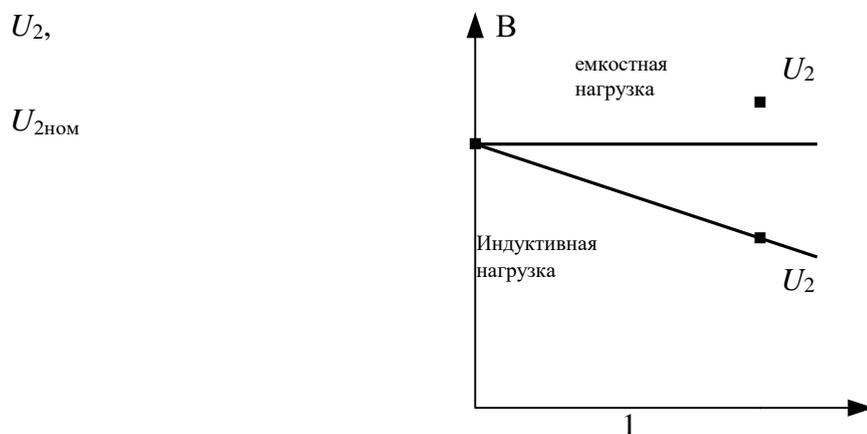
для индуктивной нагрузки

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{100} \cdot U_{2\text{ном}} = 230 - \frac{4,64}{100} \cdot 230 = 219,328 \text{ В,}$$

для емкостной нагрузки

$$U_2 = U_{2\text{ном}} - \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{100} \cdot U_{2\text{ном}} = 230 - \frac{(-1,476)}{100} \cdot 230 = 233,395 \text{ В.}$$

Внешняя характеристика:



4.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.1. Номинальные значения первичного и вторичного напряжения однофазного трансформатора $U_{1\text{ном}} = 110 \text{ кВ}$ и $U_{2\text{ном}} = 6,3 \text{ кВ}$, номинальный первичный ток $I_{1\text{ном}} = 95,5 \text{ А}$. Определить номинальную мощность трансформатора и номинальный вторичный ток.

Задача 4.2. В однофазном трансформаторе номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 100$ кВА, номинальными напряжениями $U_{1\text{ном}} = 6$ кВ и $U_{2\text{ном}} = 0,4$ кВ, максимальное значение магнитной индукции в стержне $B_{\text{max}} = 1,4$ Тл, ЭДС одного витка $E_{\text{вит}} = 5$ В. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц, коэффициент заполнения стержня сталью $k_{\text{ст}} = 0,93$. Определить число витков в обмотках, номинальные значения токов в обмотках, площадь поперечного сечения.

Задача 4.3. Трехфазный трансформатор имеет: номинальную мощность $S_{\text{ном}} = 25$ кВ·А, номинальное первичное напряжение $U_{1\text{ном}} = 10$ кВ, напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}} \% = 4,5\%$, ток холостого хода $i_0 \% = 3,2\%$, мощности холостого хода $P_0 = 0,13$ кВт и короткого замыкания $P_{\text{к}} = 0,6$ кВт. Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц. Определить полное сопротивление короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие; параметры намагничивающего контура.

Задача 4.4. Трехфазный трансформатор имеет: номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}} = 0,4$ кВ, напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}} \% = 6,5\%$, коэффициент мощности короткого замыкания $\cos\varphi_{\text{к}} = 0,31$; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = 0,8$ (характер нагрузки емкостный). Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц. Определить номинальное изменение вторичного напряжения (%) и значение вторичного напряжения (В) при номинальной емкостной нагрузке.

Задача 4.5. Задана полная номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_{\text{ном}} = 100$ кВА, номинальные мощности холостого хода $P_0 = 0,465$ кВт и короткого замыкания $P_{\text{к}} = 1,97$ кВт, коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2 = 0,8$. Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц. Определить коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке и максимальный КПД.

4.3. Индивидуальное задание № 4 для самостоятельной работы «Расчет параметров трансформатора»

Задание 1. Трехфазный трансформатор имеет: номинальную мощность $S_{\text{ном}}$; номинальное первичное $U_{1\text{ном}}$ и вторичное $U_{2\text{ном}}$ напряжения; номинальный ток во вторичной цепи $I_{2\text{ном}}$; коэффициент трансформации n ; число витков в обмотках w_1 и w_2 ; максимальное значение магнитной индукции в стержне B_{max} ; максимальное значение основного

магнитного потока Φ_{\max} ; площадь поперечного сечения стержня $Q_{\text{ст}}$; ЭДС одного витка $E_{\text{вит}}$.

Определить, для выбранного варианта, значения параметров трансформатора не указанные в таблице 4.1.

Примечания:

1. Соединение обмоток трансформатора Y/Y.
2. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц.
3. Коэффициент заполнения стержня сталью $k_{\text{ст}} = 0,97$.
4. Число витков в обмотках необходимо округлить до целого числа.
5. Исходные данные и результаты расчетов представить в виде таблицы

Таблица 4.1
Параметры трансформатора

№	$S_{\text{ном}}$ кВ·А	$U_{1\text{ном}}$ кВ	$U_{2\text{ном}}$ кВ	$I_{2\text{ном}}$ А	n	w_1 вит	w_2 вит	B_{max} Тл	Φ_{max} Вб	$Q_{\text{ст}}$ м ²	$E_{\text{вит}}$ В
1	25	–	0,23	–	–	2136	–	1,58	–	0,0087	–
2	63	6	0,4	–	–	–	78	1,58	–	–	–
3	160	6	–	–	8,696	696	–	1,62	–	–	–
4	400	–	0,4	–	15	–	33	–	–	0,0361	–
5	–	–	0,4	360,9	87,5	–	–	1,58	–	–	11,18
6	1000	20	0,69	–	–	–	–	1,59	–	0,0661	–
7	2500	20	0,69	–	–	522	–	–	–	0,1124	–
8	250	–	–	361	25	–	36	1,55	–	–	6,3
9	–	6	–	837	–	–	31	1,58	–	0,0659	–
10	25	6	0,4	–	–	–	116	1,55	–	–	–
11	63	10	–	–	43,47	1826	–	1,6	–	–	–
12	160	–	0,69	–	29	–	81	–	–	0,02446	–
13	–	6	–	733	1,9	118	–	1,55	–	–	–
14	400	10	0,23	–	–	–	–	1,55	–	–	14,32
15	1000	10	0,69	–	–	449	–	1,57	–	–	–
16	2500	–	3,15	–	3,2	–	85	1,56	–	–	–
17	–	–	–	627,5	152	–	28	1,62	–	0,0235	–
18	63	20	0,4	–	–	3600	–	1,58	–	–	–
19	160	10	0,4	–	–	–	48	1,57	–	–	–
20	1000	20	–	836	–	870	–	1,55	–	–	6,28
21	2500	35	–	–	5,55	944	–	1,6	–	–	–

Окончание таб. 4.1

№	$S_{\text{ном}}$ кВ·А	$U_{1\text{ном}}$ кВ	$U_{2\text{ном}}$ кВ	$I_{2\text{ном}}$ А	n	w_1 вит	w_2 вит	B_{max} Гл	Φ_{max} Вб	$Q_{\text{ст}}$ м ²	$E_{\text{вит}}$ В
22	4000	35	—	—	11,11	778	—	—	—	0,129	—
23	25	10	0,23	—	—	—	—	1,59	—	—	3,14
24	63	—	0,4	—	15	1170	—	1,55	—	—	—
25	160	35	0,69	—	—	—	—	1,62	—	0,0243	—

Примечание: объем задания уточняет лектор.

Задание 2. Трехфазный трансформатор имеет: номинальную мощность $S_{\text{ном}}$; номинальное первичное напряжение $U_{1\text{ном}}$; номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}}$; номинальный ток первичной цепи $I_{1\text{ном}}$; напряжение короткого замыкания $U_{\text{к}}$, $u_{\text{к}}\%$, его активная $u_{\text{к.а}}$ и реактивная $u_{\text{к.р}}$ составляющие; сопротивление короткого замыкания $Z_{\text{к}}$, его активная $r_{\text{к}}$ и реактивная $x_{\text{к}}$ составляющие; ток холостого хода I_0 , $i_0\%$; мощности холостого хода P_0 и короткого замыкания $P_{\text{к}}$; коэффициент мощности холостого хода $\cos\varphi_0$ и короткого замыкания $\cos\varphi_{\text{к}}$; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2$ (характер нагрузки); коэффициент полезного действия η при номинальной нагрузке ($\beta = 1$) и максимальный КПД η_{max} .

Определить, для выбранного варианта, значения параметров трансформатора не указанные в таблицах 4.2, 4.3.

Построить внешнюю характеристику трансформатора при $U_2 = f(\beta)$ номинальной нагрузке ($\beta = 1$).

Примечания:

1. Соединение обмоток трансформатора Y/Y.
2. Частота переменного тока сети $f = 50$ Гц.
3. Исходные данные и результаты расчетов представить в виде таблицы.

Таблица 4.2
Параметры трансформатора

№	$S_{\text{ном}}$ кВ·А	$U_{1\text{ном}}$ кВ	$U_{2\text{ном}}$ кВ	$I_{1\text{ном}}$ А	P_0 кВт	I_0 А	i_0 %	$\cos\varphi_0$	$P_{\text{к}}$ кВт	$U_{\text{к}}$ В
1	25	10	0,4	—	0,13	—	3,2	—	0,6	—
2	—	6	0,4	3,87	0,175	0,115	—	—	0,88	280
3	63	10	0,4	—	—	0,10	—	0,15	—	450

Окончание таб. 4.2

№	$S_{\text{НОМ}}$ кВ·А	$U_{1\text{НОМ}}$ кВ	$U_{2\text{НОМ}}$ кВ	$I_{1\text{НОМ}}$ А	P_0 кВт	I_0 А	i_0 %	$\cos\varphi_0$	P_k кВт	U_k В
4	—	6	0,4	9,6	—	—	2,6	0,13	—	—
5	—	10	0,525	9,2	0,51	—	2,4	—	2,65	—
6	2500	—	0,69	144	—	—	1	0,13	—	—
7	160	—	0,525	9,2	0,46	—	2,4	—	2,65	—
8	—	10	0,69	2,3	0,15	0,072	—	—	0,88	475
9	63	3	0,69	—	—	0,35	—	0,1	—	153
10	—	20	0,69	2,9	—	—	2,8	0,3	—	—
11	—	20	0,4	4,6	0,46	—	2,4	—	2,65	—
12	2500	—	6,3	72,2	—	—	1,3	0,136	—	—
13	4000	35	11	—	5,4	—	1	—	33	—
14	—	20	0,4	1,819	—	—	2,9	0,119	—	—
15	—	3	0,525	4,8	0,105	—	3,2	—	0,6	165
16	40	10	0,525	—	—	—	3	0,125	—	—
17	63	3	0,69	—	0,22	—	2,8	—	1,28	—
18	100	20	0,69	—	—	0,075	—	0,15	—	935
19	1000	35	11	—	2,1	—	1,4	—	—	—
20	2500	20	6,3	—	3,9	—	1	—	25	—
21	—	35	0,525	6,6	—	—	2,1	0,136	—	—
22	25	3	0,525	—	—	0,151	—	0,15	—	143
23	—	10	0,4	5,8	0,31	—	2,6	—	—	—
24	—	20	0,4	11,55	1,2	0,33	—	—	5,5	951
25	40	3	0,69	—	—	—	3,2	0,125	—	—

Таблица 4.3
Параметры трансформатора

№	$\cos\varphi_k$	μ_k %	$\mu_{k,a}$ %	$\mu_{k,p}$ %	Z_k Ом	r_k Ом	x_k Ом	$\cos\varphi_2$ Тип нагрузки	η %	η_{max} %	$\Delta U_{\text{НОМ}}$ %
1	—	4,5	—	—	—	—	—	1 Акт	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	1 Акт	—	—	—
3	0,7	4,5	—	—	—	—	—	1 Акт	—	—	—
4	0,3	—	1,95	6,2	—	—	—	1 Акт	—	—	—
5	—	4,5	—	—	—	—	—	1 Акт	—	—	—
6	—	—	—	—	—	0,5	2,6	1 Акт	—	—	—
7	—	5,5	—	—	—	—	—	0,8 Инд	—	—	—
8	—	—	—	—	—	—	—	0,8 Инд	—	—	—
9	0,4	—	—	—	—	—	—	0,8 Инд	—	—	—
10	—	4,5	1,97	—	—	—	—	0,8 Инд	—	—	—
11	—	6,5	—	—	—	—	—	0,8 Инд	—	—	—
12	—	—	—	—	—	1,6	10,3	0,8 Инд	—	—	—
13	—	5,5	—	—	—	—	—	0,8 Емк	—	—	—

Окончание таб. 4.3

№	$\cos\varphi_k$	u_k %	$u_{k,a}$ %	$u_{k,p}$ %	Z_k Ом	r_k Ом	x_k Ом	$\cos\varphi^2$ Тип нагрузки	η %	η_{\max} %	$\Delta U_{\text{ном}}$ %
14	0,33	–	2,16	–	–	–	–	0,8 ЕМК	–	–	–
15	–	–	–	–	–	–	–	0,8 ЕМК	–	–	–
16	–	–	–	–	–	55	137,5	0,8 ЕМК	–	–	–
17	–	5,5	–	–	–	–	–	0,8 ЕМК	–	–	–
18	–	–	–	–	–	80	–	0,8 ЕМК	–	–	–
19	0,22	–	1,2	–	–	–	–	1 АКТ	–	–	–
20	–	5,5	–	–	–	–	–	1 АКТ	–	–	–
21	–	–	–	–	–	42	194	0,7 Инд	–	–	–
22	–	–	–	–	–	7	–	0,7 Инд	–	–	–
23	–	–	1,97	–	50	–	–	0,7 ЕМК	–	–	–
24	–	–	–	–	–	–	–	0,7 ЕМК	–	–	–
25	–	–	–	–	–	4,9	13,8	0,7 Инд	–	–	–

Примечание: объем задания уточняет лектор.

5. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

5.1. Примеры решения задач

Пример 5.1. Трехфазный 4-х полюсной асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает от сети частотой $f = 50$ Гц имеет скольжение $s = 4\%$. **Определить** частоту вращения поля статора, частоту вращения ротора, частоту ЭДС ротора.

Решение.

Частота вращения поля статора: $n_c = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ об / мин.

Частота вращения ротора: $n_2 = n_c(1 - s) = 1500(1 - 0,04) = 1440$ об / мин.

Частота ЭДС ротора: $f_2 = f \cdot s = 50 \cdot 0,04 = 2$ Гц.

Пример 5.2. Трехфазный 4-х полюсной асинхронный двигатель работает от сети частотой $f = 50$ Гц имеет скольжение $s = 5\%$; номинальную мощность на валу $P_2 = 55$ кВт; КПД $\eta = 89\%$; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,82$; номинальное напряжение $U = 380$ В. **Определить** ток, потребляемый из сети; полную и реактивную мощность в цепи питания двигателя; момент на валу.

Решение.

Активная мощность: $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{55}{0,89} = 61,8$ кВт .

Полная мощность: $S_1 = \frac{P_1}{\cos\varphi} = \frac{61,8}{0,82} = 75,4$ кВА .

Реактивная мощность: $Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{75,4^2 - 61,8^2} = 43,2$ квар .

Ток, потребляемый из сети:

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi} = \frac{61,8 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82} = 114,64 \text{ А .}$$

Частота вращения поля статора:

$$n_c = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об / мин.}$$

Частота вращения ротора: $n_2 = n_c(1 - s) = 1500(1 - 0,05) = 1425$ об/мин.

Момент на валу: $M = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2 \cdot 30}{\pi \cdot n_2} = \frac{55 \cdot 10^3 \cdot 30}{\pi \cdot 3,14 \cdot 1425} = 368,76$ Нм .

Пример 5.3. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором работает от сети частотой $f = 50$ Гц имеет скольжение $s = 6\%$; активное сопротивление фазы ротора $R_2 = 2,4$ Ом; индуктивное сопротивление фазы ротора $X_2 = 5$ Ом; ЭДС неподвижного ротора $E_{2H} = 66,474$ В; индуктивное сопротивление фазы ротора $X_2 = 5$ Ом. **Определить** кратность пускового тока, пуск проводится без пускового реостата $R_{II} = 0$.

Решение.

При пуске скольжение равно $s = 1$, тогда ток пусковой равен:

$$I_{II} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{(R_2 + R_{II})^2 + X_2^2}} = \frac{66,474}{\sqrt{(2,4+0)^2 + 5^2}} = 12 \text{ А.}$$

Ток номинальный:

$$I_H = \frac{s \cdot E_{2H}}{\sqrt{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}} = \frac{0,06 \cdot 66,474}{\sqrt{2,4^2 + (0,06 \cdot 5)^2}} = 1,65 \text{ А.}$$

Кратность пускового тока: $\frac{I_{II}}{I_H} = \frac{12}{1,65} = 7,3$.

Пример 5.4. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, работающий от сети частотой $f = 50$ Гц напряжением $U_{л} = 380$ В имеет: номинальную потребляемую мощность из сети $P_1 = 70$ кВт; число пар полюсов $2 \cdot p = 6$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,9$; кратность максимального момента $m_M = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}} = 2$; частоту вращения ротора $n_2 = 963$ об / мин; критическое скольжение для искусственной механической характеристики $s_{k'p} = 0,37$; активное и индуктивное сопротивления фазы обмотки ротора $R_2 = 0,025$ Ом, $X_2 = 0,356$ Ом; электрические потери в обмотках статора и ротора $P_{эл} = 1500$ Вт; добавочные и механические потери $P_{\text{доб+мех}} = 800$ Вт. **Определить:** номинальную мощность на валу; ток, потребляемый двигателем из сети; номинальное КПД; скольжение; добавочное сопротивление, включенное в цепь обмотки ротора для искусственной механической характеристики. **Построить** естественную и искусственную механические характеристики.

Решение.

Номинальная мощность на валу:

$$P_2 = P_1 - P_{\text{доб+мех}} - P_{эл} = 70 - 1,5 - 0,8 = 67,7 \text{ кВт.}$$

$$\text{КПД двигателя: } \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{67,7}{70} = 0,967 .$$

$$\text{Ток, потребляемый из сети: } I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos\varphi} = \frac{70000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 118,2 \text{ А} .$$

$$\text{Частота вращения поля статора: } n_c = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об / мин} .$$

$$\text{Скольжение: } s = 1 - \frac{n_2}{n_1} = 1 - \frac{963}{1000} \cdot 100\% = 3,7\% .$$

Добавочное сопротивление, включенное в цепь обмотки ротора:

$$R_{\text{д}} = s_{\text{кр}}' \cdot X_2 - R_2 = 0,37 \cdot 0,356 - 0,025 = 0,107 \text{ Ом} .$$

Для построения искусственной механической характеристики, используем формулу Клосса в относительных единицах.

$$M(s) = \frac{2 \cdot m_M}{s \left| \frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}}' \right| s} = \frac{2 \cdot 2}{s \left| \frac{1}{0,37} + 0,37 \right| s} .$$

Находим несколько значений моментов $M(s)$ для разных значений скольжений s , и сведем результаты вычислений в таблицу:

s	1	0,8	0,6	0,4	0,37	0,2	0,1	0,05	0
$M(s)$ о.е.	1,302	1,524	1,787	1,994	2	1,673	1,007	0,531	0

Для построения естественной характеристики нужно найти критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ без добавочного сопротивления, в цепи обмотки ротора

$$s_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0,025}{0,356} = 0,07 .$$

Находим несколько значений моментов $M(s)$ для разных значений скольжений s , используя формулу Клосса в относительных единицах:

$$M(s) = \frac{2 \cdot m_M}{s \left| \frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}} \right| s} = \frac{2 \cdot 2}{s \left| \frac{1}{0,07} + 0,07 \right| s} .$$

и сведем результаты вычислений в таблицу:

s	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,07	0,05	0
$M(s)$ о.е.	0,279	0,347	0,46	0,679	1,247	1,879	2	1,892	0

Строим механические характеристики:

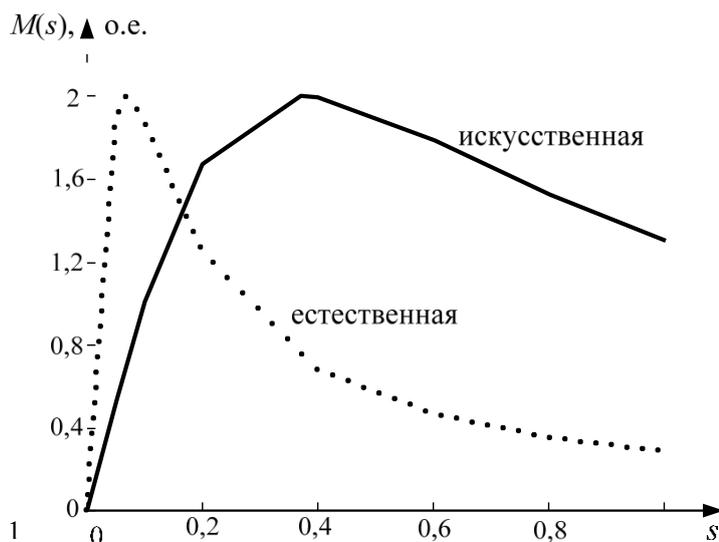


Рис.5.3. Механические характеристики

5.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.1. Трехфазный асинхронный двигатель работает от сети частотой $f = 50$ Гц имеет скольжение $s = 8\%$; ЭДС в обмотке неподвижного ротора $E_{2H} = 31$ В. Определить ЭДС вращающегося ротора; частоту ЭДС ротора.

Задача 5.2. Трехфазный асинхронный двигатель, работающий от сети частотой $f = 50$ Гц напряжением $U_{\text{л}} = 380$ В имеет: число пар полюсов $2 \cdot p = 6$; КПД $\eta = 82\%$; момент на валу $M_2 = 180$ Н·м; скольжение $s = 4\%$. Определить частоту вращения ротора; полезную мощность на валу двигателя; мощность и ток статора, потребляемые двигателем.

Задача 5.3. Трехфазный асинхронный двигатель, работающий от сети частотой $f = 50$ Гц имеет: скольжение $s = 4\%$; полезную мощность на валу двигателя $P_2 = 4000$ Вт; кратность пускового момента $\left. \frac{M_{\text{пуск}}}{M_H} \right| = 2$; кратность максимального момента $\left. \frac{M_{\text{max}}}{M_H} \right| = 2,5$. Определить начальный пусковой и максимальный моменты.

Задача 5.4. Трёхфазный асинхронный двигатель работает в номинальном режиме при следующих показателях: $P_{2\text{НОМ}} = 75$ кВт, $n_2 = 970$ об/мин, $\eta = 90\%$. Определить мощность, потребляемую двигателем из сети, суммарные потери мощности в машине, скольжение и вращающий момент на валу.

Задача 5.5. Вычислить ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора, вращающегося со скольжением $s = 0,022$, если $\Phi = 1,5 \cdot 10^{-2}$ Вб. Число витков фазы обмотки статора $w_1 = 70$, ротора $w_2 = 40$, а обмоточные коэффициенты соответственно равны $k_{o61} = 0,95$, $k_{o62} = 0,96$; частота сети $f = 50$ Гц.

5.3. Индивидуальное задание № 5 для самостоятельной работы «Расчет параметров асинхронного двигателя»

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, работающий от сети частотой $f = 50$ Гц напряжением $U_{л} = 380$ В, имеет: номинальную потребляемую мощность из сети P_1 ; номинальную мощность на валу P_2 ; ток, потребляемый двигателем из сети I_1 ; число пар полюсов $2 \cdot p$; номинальное КПД η ; номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi$; кратность максимального момента $m_M = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$; частоту вращения ротора n_2 ; скольжение s и критическое скольжение $s_{\text{кр}}$; добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$; активное R_2 и индуктивное X_2 сопротивления фазы обмотки ротора; электрические потери в обмотках статора и ротора $P_{\text{эл}}$; добавочные и механические потери $P_{\text{доп+мех}}$.

Определить, для выбранного варианта, значения параметров асинхронного двигателя, не указанные в таблицах 5.1, 5.2.

Построить, для выбранного варианта, механическую характеристику.

Примечание: для построения искусственной механической характеристики в цепь обмотки ротора включают дополнительно добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$.

Таблица 5.1

Параметры асинхронного двигателя

№	P_1 кВт	P_2 кВт	I_1 А	$2 \cdot p$	η	$\cos\varphi$	m_M	n_2 об/мин
1	—	5,5	—	4	—	0,85	2,2	—
2	—	—	7,89	2	0,865	0,89	2,5	2892
3	—	11	22,6	6	—	—	2	—
4	—	—	31,95	8	0,87	0,82	2	727
5	—	18,5	37,77	8	—	—	2,2	—
6	60,4	—	—	2	—	0,92	2,5	2865
7	40,66	—	69,41	6	0,91	—	2,3	—
8	—	45	—	8	0,91	0,84	2	727

Окончание таб. 5.1

№	P_1 кВт	P_2 кВт	I_1 А	$2 \cdot p$	η	$\cos\varphi$	m_M	n_2 об/мин
9	–	–	128	2	–	0,89	2,5	–
10	–	75	–	4	0,93	0,9	2	1480
11	6,47	–	–	2	0,85	0,9	2,5	–
12	–	4	–	4	0,9	0,89	2	–
13	12,79	–	–	6	0,86	0,86	2,5	980
14	17,2	15	–	4	–	0,85	2	–
15	20,79	–	–	4	0,89	0,84	2,2	1449
16	–	55	–	2	0,91	0,92	2	–
17	42,5	37	–	4	–	0,89	2,5	–
18	52	–	–	4	0,865	0,84	2,3	1462
19	–	75	141	4	0,91	–	2,5	–
20	83,33	–	–	2	0,9	0,9	2	–
21	–	6	–	4	–	0,89	2	–
22	–	–	7,5	4	0,9	0,9	2,2	1440
23	–	–	32	4	0,86	0,8	2,5	–
24	41	–	70	2	0,89	–	2	–
25	57,48	–	–	4	–	0,87	2,3	1477

Таблица 5.2
 Параметры асинхронного двигателя

№	$s_{кр}$	s	R_2 Ом	X_2 Ом	$P_{эл}$ Вт	$P_{доп+мех}$ Вт	характеристика
1	–	0,034	0,782	3,969	188	25	естественная
2	0,222	–	1	–	182	–	естественная
3	0,339	0,024	0,291	–	377	30	искусственная $R_D = 2 \cdot R_2$
4	–	–	0,206	2,06	540	–	искусственная $R_D = 1,5 \cdot R_2$
5	0,09	0,026	–	1,685	690	36	естественная
6	0,269	–	0,042	0,466	1614	750	искусственная $R_D = ?$
7	0,082	0,031	0,06	–	–	64	естественная
8	0,176	–	–	0,711	1125	–	искусственная $R_D = 2 \cdot R_2$
9	0,072	0,014	0,023	–	5144	830	естественная
10	1	–	0,0225	0,322	–	500	искусственная $R_D = ?$
11	–	0,045	0,922	5,724	–	30	искусственная $R_D = 3 \cdot R_2$

Окончание таб. 5.2

№	$s_{кр}$	s	R_2 Ом	X_2 Ом	$P_{эл}$ Вт	$P_{доп+мех}$ Вт	характеристика
12	–	0,031	1,112	4,169	–	50	естественная
13	0,35	–	–	2,524	400	–	искусственная $R_{д} = 1,5 \cdot R_2$
14	0,1	0,028	–	2,06	–	640	естественная
15	0,34	–	0,157	1,743	700	–	искусственная $R_{д} = ?$
16	–	0,021	0,044	0,462	–	850	естественная
17	–	0,028	0,06	0,727	846	–	искусственная $R_{д} = 2 \cdot R_2$
18	0,082	–	0,042	–	–	87	естественная
19	1	0,012	0,023	0,327	5100	–	искусственная $R_{д} = ?$
20	–	0,017	0,016	0,312	–	490	естественная
21	–	0,04	1,131	4,32	190	30	естественная
22	0,2	–	1,111	–	180	–	естественная
23	–	0,035	0,275	2,75	600	–	искусственная $R_{д} = 2 \cdot R_2$
24	0,08	0,028	0,063	–	–	1700	естественная
25	0,325	–	0,043	0,581	1684	800	искусственная $R_{д} = ?$

Примечание: объем задания уточняет лектор.

6. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

6.1. Примеры решения задач

Пример 6.1. Заданы параметры трехфазного синхронного генератора: номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{1\text{ном}} = 3,2$ кВ при частоте $f = 50$ Гц; обмотка статора соединена Y; номинальный ток статора $I_{1\text{ном}} = 72,2$ А; число пар полюсов $2p = 8$; суммарные потери в режиме номинальной нагрузки $\Sigma P_{\text{ном}} = 27$ кВт; мощность на входе генератора $P_{1\text{ном}} = 340$ кВт. **Определить:** полную номинальную мощность на выходе, КПД, полезную мощность на выходе генератора, коэффициент мощности нагрузки генератора, вращающий момент первичного двигателя.

Решение.

Полная номинальная мощность:

$$S_{\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot U_{1\text{ном}} = 1,73 \cdot 3,2 \cdot 72,2 = 399,7 \text{ кВА.}$$

Полезная мощность на выходе генератора:

$$P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - \Sigma P_{\text{ном}} = 340 - 27 = 313 \text{ кВт.}$$

Синхронная частота вращения: $n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750$ об/мин.

Момент вращения приводного двигателя:

$$M_{1\text{ном}} = \frac{9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{1\text{ном}}}{n_1} = \frac{9,55 \cdot 10^3 \cdot 340}{750} = 4329 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Коэффициент мощности нагрузки генератора:

$$\cos\varphi_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}} = \frac{313}{399,7} = 0,78.$$

КПД генератора: $\eta = \frac{P_{\text{ном}}}{P_{1\text{ном}}} = \frac{313}{340} = 0,92.$

Пример 6.2. Номинальная мощность гидрогенератора $S_{\text{ном}} = 26200$ кВА; номинальное (линейное) напряжение $U_{1\text{ном}} = 10,5$ кВ при частоте тока $f = 50$ Гц; обмотка статора соединена Y; синхронная частота вращения $n_1 = 125$ об/мин; число витков в фазе $\omega_1 = 126$; обмоточный коэффициент $k_{1\text{об}} = 0,94$. Нагрузка активно-индуктивная $\psi = 50^\circ$. **Определить** амплитуду основной гармонической МДС обмотки якоря, ее составляющие по продольной и поперечной осям.

Решение.

Ток в фазе обмотки якоря:

$$I = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{26200}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1442,33 \text{ А}.$$

Число пар полюсов: $p = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{125} = 24.$

Действующее значение продольной и поперечной оси токов якоря

$$I_d = I \cdot \sin\psi = 1442,33 \cdot \sin(50^\circ) = 1104,89 \text{ А};$$

$$I_q = I \cdot \cos\psi = 1442,33 \cdot \cos(50^\circ) = 927,11 \text{ А}.$$

Амплитуда продольной и поперечной оси МДС обмотки якоря

$$F_d = 0,45 \cdot m_1 \cdot I_d \cdot k_{1\text{об}} \cdot p = 0,45 \cdot 3 \cdot 1104,89 \cdot 0,94 \cdot 24 = 7361 \text{ А};$$

$$F_q = 0,45 \cdot m_1 \cdot I_q \cdot k_{1\text{об}} \cdot p = 0,45 \cdot 3 \cdot 927,11 \cdot 0,94 \cdot 24 = 6177 \text{ А}.$$

Амплитуда основной гармонической МДС обмотки якоря

$$F = 0,45 \cdot m_1 \cdot I \cdot k_{1\text{об}} \cdot p = 0,45 \cdot 3 \cdot 1442,33 \cdot 0,94 \cdot 24 = 9609 \text{ А}.$$

Пример 6.3. В одной фазе статора синхронного генератора количество витков $\omega_1 = 24$; обмоточный коэффициент $k_{1\text{об}} = 0,9$; частота сети $f = 50$ Гц; синхронная частота вращения $n_1 = 1000$ об/мин; магнитный поток $\Phi = 0,05$ Вб. **Определить** число пар полюсов и индуцируемую ЭДС.

Решение.

$$\text{Число пар полюсов: } p = \frac{60f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3.$$

ЭДС в фазе обмотки якоря:

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 24 \cdot 0,9 \cdot 0,05 = 239,76 \text{ В.}$$

6.2. Задачи для самостоятельного решения

Задача 6.1. Заданы параметры трехфазного синхронного генератора: номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{1ном} = 6,3 \text{ кВ}$ при частоте $f = 50 \text{ Гц}$; обмотка статора соединена Y; полная номинальная мощность $S_{ном} = 330 \text{ кВА}$; КПД генератора $\eta = 92 \%$; число пар полюсов $2p = 6$; коэффициент мощности нагрузки генератора $\cos\varphi_{1ном} = 0,9$. Определить: номинальный ток статора; суммарные потери в режиме номинальной нагрузки; мощность на входе генератора, полезную мощность на выходе генератора, вращающий момент первичного двигателя.

Задача 6.2. Выбрать необходимое число витков обмотки шестиполюсного синхронного генератора, ротор которого вращается с частотой $n_1 = 1000 \text{ об/мин}$, чтобы ЭДС на его выводах была 220 В , если магнитный поток, создаваемый в обмотке возбуждения ротора $\Phi = 0,055 \text{ Вб}$, а обмоточный коэффициент $k_{1об} = 0,93$.

Задача 6.3. Ротор трехфазного синхронного генератора имеет 12 полюсов. Частота напряжения на зажимах генератора $f = 50 \text{ Гц}$. Полезная мощность приводного двигателя 5 кВт . Определить вращающий момент на валу генератора.

7. МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

7.1. Примеры решения задач

Пример 7.1. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальную мощность $P_2 = 10$ кВт; номинальное напряжение $U = 230$ В; частоту вращения $n = 1450$ об/мин; сопротивление обмоток цепи обмотки возбуждения $R_B = 150$ Ом; сопротивление обмоток якоря $R_{\text{я}} = 0,3$ Ом; КПД в номинальном режиме $\eta = 86,5$ %. Падением напряжения в щеточном контакте пренебречь. **Определить:** ток генератора, ток в цепи возбуждения, ток в цепи якоря, ЭДС якоря, электромагнитный момент, электромагнитная мощность, мощность приводного двигателя. Генератор работает при номинальной нагрузке.

Решение:

$$\text{Ток генератора: } I = \frac{P_2}{U} = \frac{10000}{230} = 43,5 \text{ А.}$$

$$\text{Ток в обмотке возбуждения: } I_B = \frac{U}{R_B} = \frac{230}{150} = 1,5 \text{ А.}$$

$$\text{Ток в цепи якоря: } I_{\text{я}} = I + I_B = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ А.}$$

$$\text{ЭДС якоря: } E = U + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} = 230 + 45 \cdot 0,3 = 243,5 \text{ В.}$$

$$\text{Электромагнитная мощность: } P_{\text{эм}} = E \cdot I_{\text{я}} = 243,5 \cdot 45 = 10957 \text{ Вт.}$$

$$\text{Электромагнитный момент: } M_{\text{эм}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эм}}}{n} = 9,55 \cdot \frac{10957}{1450} = 72 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Мощность приводного двигателя:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{10000}{\eta} = \frac{10000}{0,865} = 11561 \text{ Вт.}$$

Пример 7.2. В генераторе постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U = 440 \text{ В}$ установился ток $I = 64 \text{ А}$ при частоте якоря $n = 2800 \text{ об/мин}$. В новом режиме работы нагрузка и магнитный поток не изменились, но частота якоря стала $n^* = 740 \text{ об/мин}$. **Определить** напряжение и ток в генераторе в новом режиме.

Решение:

В генераторе независимого возбуждения ток генератора равен току якоря, т.е. $I = I_{\text{я}}$.

В номинальном режиме: Напряжение на нагрузке $U = I \cdot R_{\text{н}}$.

ЭДС якоря $E = U + I \cdot R_{\text{я}} = I \cdot R_{\text{н}} + I \cdot R_{\text{я}}$, с другой стороны $E = c_E \cdot n \cdot \Phi$.

Получили: $I \cdot R_{\text{н}} + I \cdot R_{\text{я}} = c_E \cdot n \cdot \Phi$.

В новом режиме, соответственно:

$$E^* = U^* + I^* \cdot R_{\text{я}} = I^* \cdot R_{\text{н}} + I^* \cdot R_{\text{я}} = c_E \cdot n^* \cdot \Phi.$$

Возьмем отношение, полученных уравнений и получим:

$$I = \frac{n^* \cdot U}{n} \cdot I = \frac{740}{2800} \cdot 64 = 16,9 \text{ А} \text{ и } U = \frac{U^* \cdot I}{I} = \frac{440}{64} \cdot 16,9 = 116,3 \text{ В.}$$

Пример 7.3. В электродвигателе постоянного тока с параллельным возбуждением, имеющим номинальные данные: мощность на валу $P_2 = 130 \text{ кВт}$; напряжение $U = 220 \text{ В}$; ток, потребляемый из сети $I = 640 \text{ А}$; частоту вращения $n = 600 \text{ об/мин}$; сопротивление цепи обмотки возбуждения $R_B = 43 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,007 \text{ Ом}$. **Определить** номинальные суммарные и электрические потери в обмотках.

Решение:

Ток в обмотке возбуждения: $I_B = \frac{U}{I_B 43} = \frac{220}{43} = 5,116 \text{ Ом}.$

Ток в цепи якоря: $I_Y = I - I_B = 640 - 5,116 = 634,884 \text{ А}.$

Электрические потери мощности

в цепи якоря: $\Delta P_{\text{эл Я}} = I_Y^2 \cdot R_Y = 634,884^2 \cdot 0,007 = 2821,544 \text{ Вт};$

в обмотке возбуждения: $\Delta P_{\text{эл В}} = I_B^2 \cdot R_B = U \cdot I_B = 220 \cdot 5,116 = 1125,52 \text{ Вт}.$

Суммарные потери мощности:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{эл В}} + \Delta P_{\text{эл Я}} = 1125,52 + 2821,544 = 3947,064 \text{ Вт}.$$

Пример 7.4. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения включен в сеть с напряжением $U = 220 \text{ В}$ при номинальном вращающем моменте $M = 101,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ развивает частоту вращения якоря $n = 750 \text{ об/мин}$. КПД двигателя $\eta = 75 \%$; сопротивление цепи обмотки возбуждения $R_B = 0,197 \text{ Ом}$; сопротивление обмотки якоря $R_Y = 0,443 \text{ Ом}$. Пуск двигателя осуществляется при пусковом реостате $R_{\text{пуск}} = 1,17 \text{ Ом}$. Пусковой ток приводит к увеличению магнитного потока в 1,2 раза. **Определить** номинальные мощность на валу, электромагнитную и потребляемую мощности; суммарные потери в двигателе; пусковой ток и пусковой момент.

Решение:

Мощность на валу: $P_2 = M \frac{\pi \cdot n}{30} = 101,7 \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 7983,45 \text{ Вт}.$

Потребляемая мощность: $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{7983,45}{0,75} = 10644,4 \text{ Вт}.$

Суммарные потери: $\Sigma \Delta P = P_1 - P_2 = 10644,4 - 7983,45 = 2660,95 \text{ Вт}.$

Т.к. двигатель с последовательным возбуждением, тогда ток якоря находим:

$$I_Y = I_B = I = \frac{P_1}{U} = \frac{10644,4}{220} = 48,38 \text{ А}.$$

ЭДС якоря:

$$E = U - I \cdot (R_Y + R_B) = 220 - (0,443 + 0,197) \cdot 48,38 = 189,04 \text{ В}.$$

Электромагнитная мощность: $P_{\text{эм}} = E \cdot I = 189,04 \cdot 48,38 = 9145,6 \text{ Вт}.$

Пусковой ток: $I_{\text{пуск}} = \frac{U}{R_Y + R_{\text{пуск}} + R_B} = \frac{220}{0,443 + 0,197 + 1,17} = 121,547 \text{ А}.$

Номинальный момент: $M = c_M \cdot \Phi \cdot I = 101,7,$

пусковой момент: $M_{\text{пуск}} = c_M \cdot \Phi_{\text{пуск}} \cdot I_{\text{пуск}} = c_M \cdot 1,2 \cdot \Phi \cdot I_{\text{пуск}}$.

Возьмем отношение, полученных уравнений и получим:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{1,2 \cdot I_{\text{пуск}} \cdot M}{I} = \frac{1,2 \cdot 121,547 \cdot 101,7}{48,38} = 305,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратность

пускового тока: $\frac{I_{\text{пуск}} I}{I} = \frac{121,547}{48,38} = 2,5$

пускового момента: $\frac{M_{\text{пуск}}}{M} = \frac{305,1}{101,7} = 3.$

7.2 Задачи для самостоятельного решения

Задача 7.1. Определить ток в цепи якоря генератора постоянного тока параллельного возбуждения и ЭДС, если сопротивление обмотки якоря составляет $R_{\text{я}} = 0,264 \text{ Ом}$. Сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 15 \text{ Ом}$. Генератор работает на нагрузку мощностью $P_2 = 5 \text{ кВт}$ при напряжении $U = 110 \text{ В}$.

Задача 7.2. Двухполюсный генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет пар параллельных ветвей $a = 1$; активных проводников обмотки якоря $N = 500$; сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,155 \text{ Ом}$; магнитный поток полюса $\Phi = 0,0197 \text{ Вб}$. При номинальном режиме работы ток нагрузки составляет $I_{\text{н}} = 50 \text{ А}$; ток возбуждения $I_{\text{в}} = 1,7 \text{ А}$; частота вращения якоря $n = 1450 \text{ об/мин}$. Определить напряжение на зажимах генератора.

Задача 7.3. Шестиполюсной двигатель постоянного тока смешанного возбуждения работает от сети $U = 220 \text{ В}$ и вращается с частотой $n = 1000 \text{ об/мин}$. Номинальный потребляемый ток равен $I = 13,3 \text{ А}$; КПД составляет $\eta = 75,2 \%$; сопротивление якоря $R_{\text{я}} = 1,65 \text{ Ом}$; сопротивление параллельной обмотки возбуждения $R_{\text{в}} = 183 \text{ Ом}$. Обмотка якоря имеет $a = 3$ пары параллельных ветвей и $N = 240$ проводников. Определить магнитный поток; вращающий момент на валу двигателя; мощность, снимаемую с вала; потребляемую и электромагнитную мощности.

Задача 7.4. Электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальную мощность на валу $P_2 = 4,5 \text{ кВт}$; напряжение сети $U = 220 \text{ В}$; частоту вращения якоря $n = 1500 \text{ об/мин}$; КПД $\eta = 80,5 \%$; сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 0,43 \text{ Ом}$; сопро-

тивление цепи возбуждения $R_B = 200 \text{ Ом}$. Определить номинальный момент на валу; суммарные потери; момент электромагнитный; частоту вращения якоря на холостом ходу; пусковой ток – пуск без пускового реостата; сопротивление пускового реостата при условии, что пусковой ток якоря в 2 раза выше номинального тока якоря.

Задача 7.5. Электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением с частотой вращения $n = 1500 \text{ об/мин}$ потребляет ток $I = 14 \text{ А}$ при напряжении $U = 220 \text{ В}$. Сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = 1,7 \text{ Ом}$. Определить ЭДС якоря; момент электромагнитный; потребляемую мощность и электрические потери.

7.3 Индивидуальное задание №6 для самостоятельного решения «Расчет параметров генератора постоянного тока»

Генератор постоянного тока имеет: номинальную мощность P_2 ; номинальное напряжение U ; частоту вращения n ; номинальный ток генератора I ; ток в цепи возбуждения I_B ; ток в цепи якоря $I_{\text{я}}$; сопротивление обмоток цепи обмотки возбуждения R_B ; сопротивление в цепи якоря $R_{\text{я}}$, приведенное к рабочей температуре; ЭДС якоря E ; электромагнитный момент при номинальной нагрузке $M_{\text{эм}}$; электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$; мощность приводного двигателя P_1 ; КПД в номинальном режиме η .

Определить, для выбранного варианта, значения параметров генератора постоянного тока, не указанные в таблицах 7.1, 7.2.

Нарисовать, для выбранного варианта, схему генератора постоянного тока.

Таблица 7.1
Параметры генератора

№	P_2 кВт	U В	n об/мин	I А	I_B А	$I_{\text{я}}$ А	R_B , Ом	$R_{\text{я}}$ Ом
1	24	230	1450	–	–	–	150	0,3
2	–	110	3000	–	–	17	Нет	0,55
3	–	220	1000	15,6	Нет	–	Нет	1
4	–	230	–	87	–	–	100	0,15
5	–	110	2000	25	–	–	Нет	–
6	–	220	630	80	Нет	–	Нет	0,144
7	–	460	–	–	4	–	–	–
8	–	110	3000	95	–	–	Нет	–
9	–	220	630	–	Нет	80	Нет	0,144
10	18	230	1500	–	–	80	–	–
11	–	110	3000	–	–	21,5	Нет	–

Окончание таб. 7.1

№	P_2 кВт	U В	n об/мин	I А	I_B А	I_A А	R_B , Ом	R_A Ом
12		220	460	–	Нет	405	5,5	0,008
13	45	–	1000	97,8	–	–	92	–
14	–	110	4000	260	–	–	Нет	–
15	–	220	1000	–	Нет	16	0,8	0,9
16	–	110	3600	–	1,8	34	–	–
17	–	110	4000	–	–	15	Нет	–
18	–	220	1000	15,6	Нет	–	Нет	1
19	–	230	–	90	–	–	90	0,2
20	–	110	3000	–	–	170	Нет	–
21	–	220	630	–	Нет	175	4,6	–
22	20	230	1450	–	–	92,5	–	–
23	–	110	3000	95	–	–	Нет	–
24	–	220	460	405	Нет	–	Нет	0,009
25	–	110	3000	–	1,5	12	–	–

Таблица 7.2
Параметры генератора

№	E В	$M_{эм}$ Н·м	$P_{эм}$ кВт	P_1 кВт	η %	Способ возбуждения
1	–	171	–	–	90	параллельное
2	–	–	–	–	89	последовательное
3	–	–	–	–	87	независимое
4	–	280	–	23	–	параллельное
5	–	15	–	–	82	последовательное
6	–	–	18,52	–	87	независимое
7	480	525	55	–	88	параллельное
8	–	37,5	–	–	85	последовательное
9	–	–	–	–	86	независимое
10	240	–	–	21	–	параллельное
11	–	7,8	–	–	89	последовательное
12	–	–	–	–	85	независимое
13	477	–	–	–	88	параллельное
14	–	72	–	–	88	последовательное
15	–	–	–	–	85	независимое
16	–	10,5	–	–	85	параллельное
17	–	4,5	–	–	80	последовательное
18	–	–	–	–	88	независимое
19	–	280	–	25	–	параллельное
20	–	62	–	–	90	последовательное
21	–	–	42,52	–	82	независимое
22	235	–	–	23	–	параллельное

Окончание таб. 7.2

№	E В	$M_{эм}$ Н·м	$P_{эм}$ кВт	P_1 кВт	η %	Способ возбуждения
23	–	35	–	–	89	последовательное
24	–	–	–	–	80	независимое
25	–	–	1,4	–	75	параллельное

Примечание. При расчетах падением напряжения в щеточном контакте пренебречь.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1.1. $R_{ab} = 4 \text{ Ом}$

Задача 1.2. $R_{ab} = 10 \text{ Ом}$

Задача 1.3. $R_{ab} = 3 \text{ Ом}$

Задача 1.4. $I = 20 \text{ А}$

Задача 1.5. $I = 10 \text{ А}$

Задача 2.1. $u(t) = 10 \sqrt{2} \sin(10^4 t)$, В.

Задача 2.2. $\varphi = -105^\circ$.

Задача 2.3. $P = 346 \text{ Вт}; Q = 200 \text{ Вар}; S = 400 \text{ ВА}$.

Задача 2.4. $R = 35,35 \text{ Ом}; L = 112,5 \text{ мГн}$.

Задача 2.5. $C = 0,32 \text{ мФ}; I = 10 \text{ А}$.

Задача 3.1. $I_A = 22 \text{ А}$.

Задача 3.2. $I_A = 12,8 \text{ А}$.

Задача 3.3. $P_1 = 0 \text{ Вт}; P_2 = 173 \text{ Вт}; S = 3000 \text{ ВА}$.

Задача 3.4. $P = 10,062 \text{ кВт}$.

Задача 3.5. $I_A = 2,9 \cdot e^{-j36,5^\circ}$, А.

Задача 4.1. $S_{\text{НОМ}} = 10500 \text{ кВА}; I_{2\text{НОМ}} = 1666 \text{ А}$.

Задача 4.2. $w_2 = 80; w_1 = 1200; I_{1\text{НОМ}} = 16,7 \text{ А}; I_{2\text{НОМ}} = 250 \text{ А}; Q_{\text{ст}} = 0,017 \text{ м}^2$.

Задача 4.3. $Z_K = 180 \text{ Ом}; R_K = 95,4 \text{ Ом}; X_K = 153 \text{ Ом}; Z_m = 217,4 \text{ кОм};$
 $R_m = 61,4 \text{ кОм}; X_m = 208,5 \text{ кОм}$.

Задача 4.4. $\Delta U_{\text{НОМ}} = -2,093 \text{ \%}; U_2 = 408,372 \text{ В}$.

Задача 4.5. $\eta = 97 \text{ \%}; \eta_{\text{max}} = 98 \text{ \%}$.

Задача 5.1. $f_2 = 4 \text{ Гц}; E_2 = 2,5 \text{ В}$.

Задача 5.2. $n_2 = 960 \text{ об/мин}; P_2 = 18144 \text{ Вт}; P_1 = 22126 \text{ Вт}; I_1 = 41,9 \text{ А}$.

Задача 5.3. $M_{\text{пуск}} = 26,52 \text{ Н} \cdot \text{м}; M_{\text{max}} = 33,15 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Задача 5.4. $s = 3 \%$; $\Delta P = 8,33 \text{ кВт}$; $P_1 = 83,33 \text{ кВт}$; $M = 738,72 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Задача 5.5. $E_1 = 221,445 \text{ В}$; $E_2 = 2,812 \text{ В}$.

Задача 6.1. $P_{\text{ном}} = 297 \text{ кВт}$; $P_{1\text{ном}} = 322,8 \text{ кВт}$; $\Sigma P = 25,8 \text{ кВт}$; $I_{1\text{ном}} = 30,2 \text{ А}$;

$M_{1\text{ном}} = 3083 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Задача 6.2. $\omega_1 = 19$.

Задача 6.3. $M_{\text{вр}} = 95,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Задача 7.1. $E = 123,9 \text{ В}$; $I_{\text{я}} = 52,78 \text{ А}$.

Задача 7.2. $U = 230 \text{ В}$.

Задача 7.3. $\Phi = 0,05 \text{ Вб}$; $P_{\text{эм}}$ $M_{\text{вр}} = 21 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $P_2 = 2200,35 \text{ Вт}$; $P_1 = 2926 \text{ Вт}$;
 $= 2420,4 \text{ Вт}$.

Задача 7.4. $M_2 = 28,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\Sigma \Delta P = 1090 \text{ Вт}$; $M_{\text{эм}} = 32,43 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

$n = 1574,8 \text{ об/мин}$; $I_{\text{пуск}} = 512,7 \text{ А}$; $R_{\text{пуск}} = 4,13 \text{ Ом}$.

Задача 7.5. $E = 196,2 \text{ В}$; $M_{\text{эм}} = 17,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $P_1 = 3,08 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\text{эл}} = 333,2 \text{ Вт}$

