

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**Автономное профессиональное образовательное учреждение Удмуртской Республики  
«Техникум радиоэлектроники и информационных технологий»**

**Практические работы  
по дисциплине ОПД.02 «Основы электротехники»**

Разработал  
преподаватель:

Р.Р. Ахмадиев

Ижевск, 2024

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 «Расчет сопротивления проводников и выбор сечений проводов»

**Цель работы:** Научиться производить расчет сопротивления проводника по его параметрам; производить выбор сечений проводов по току.

### Теоретическая часть

Электрическое сопротивление  $R$  – это параметр элементов электрической цепи, который характеризует способность элемента поглощать электрическую энергию и преобразовывать ее в другие виды энергии.

За единицу сопротивления принят ом (Ом).

1 Ом = 1В/1А.

Величина электрического сопротивления  $R$  зависит от геометрических размеров и свойств материала проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом м или Ом мм<sup>2</sup>/м;  $l$  – длина, м;  $S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup> или мм<sup>2</sup>.

При прокладке силовых коммуникаций основной возникающий вопрос – выбор типа и сечения провода, который нужно использовать. При этом тип провода, определяющий материал и количество изоляционных оболочек (различные виды пластика и других материалов), а также материал (медь или алюминий) и тип (одно- и многожильный) проводника, выбирается исходя из условий, в которых будет проложен провод. Сечение же провода определяется исходя из максимального тока, который будет протекать по проводу продолжительное время. Помочь в выборе сечения провода вам помогут таблицы

Таблица 1

Сечение провода для передачи переменного тока в сетях 220/380 Вольт\_

Ток, А		6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80
Мощность, кВт	220 В	1,2	2,2	2,9	3,5	4,4	5,5	7,0	8,8	11,0	13,9	17,6
	380 В	2,3	3,8	4,9	6,0	7,6	9,5	12,2	15,2	19,0	23,9	30,4
Сечение, мм <sup>2</sup>	Cu	0,5	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	4,0	4,0	6,0	10,0	10,0
	Al	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,0	4,0	6,0	10,0	16,0	25,0

Таблица 4.2

Сечение медного провода для передачи постоянного тока при напряжении 12 Вольт

Ток, А	16,5	21,5	25,0	32,0	43,5	58,5	77,0	103,0	142,5
Мощность, кВт	0,20	0,26	0,30	0,38	0,52	0,70	0,92	1,24	1,71
Сечение, мм <sup>2</sup>	0,5	0,75	1,0	1,5	2,5	4,0	6,0	10,0	16,0

### Порядок выполнения работы

1. Проведите анализ формулы для расчета сопротивления из лекций или [3], № 1.1 стр. 8
2. Выполните расчет по формуле сопротивления. Номер варианта соответствует последней цифре номера в списке группы по журналу. Удельное сопротивление определить по таблице Приложение 3, стр. 327 [3]

Таблица 4.3

Вариант	Данные для расчета
1.	Определите сопротивление алюминиевого провода, длина которого 1800 м и площадь поперечного сечения $10 \text{ мм}^2$ .
2.	Площадь сечения медной проволоки равна $2 \text{ мм}^2$ , а длина 55 м. Определить ее сопротивление.
3.	Никелиновая проволока имеет сопротивление 200 Ом и длину 100 м. Определить площадь поперечного сечения.
4.	Сколько метров медного провода сечением $2 \text{ мм}^2$ необходимо, чтобы сопротивление было равно 1 Ом?
5.	Электрическая плитка имеет нагревательный элемент, изготовленный из константановой проволоки длиной 0,5 м и сечением $0,2 \text{ мм}^2$ . Каково сопротивление спирали?
6.	Нужно изготовить реостат с сопротивлением 50 Ом. Имеется манганиновая проволока сечением $0,2 \text{ мм}^2$ . Сколько метров проволоки потребуется?
7.	Каково сопротивление алюминиевого провода сечением $2,5 \text{ мм}^2$ и длиной 300 м?
8.	Сопротивление нагревательной спирали 24 Ом. Какой длины должен быть провод из нихрома, если сечение его $0,3 \text{ мм}^2$ ?
9.	Провод сечением $4 \text{ мм}^2$ и длиной 200 м имеет сопротивление 6,5 Ом. Определить материал провода.
10.	Нужно изготовить реостат с сопротивлением 20 Ом из манганинового провода. Определить сечение провода, если его длина 5 м.

3. Определить сечение провода по таблицам, исходя из данных, приведенных в таблице 4.4.  
Таблица 4.4

№ варианта	Род тока	Напряжение, В	Материал провода	Мощность приемников, кВт
1	постоянный	12	медь	0,20
2	переменный	220	медь	1,2
3	переменный	220	алюминий	2,2
4	переменный	380	медь	2,3
5	переменный	380	алюминий	3,8
6	постоянный	12	медь	0,30
7	переменный	220	медь	2,9
8	переменный	220	алюминий	3,5
9	переменный	380	медь	4,9
10	переменный	380	алюминий	6,0
11	постоянный	12	медь	0,52

12	переменный	220	медь	4,4
13	переменный	220	алюминий	5,5
14	переменный	380	медь	7,6
15	переменный	380	алюминий	9,5
16	постоянный	12	медь	0,70
17	переменный	220	медь	7,0
18	переменный	220	алюминий	8,8
19	переменный	380	медь	12,2
20	переменный	380	алюминий	15,2
21	постоянный	12	медь	0,92
22	переменный	220	медь	11,0
23	переменный	220	алюминий	13,9
24	переменный	380	медь	19,0
25	переменный	380	алюминий	23,9
26	постоянный	12	медь	1,24
27	переменный	220	медь	17,6
28	переменный	220	алюминий	1,2
29	переменный	380	медь	30,4
30	переменный	380	алюминий	7,6

### Содержание отчета:

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Формула сопротивления и анализ формулы
4. Расчеты по формуле сопротивления
5. Таблица с результатами определения сечения провода

Таблица 4.5

№ варианта	Род тока	Напряжение, В	Материал провода	Мощность приемников, кВт	Ток, А	Сечение провода, мм <sup>2</sup>

6. Вывод.

### Контрольные вопросы:

1. Как обозначается и в каких единицах измеряется электрическое сопротивление?
2. От каких величин зависит электрическое сопротивление?
3. По каким параметрам определяют сечение провода на практике,

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

### Расчет цепи постоянного тока методом свертывания

**Цель работы** - освоить методику расчета цепей постоянного тока методом свертывания.

#### Теоретическая часть

В соответствии с методом свертывания, отдельные участки схемы упрощают и постепенным преобразованием приводят схему к одному эквивалентному (входному) сопротивлению, включенному к зажимам источника.

Схема упрощается с помощью замены группы последовательно или параллельно соединенных сопротивлений одним, эквивалентным по сопротивлению.

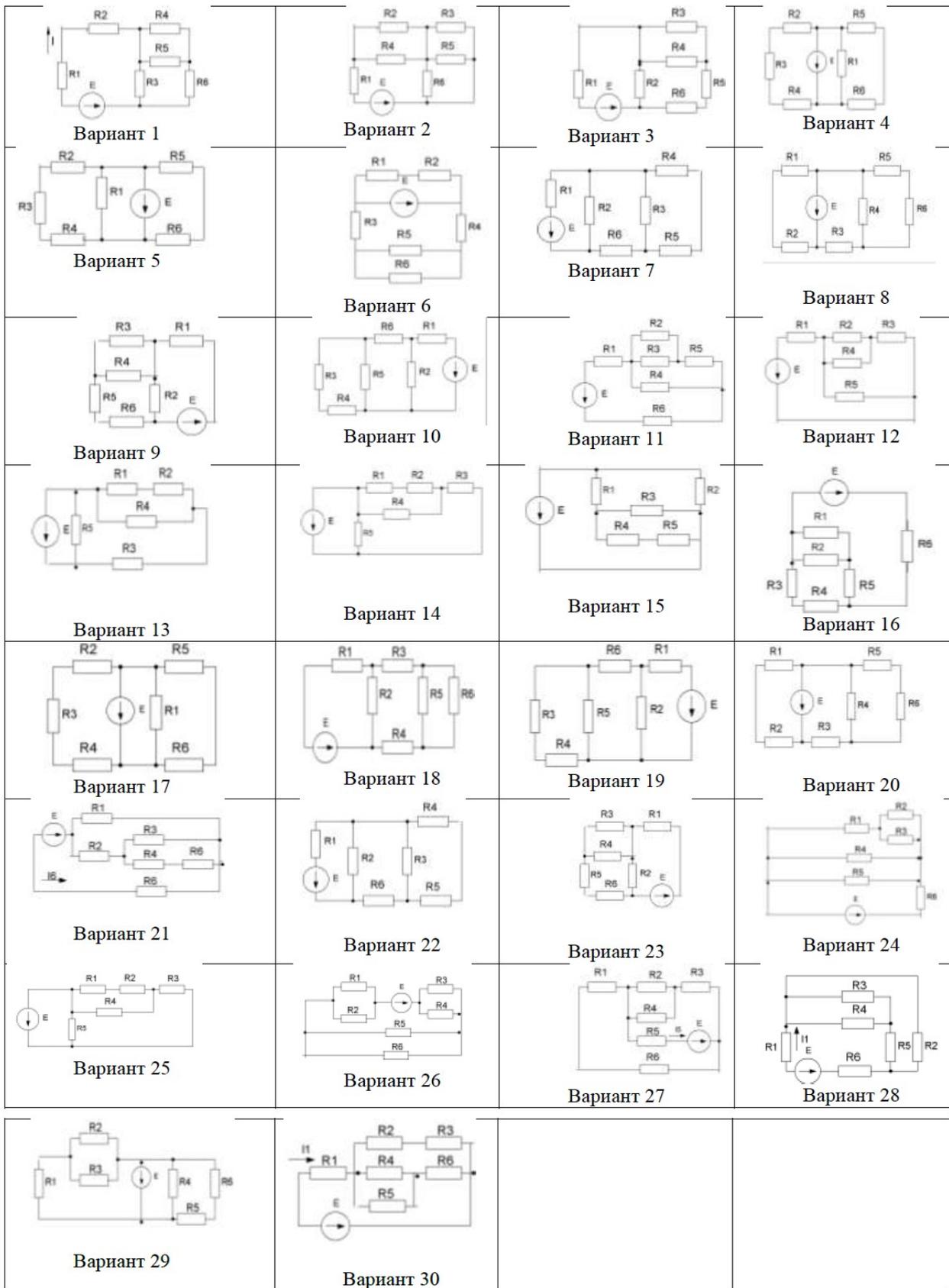
Определяют ток в упрощенной схеме, затем возвращаются к исходной схеме и определяют в ней токи.

**Задание.** В цепи со смешанным соединением сопротивлений для заданных значений

сопротивлений участков, ЭДС, напряжения или тока участка (таблица 1) определить ЭДС, токи, напряжения и мощности каждого участка. Составить баланс мощностей.

Вариант	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R_{вн.}$ , Ом	I, U, E
1	9	10	100	30	60	80	1	$I_1 = 3 \text{ A}$
2	8	5	25	12,8	18	12	1	$U_4 = 76,8 \text{ B}$
3	8	150	60	30	50	30	20	$E = 140 \text{ B}$
4	48	16	24	8	4	8	0,5	$E = 164 \text{ B}$
5	10	10	20	20	30	8	0,2	$E = 151 \text{ B}$
6	48	16	24	8	4	8	0,5	$E = 164 \text{ B}$
7	40	35	6	12	6	9	1	$U = 190 \text{ B}$
8	24	50	75	10	40	20	1	$I_1 = 5 \text{ A}$
9	28	12	24	20	30	50	1	$I = 10 \text{ A}$
10	9	150	60	40	50	26	1	$E = 420 \text{ B}$
11	48	100	20	80	150	40	2	$U_1 = 96 \text{ B}$
12	5	6	8	3	10	20	2	$U = 60 \text{ B}$
13	4	15	4	10	15	-	1	$I_1 = 25 \text{ A}$
14	8	4	2	24	15	-	2	$U_3 = 24 \text{ B}$
15	20	10	12	20	12	-	2	$I_3 = 5 \text{ A}$
16	4	10	6	2	24	-	1	$U_4 = 24 \text{ B}$
17	40	75	100	100	100	50	1	$I_6 = 5 \text{ A}$
18	24	8	12	4	2	4	0,25	$E = 82 \text{ B}$
19	4	10	6	3	2	8	1	$E = 200 \text{ B}$
20	24	50	10	40	75	20	1	$U_1 = 48 \text{ B}$
21	14	6	12	10	15	25	0,5	$I = 5 \text{ A}$
22	4	5	10	3	6	8	1	$I_6 = 4 \text{ A}$
23	12	10	10	2	8	5	3	$I_1 = 3 \text{ A}$
24	4	10	6	3	5	3	1	$E = 200 \text{ B}$
25	2	15	24	8	4	12	2	$U_1 = 12 \text{ B}$
26	8	4	12	8	14	-	1	$I_4 = 2 \text{ A}$
27	9	10	100	30	60	80	1	$I_1 = 3 \text{ A}$
28	5	20	10	40	15	25	2	$I_5 = 20 \text{ A}$
29	40	75	100	100	100	50	1	$I_1 = 4 \text{ A}$
30	40	35	60	114	6	9	0,5	$U = 187,5 \text{ B}$

Таблица 2 Схемы электрических цепей



### Порядок расчета.

1. Определяют эквивалентное сопротивление цепи. Для этого выделяют участки, соединенные последовательно или параллельно, заменяют их эквивалентными сопротивлениями. Упрощают электрическую цепь, приводят к простейшему виду с одним сопротивлением.

Для последовательного соединения

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Для параллельного соединения двух сопротивлений

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Для параллельного соединения трех и более сопротивлений

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

2. Определяют токи и напряжения отдельных участков по закону Ома

$$I_n = \frac{U_n}{R_n} \quad U_n = I_n \cdot R_n$$

3. Определяют мощности отдельных участков

$$P_n = U_n \cdot I_n$$

4. Составляют баланс мощностей

$$P_u = P_{\text{вн}} + P,$$

где  $P_{\text{вн}} = U_{\text{вн}} \cdot I = I^2 R_{\text{вн}}$  - мощность потерь внутри источника,

$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$  - мощность приемника

$P_u = EI$  - мощность источника

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема соединения
4. Задание
5. Расчеты токов и напряжений
6. Расчеты мощности и проверка баланса мощности
7. Вывод.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3.

**Расчеты электрических цепей с двумя узлами (метод узловых напряжений)**

**Цель работы** - освоить методику расчета цепей постоянного тока узловых напряжений.

Метод узловых напряжений (метод двух узлов) применяется для расчета цепей с несколькими источниками и двумя узлами. Напряжение между двумя узлами называют узловым.

**Порядок выполнения расчета**

1. Обозначают узлы в цепи, например  $a$  и  $b$ .
2. Направляют токи во всех ветвях к одному узлу.
3. Определяют проводимость каждой ветви  $g = \frac{1}{R}$ , где  $R$  — эквивалентное сопротивление каждой ветви.
4. Определяют узловое напряжение

$$U_{ab} = \frac{\sum Eg}{\sum g},$$

где  $\sum Eg$  — алгебраическая сумма произведений ЭДС на проводимость соответствующей ветви. Если ЭДС совпадает по направлению с током, то  $Eg > 0$ . Если не совпадает, то  $Eg < 0$ . Если источник ЭДС отсутствует в ветви, то  $Eg = 0$ .

5. Определяют токи в ветвях

$$I = g(E - U_{ab}).$$

6. Если источник ЭДС отсутствует в ветви, то ток в данной ветви

$$I = -gU_{a6}.$$

7. Проверяют правильность решения, составив уравнение баланса мощностей или рассчитав цепь другим методом.

Рассмотрим применение этого метода для цепи (рис. 3.43) с двумя узлами и параметрами:  $E_1 = 120$  В,  $E_2 = 50$  В,  $R_1 = R_2 = R_3 = 2$  Ом,  $R_4 = R_5 = 1$  Ом. Обозначим узлы и направим все токи к узлу  $a$ .

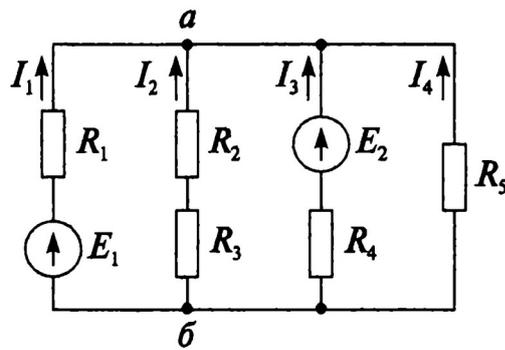


Рис. 3.43

Определим проводимость каждой ветви:

$$g_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ См};$$

$$g_2 = \frac{1}{R_2 + R_3} = \frac{1}{2 + 2} = 0,25 \text{ См};$$

$$g_3 = g_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{1} = 1 \text{ См}.$$

Определим узловое напряжение

$$U_{a6} = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} = \frac{120 \cdot 0,5 - 50 \cdot 1}{0,5 + 0,25 + 1 + 1} = 3,64 \text{ В}.$$

Токи в ветвях имеют следующие значения:

$$I_1 = g_1(E_1 - U_{a6}) = 0,5(120 - 3,64) = 58,18 \text{ А};$$

$$I_2 = -g_2 U_{a6} = -0,25 \cdot 3,64 = -0,91 \text{ А};$$

$$I_3 = g_3(-E_2 - U_{a6}) = 1 \cdot (-50 - 3,64) = -53,64 \text{ А};$$

$$I_4 = -g_4 U_{a6} = -1 \cdot 3,64 = -3,64 \text{ А}.$$

Проверим правильность решения по первому закону Кирхгофа

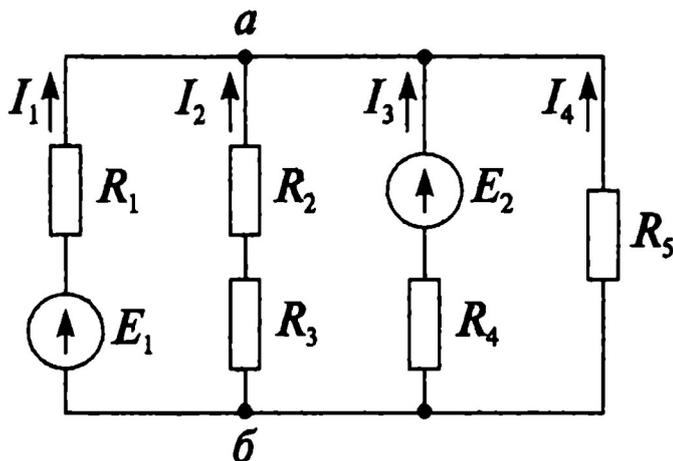
$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

$$58,18 - 0,91 - 53,64 - 3,64 = 0$$

$$-0,01 \approx 0.$$

Задание.

Для заданной схемы согласно своему варианту выданному преподавателем, рассчитать цепь методом узлового напряжения. Обозначить узлы и направить все токи к узлу а.



Вариант	E1, Ом	E2, Ом	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом
1	150	80	18	2	18	8	1
2	140	70	5	10	4	6	1
3	130	65	5	2	2	2	1
4	125	60	3	6	8	10	1
5	120	55	18	2	2	2	1
6	115	50	4	8	8	6	1
7	110	45	2	5	5	2	1
8	135	65	8	4	4	8	1
9	145	60	10	5	10	5	1
10	230	120	6	2	3	4	1

Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема
4. Задание
5. Вывод.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4

### Расчеты электрических цепей методом преобразований

**Цель:** научиться рассчитывать нелинейные электрические цепи постоянного тока методом преобразований.

#### Теоретическая часть

В сложных электрических цепях часто встречаются ветви, соединенные треугольником (рис. 1.4, а) или звездой (рис. 1.4, б).

Соединения такого вида очень распространены в трехфазных цепях, при этом часто возникает необходимость перехода от одного вида соединения к другому, но эквивалентному. Кроме того, такое преобразование часто применяется для упрощения схемы.

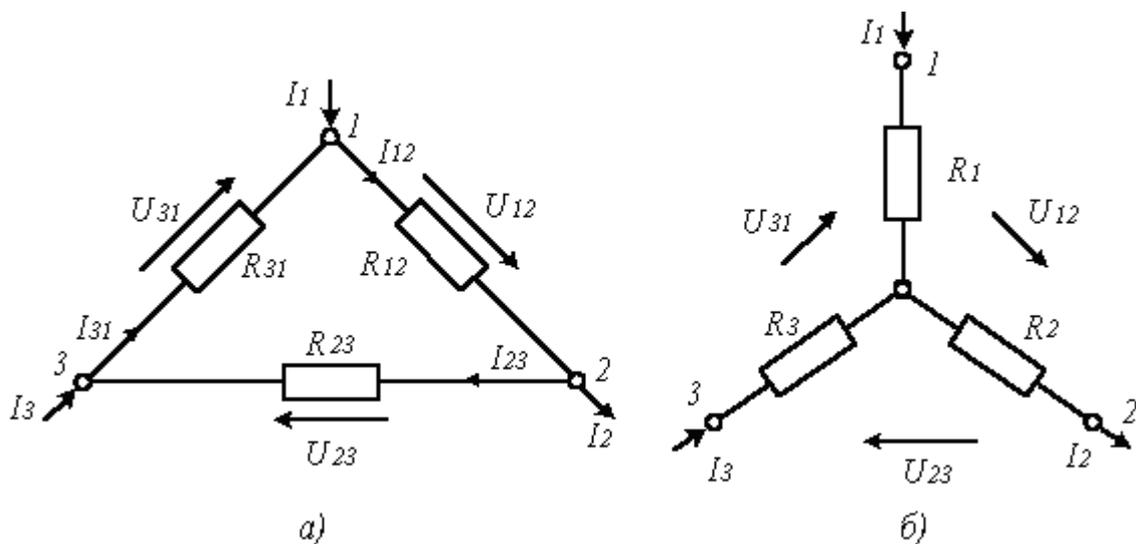


Рис. 1.4. Схемное соединение резисторов треугольником (рис. а) и звездой (рис. б)

Практический интерес представляют соотношения сопротивлений резисторов этих цепей при их эквивалентных преобразованиях. Условие эквивалентности преобразования этих цепей заключается в том, что при одинаковых напряжениях между узлами 1, 2 и 3, вытекающие (вытекающие) извне токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в этих узлах также одинаковы, т.е. должны быть одинаковыми сопротивления между этими узлами.

Рассмотрим эквивалентное преобразование звезды в треугольник и треугольника в звезду на схемах приведенных на рис.

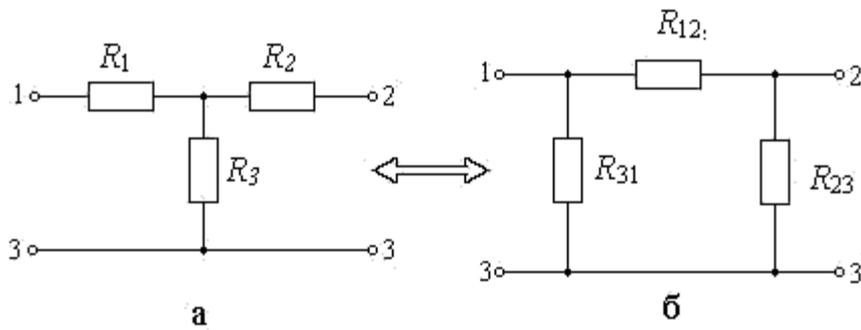


Рис. Схема для расчета правила эквивалентного преобразование звезды в треугольник и треугольника в звезду

Для того, чтобы преобразование было эквивалентным, достаточно равенства сопротивлений между точками 1 – 2, 2 – 3 и 3 – 1 в обеих схемах. Запишем систему уравнений для сопротивлений между указанными точками для обеих схем.

Для точек 1 – 2:

$$R_1 + R_2 = \frac{R_{12} (R_{23} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ; \quad (1.15)$$

Для точек 2 – 3:

$$R_2 + R_3 = \frac{R_{23} (R_{12} + R_{31})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} ; \quad (1.16)$$

Для точек 3 – 1:

$$R_1 + R_3 = \frac{R_{31} (R_{12} + R_{23})}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} . \quad (1.17)$$

Если решить эту систему относительно сопротивлений  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{31}$  получим формулы преобразования звезды в треугольник:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3} , \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1} , \quad R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2} . \quad (1.18)$$

Если решить систему исходных уравнений относительно сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  получим формулы преобразования треугольника в звезду:

$$R_1 = \frac{R_{12} R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} , \quad R_2 = \frac{R_{23} R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} , \quad R_3 = \frac{R_{31} R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} . \quad (1.19)$$

Пример выполнения работы.

Требуется рассчитать цепь, показанную на рис. а, при следующих числовых значениях ее параметров:  $E = 660$  В,  $R_1 = 20$  Ом,  $R_2 = 30$  Ом,  $R_3 = 5$  Ом,  $R_4 = 20$  Ом,  $R_5 = 50$  Ом.

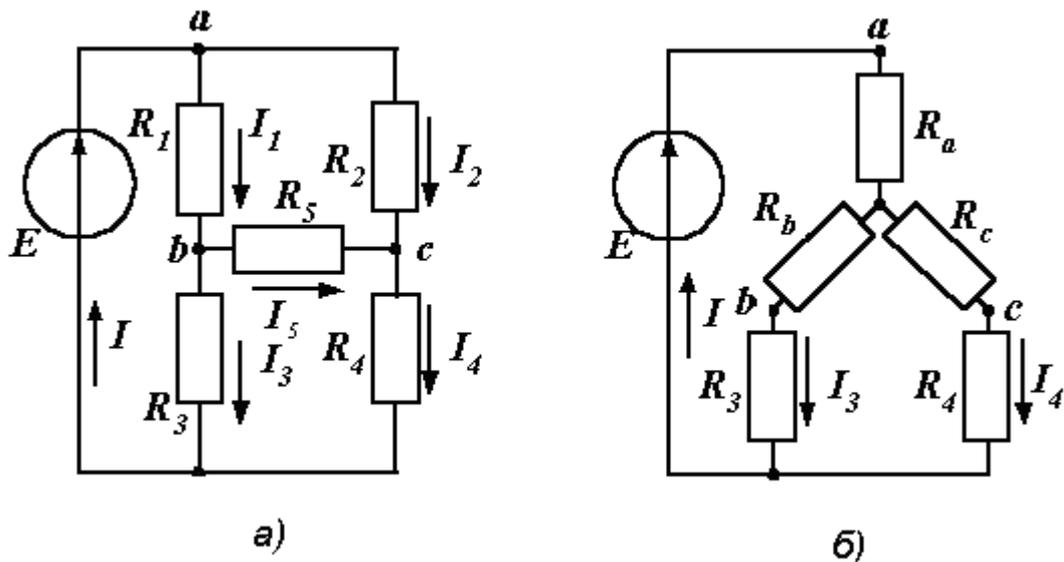


Рис. 1.7. Преобразования электрической цепи в примере 2.

Попытка определить общее сопротивление цепи на рис. не зная правил эквивалентного преобразования треугольника в звезду и наоборот, оказывается безрезультатной, так как здесь мы не находим ни последовательно, ни параллельно соединенных сопротивлений. Решить задачу помогает преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду.

Решение.

Решение выполняем преобразованием треугольника в звезду.

После преобразования треугольника, образованного сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_5$ , в звезду, получаем схему, показанную на рис. б. Обращаем внимание на то, что токи в непреобразованной части схемы ( $I$ ,  $I_3$  и  $I_4$ ) остались теми же.

Сопротивления звезды определяем по сформулированному выше правилу:

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_5} = 6 \text{ Ом}; \quad R_b = \frac{R_1 R_5}{R_1 + R_2 + R_5} = 10 \text{ Ом}; \quad R_c = \frac{R_2 R_5}{R_1 + R_2 + R_5} = 15 \text{ Ом}.$$

Теперь общее сопротивление цепи легко находится:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_a + \frac{(R_b + R_3)(R_c + R_4)}{R_b + R_3 + R_c + R_4} = 16,5 \text{ Ом}.$$

Ток, протекающий по источнику (одинаковый в заданной и преобразованной схемах), равен

$$I = E / R_{\text{ЭКВ}} = 40 \text{ А}.$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_3 = I \frac{R_c + R_4}{R_c + R_4 + R_b + R_3} = 28 \text{ А}; \quad I_4 = I \frac{R_b + R_3}{R_c + R_4 + R_b + R_3} = 12 \text{ А}.$$

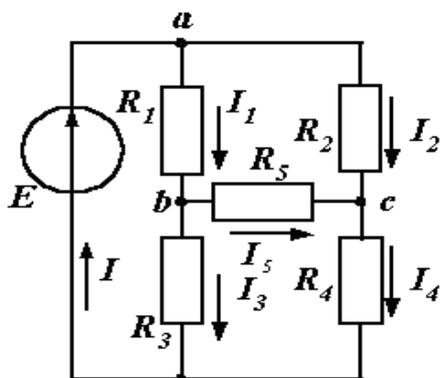
Возвращаемся к исходной схеме (рис. а) и находим:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{E - I_3 R_3}{R_1} = 26 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{U_{ac}}{R_2} = \frac{E - I_4 R_4}{R_2} = 14 \text{ А}.$$

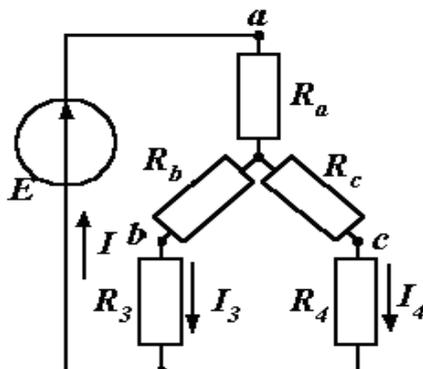
Ток в пятой ветви находим из первого закона Кирхгофа:  $I_5 = I_1 - I_3 = 26 - 28 = -2$  А. Знак минус говорит о том, что действительное направление тока  $I_5$  противоположно указанному на схеме.

### Задание

Для заданной схемы согласно своему варианту выданному преподавателем, рассчитать цепь методом преобразования.



а)



б)

Вариант	E1, Ом	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом
1	150	18	2	18	8	12
2	140	5	10	4	6	5
3	130	5	2	2	2	9
4	125	3	6	8	10	4
5	120	18	2	2	2	2
6	115	4	8	8	6	7
7	110	2	5	5	2	3
8	135	8	4	4	8	2
9	145	10	5	10	5	1
10	230	6	2	3	4	15

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема
4. Задание
5. Вывод.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №5

#### Расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока

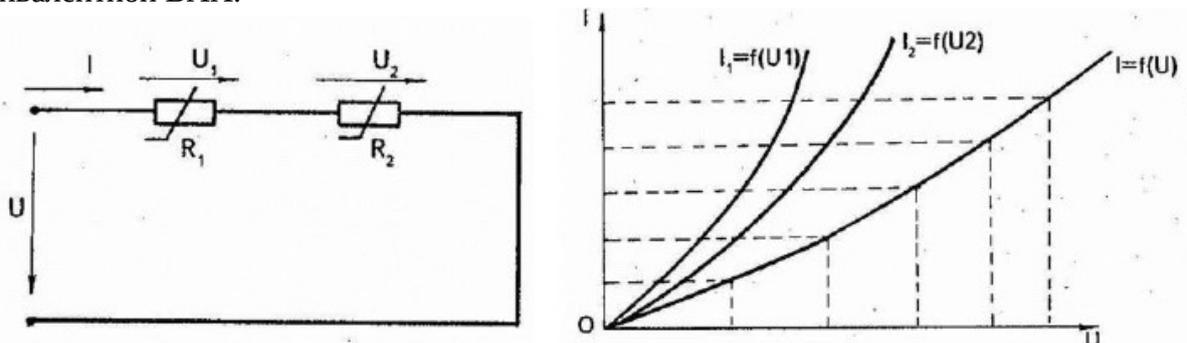
**Цель:** научиться рассчитывать нелинейные электрические цепи постоянного тока графическим методом

### Теоретическая часть

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ по известной ВАХ нелинейного элемента (или элементов, если их несколько), представленная в виде графика или таблицы

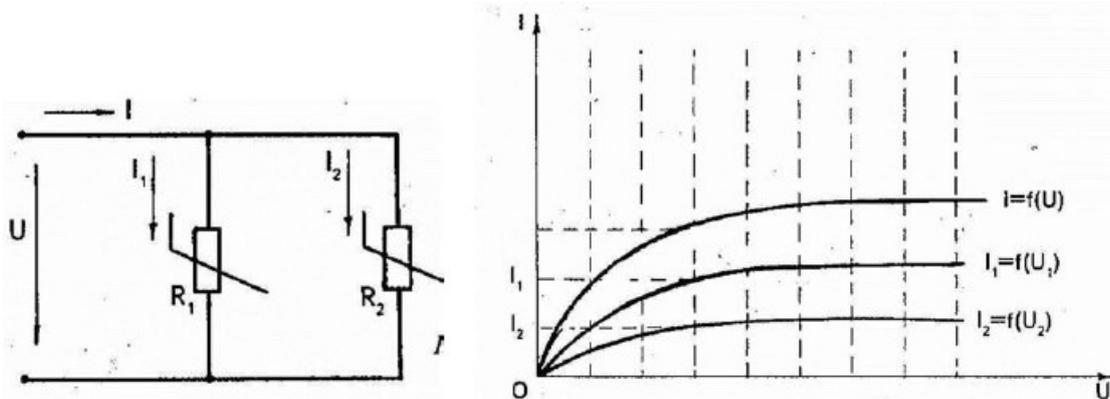
#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЭ

- Общим является ток
- Напряжение равно сумме напряжений на отдельных элементах.
- Задавшись значением тока, по ВАХ нелинейных элементов определить соответствующие напряжения, а затем их сумму.
- Заданное значение тока и суммарное значение напряжения определяют точку эквивалентной ВАХ.



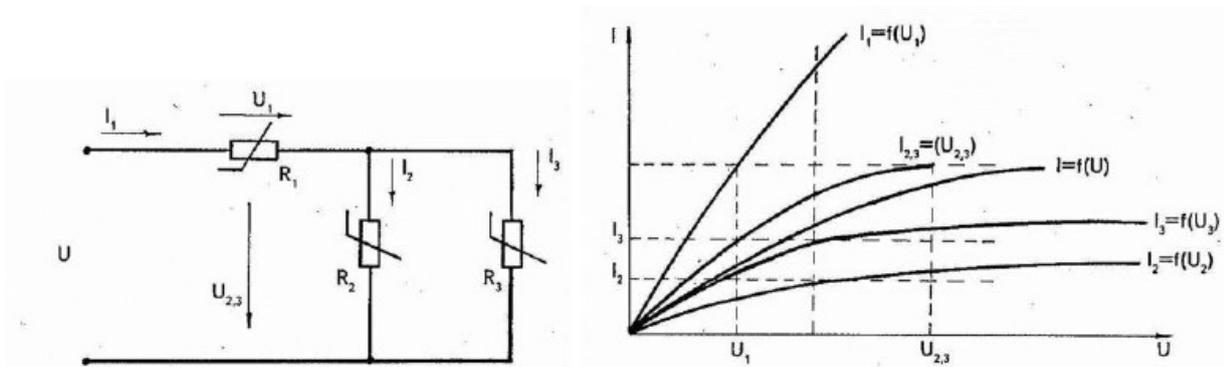
#### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЭ

- Общим является напряжение
- Ток равен сумме токов на отдельных элементах.
- Задавшись значением напряжения, по ВАХ нелинейных элементов определить соответствующие токи, а затем их сумму.
- Заданное значение напряжения и суммарное значение тока определяют точку эквивалентной ВАХ.



#### СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ НЭ

- Построить ВАХ участка с параллельным соединением элементов
- Построить ВАХ всей цепи



## ХОД РАБОТЫ

1. Решите задачи графическим методом.

### Задача №1

Нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2 соединены последовательно. ВАХ заданы таблицами. Начертите схему цепи. и постройте ее ВАХ.

	$I_1$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
НЭ1	$U_1$	10	15	20	22	25	29	30
НЭ2	$U_2$	15	25	35	42	50	55	60

### Задача №2

Нелинейные элементы НЭ1, НЭ2 и НЭ3 соединены параллельно. ВАХ заданы таблицами. Начертите схему цепи и постройте ее ВАХ.

	$U$	10	20	30	40	50	60	70	80
НЭ1	$I_3$	0,1	0,15	0,34	0,38	0,45	0,47	0,49	0,5
НЭ2	$I_4$	0,1	0,2	0,22	0,25	0,27	0,28	0,29	0,3
НЭ3	$I_5$	0,05	0,09	0,1	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14

### Задача №3

Нелинейные элементы НЭ1 и НЭ2 соединены параллельно и к ним присоединен элемент НЭ3. ВАХ заданы таблицами. Начертите схему цепи и постройте ее ВАХ.

	$U$	20	40	60	80	100	120	140	160
НЭ1	$I_3$	0,2	0,3	0,4	0,42	0,45	0,47	0,49	0,5
НЭ2	$I_4$	0,1	0,2	0,24	0,28	0,3	0,33	0,36	0,38
НЭ3	$I_5$	0,05	0,09	0,1	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15

2. Сделайте вывод о проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое нелинейный элемент?
2. Опишите графический метод расчета нелинейных цепей при последовательном соединении нелинейных элементов.
3. Опишите графический метод расчета нелинейных цепей при параллельном соединении нелинейных элементов.
4. Опишите графический метод расчета нелинейных цепей при смешанном соединении нелинейных элементов.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №6

Тема: Расчет параметров синусоидальных величин

Цель работы - освоить методику расчета параметров синусоидальных величин

**Содержание работы:**

**Задание 1.** Построить векторную диаграмму токов. Определить действующие значения токов и фазовый сдвиг между ними.

**Задание 2.** Построить векторную диаграмму напряжений. Определить частоту тока, период и начальные фазы.

**Задание 3.** Токи заданы аналитическими выражениями: Определить максимальное значение суммарного тока методом векторных диаграмм и записать его аналитическое выражение.

Данные для своего варианта взять из таблицы 1

Таблица 1

Вариант	Задание 1	Задание 2	Задание 3
1	$i_1 = 20 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 15 \sin(\omega t - 20^\circ)$	$u_1 = 2 \sin(314t - 20^\circ)$ $u_2 = 5 \sin(314t + 20^\circ)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^\circ)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^\circ)$
2	$i_1 = 40 \sin(\omega t + 120^\circ)$ $i_2 = 50 \sin \omega t$	$u_1 = 15 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $u_2 = 100 \sin(\omega t - 90^\circ)$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^\circ)$
3	$i_1 = 120 \sin \omega t$ $i_2 = 60 \sin(\omega t - 120^\circ)$	$u_1 = 5,4 \sin(141t + 45^\circ)$ $u_2 = 1,2 \sin(141t + 150^\circ)$	$i_1 = 2,82 \sin(\omega t + 225^\circ)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 45^\circ)$
4	$i_1 = 6,5 \sin(628t - 150^\circ)$ $i_2 = 2,5 \sin(628t + 10^\circ)$	$u_1 = 2,5 \sin(314t + 10^\circ)$ $u_2 = 1,4 \sin(314t + 90^\circ)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^\circ)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^\circ)$
5	$i_1 = 15 \sin(1256t + 30^\circ)$ $i_2 = 4 \sin(1256t + 50^\circ)$	$u_1 = 6 \sin 1256t$ $u_2 = 10 \sin(\omega t - 90^\circ)$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^\circ)$
6	$i_1 = 3,5 \sin \omega t$ $i_2 = 6 \sin(\omega t - 20^\circ)$	$u_1 = 1,45 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $u_2 = 10 \sin(\omega t - 90^\circ)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^\circ)$ $i_2 = 0,705 \sin(\omega t - 90^\circ)$
7	$i_1 = 15 \sin(\omega t - 20^\circ)$ $i_2 = 10 \sin(\omega t + 60^\circ)$	$u_1 = 4,5 \sin(141t + 40^\circ)$ $u_2 = 1,2 \sin(141t + 90^\circ)$	$i_2 = 0,705 \sin(\omega t - 90^\circ)$ $i_3 = 1,41 \sin(\omega t + 315^\circ)$
8	$i_1 = 2 \sin(314t - 120^\circ)$ $i_2 = 5 \sin(314t + 25^\circ)$	$u_1 = 200 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $u_2 = 150 \sin(\omega t - 20^\circ)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^\circ)$
9	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^\circ)$	$u_1 = 400 \sin(\omega t + 120^\circ)$ $u_2 = 50 \sin \omega t + 40^\circ$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^\circ)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t + 225^\circ)$
10	$i_1 = 20 \sin \omega t + 30^\circ$ $i_2 = 6 \sin(\omega t + 120^\circ)$	$u_1 = 50 \sin(141t + 45^\circ)$ $u_2 = 120 \sin(141t + 150^\circ)$	$i_1 = 2,82 \sin(\omega t + 225^\circ)$ $i_2 = 5,64 \sin(\omega t + 45^\circ)$

11	$i_1 = 2,5 \sin(628t - 45^0)$ $i_2 = 5 \sin(628t + 120^0)$	$u_1 = 25 \sin(314t + 10^0)$ $u_2 = 40 \sin(314t + 30^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$
12	$i_1 = 3,5 \sin(628t - 150^0)$ $i_2 = 12,5 \sin(628t + 10^0)$	$u_1 = 40 \sin(1256t + 20^0)$ $u_2 = 80 \sin(\omega t - 90^0)$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^0)$
13	$i_1 = 20 \sin(\omega t - 45^0)$ $i_2 = 10 \sin(\omega t - 20^0)$	$u_1 = 20 \sin(314t - 20^0)$ $u_2 = 55 \sin(314t + 20^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 125^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 15^0)$
14	$i_1 = 40 \sin(\omega t + 120^0)$ $i_2 = 50 \sin \omega t$	$u_1 = 15 \sin(\omega t + 45^0)$ $u_2 = 100 \sin(\omega t - 90^0)$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^0)$
15	$i_1 = 120 \sin \omega t$ $i_2 = 60 \sin(\omega t - 120^0)$	$u_1 = 5,4 \sin(141t + 45^0)$ $u_2 = 1,2 \sin(141t - 150^0)$	$i_1 = 2,82 \sin(\omega t - 125^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 45^0)$
16	$i_1 = 6,5 \sin(628t - 150^0)$ $i_2 = 2,5 \sin(628t + 10^0)$	$u_1 = 2,5 \sin(314t + 100^0)$ $u_2 = 1,4 \sin(314t - 90^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$
17	$i_1 = 15 \sin(1256t + 30^0)$ $i_2 = 4 \sin(1256t + 150^0)$	$u_1 = 6 \sin 1256t$ $u_2 = 10 \sin(\omega t - 90^0)$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^0)$
18	$i_1 = 3,5 \sin \omega t$ $i_2 = 6 \sin(\omega t - 20^0)$	$u_1 = 1,45 \sin(\omega t + 45^0)$ $u_2 = 10 \sin(\omega t - 90^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^0)$ $i_2 = 0,705 \sin(\omega t - 90^0)$
19	$i_1 = 15 \sin(\omega t - 20^0)$ $i_2 = 10 \sin(\omega t + 60^0)$	$u_1 = 4,5 \sin(141t + 40^0)$ $u_2 = 1,2 \sin(141t + 90^0)$	$i_2 = 0,705 \sin(\omega t - 90^0)$ $i_3 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$
20	$i_1 = 2 \sin(314t - 120^0)$ $i_2 = 5 \sin(314t + 25^0)$	$u_1 = 200 \sin(\omega t + 45^0)$ $u_2 = 150 \sin(\omega t - 20^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$
21	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$	$u_1 = 400 \sin(\omega t + 150^0)$ $u_2 = 150 \sin \omega t + 140^0$	$i_1 = 5,64 \sin(\omega t + 145^0)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 225^0)$
22	$i_1 = 20 \sin \omega t + 30^0$ $i_2 = 6 \sin(\omega t + 120^0)$	$u_1 = 50 \sin(141t + 45^0)$ $u_2 = 120 \sin(141t + 150^0)$	$i_1 = 2,82 \sin(\omega t + 225^0)$ $i_2 = 5,64 \sin(\omega t + 45^0)$
23	$i_1 = 22,5 \sin(628t - 45^0)$ $i_2 = 5 \sin(628t + 120^0)$	$u_1 = 25 \sin(314t + 10^0)$ $u_2 = 40 \sin(314t + 30^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 225^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 315^0)$
24	$i_1 = 3,5 \sin(628t - 150^0)$ $i_2 = 12,5 \sin(628t + 10^0)$	$u_1 = 46 \sin(1256t + 20^0)$ $u_2 = 180 \sin(\omega t - 90^0)$	$i_1 = 2,64 \sin(\omega t + 45^0)$ $i_2 = 2,82 \sin(\omega t - 45^0)$
25	$i_1 = 3,5 \sin(628t - 180^0)$ $i_2 = 5,5 \sin(628t - 120^0)$	$u_1 = 250 \sin(314t + 100^0)$ $u_2 = 140 \sin(314t - 90^0)$	$i_1 = 1,41 \sin(\omega t + 125^0)$ $i_2 = 1,41 \sin(\omega t + 15^0)$

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Векторная диаграмма.
4. Задание 1,2,3.
5. Вывод.

## «Расчет неразветвленных электрических цепей переменного тока»

**Цель:** закрепить знания методов расчета параметров неразветвленных электрических цепей переменного тока.

### Теоретические сведения

Реактивное сопротивление цепи равно разности индуктивных и емкостных сопротивлений:

$$X = X_L - X_C \quad (\text{брать все } X \text{ из схемы})$$

Формула для полного сопротивления цепи имеет вид:

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

Эту формулу нужно привести в соответствие со своей схемой, следуя указаниям:

- если одно из этих сопротивлений в схеме отсутствует, то брать его за ноль;

- если каких-то сопротивлений два, то при их подставке в формулу складывают; причем  $X_L$  всегда берут с «плюсом», а  $X_C$  - с «минусом».

Ток в цепи можно найти несколькими способами:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}}; \quad I = \sqrt{\frac{Q}{X}}; \quad I = \sqrt{\frac{S}{Z}}; \quad I = \frac{U}{Z}; \quad I = \frac{U_R}{R}; \quad I = \frac{U_X}{X}$$

Напряжения в цепи также можно найти по нескольким формулам:

$$U_R = IR; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C; \quad U = IZ$$

Коэффициент мощности равен отношению активного сопротивления к полному:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

$\sin$  находят как отношение реактивного сопротивления к полному:

$$\sin \varphi = \frac{X}{Z}$$

Формулы для мощности цепи имеют вид:

$$\text{активная} \quad P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$\text{реактивная} \quad Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$\text{полная} \quad S = U \cdot I$$

Для построения векторной диаграммы необходимо:

1. Составить уравнение  $U = U_{\dots} + U_{\dots} + U_{\dots}$  (векторно сложить в порядке схемы соответствующие напряжения).
2. Выбрать масштаб, т.е. поделить все значения напряжений на одно число, чтобы результат деления было удобно строить в сантиметрах.

$$U_{\dots} = \dots \text{ В}$$

$$U_{\dots} = \dots \text{ В}$$

$$U_{\dots} = \dots \text{ В}$$

$$I_{\dots} = \dots \text{ А}$$

3. После этого построить векторную диаграмму по масштабу и в соответствии с уравнением.

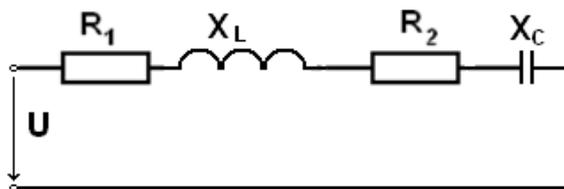
**ПРИМЕЧАНИЕ:**

- a) первым всегда строят ток  $I$ ;
- b) вектор  $U_R$  всегда идет параллельно току;
- c) вектор  $U_L$  перпендикулярно току вверх;
- d)  $U_C$  перпендикулярно току вниз;
- e) итоговый вектор  $U$  соединяет начало первого вектора с концом последнего.

**Проверка:** длина вектора  $U$  в сантиметрах, измеренная по линейке, должна совпадать с расчетной величиной.

**Задание**

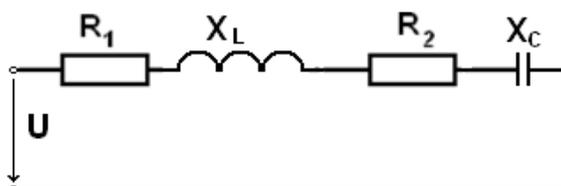
Неразветвленная цепь переменного тока содержит активные и реактивные сопротивления, величины которых заданы в таблице. Кроме того, известна одна из дополнительных величин. Определить следующие величины, если они не заданы в таблице вариантов: полное сопротивление цепи; напряжение, приложенное к цепи; силу тока в цепи; активную, реактивную и полную мощности;  $\cos \varphi$ ;  $\sin \varphi$ .



Вариант	R1, Ом	R2, Ом	XL, Ом	XC, Ом	Дополнительная величина
1	8	4	18	2	$I = 10A$
2	10	20	50	10	$P = 120 \text{ Вт}$
3	3	1	5	2	$P_2 = 100 \text{ Вт}$
4	12	20	30	6	$U_1 = 72 \text{ В } I = 1 \text{ А}$
5	4	8	18	2	$U = 40 \text{ В}$
6	2	1	4	8	$Q_1 = -96 \text{ вар}$
7	1	3	2	5	$Q_{C1} = -125 \text{ вар}$
8	1	2	8	4	$S = 80 \text{ В} \cdot \text{А}$
9	20	10	10	50	$Q = -640 \text{ вар}$
10	8	4	6	22	$P_1 = 32 \text{ Вт}$

**Порядок выполнения расчета**

1. Начертить исходную схему.



Вариант	R1, Ом	R2, Ом	XL, Ом	XC, Ом	Дополнительная величина
1	2	6	12	6	$Q = 150 \text{ вар}$

2. Найти реактивное сопротивление:

$$X = X_L - X_C = 12 - 6 = 6 \text{ Ом}$$

3. Найти полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \\ = \sqrt{(2 + 6)^2 + (12 - 6)^2} = 10 \text{ Ом}$$

4. Найти ток:

$$I = \sqrt{\frac{Q}{X}} = \sqrt{\frac{150}{6}} = 5 \text{ А}$$

5. Найти напряжения:

$$U_{R1} = IR_1 = 5 \cdot 2 = 10 \text{ В} \quad U_{R2} = IR_2 = 5 \cdot 6 = 30 \text{ В}$$

$$U_L = IX_L = 5 \cdot 12 = 60 \text{ В} \quad U_C = IX_C = 5 \cdot 6 = 30 \text{ В}$$

$$U = IZ = 5 \cdot 10 = 50 \text{ В}$$

6. Найти  $\cos \varphi$  и  $\sin \varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R_1 + R_2}{Z} = \frac{2 + 6}{10} = 0,8 \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z} = \frac{X_L - X_C}{Z} = \frac{12 - 6}{10} = 0,6$$

7. Найти мощности:

активная

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 50 \cdot 5 \cdot 0,8 = 200 \text{ Вт}$$

реактивная

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 50 \cdot 5 \cdot 0,6 = 150 \text{ вар}$$

полная

$$S = U \cdot I = 50 \cdot 5 = 250 \text{ В} \cdot \text{А}$$

8. Построить векторную диаграмму:

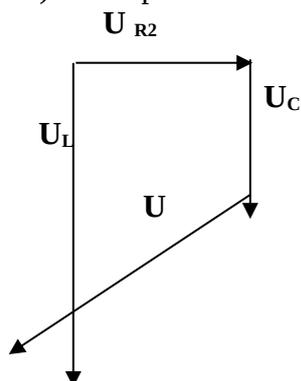
а) Векторно сложить соответствующие напряжения в порядке схемы

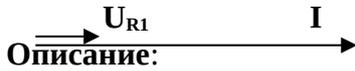
$$U = U_{R1} + U_L + U_{R2} + U_C$$

б) Выбрать масштаб, т.е. поделить все значения напряжений на одно число, чтобы результат деления было удобно строить в сантиметрах.

$U_{R1} = 10 \text{ В}$		1 см
$U_L = 60 \text{ В}$		6 см
$U_{R2} = 30 \text{ В}$	: 10	3 см
$U_C = 30 \text{ В}$		3 см
$U = 50 \text{ В}$		5 см
<hr/>		
$I = 5 \text{ А}$	: 1	5 см

в) Построить векторную диаграмму по масштабу и в соответствии с уравнением.





**Описание:**

1. Первым строят ток  $I$ , горизонтально, длиной 5 см;
2. Вектор  $U_{R1}$  идет параллельно току, длиной 1 см;
3. Вектор  $U_L$  перпендикулярно току вверх, от конца вектора  $U_{R1}$ , длиной 6 см;
4. Вектор  $U_{R2}$  идет параллельно току, от конца вектора  $U_L$ , длиной 3 см;
5.  $U_C$  перпендикулярно току вниз, от конца вектора  $U_{R2}$ , длиной 3 см;
6. Итоговый вектор  $U$  соединяет начало первого вектора  $U_{R1}$  с концом последнего  $U_C$ .

**Проверка:** длина вектора  $U$  в сантиметрах, измеренная по линейке, равна 5 см, что совпадает с расчетной величиной.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 8 РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы:** Приобретение практических навыков расчета разветвленных цепей переменного тока методом проводимостей и построения треугольников токов

### Теоретические сведения

При расчете разветвленных цепей ток в каждой ветви может быть разложен на две составляющие: активную и реактивную, которые не имеют физического смысла и являются расчетными величинами. Также вводят понятия трех проводимости — полной, активной и реактивной, причем только полная проводимость является величиной, обратной полному сопротивлению ветви.

Рассмотрим цепь, состоящую из активного сопротивления  $R$  и емкости  $C$  (рис. 10.1), по которой течет переменный ток  $i$  и приложено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin \omega t$ .

Ток в цепи разложим на две составляющие: активную  $I_a$ , которая совпадает по фазе с напряжением, и реактивную  $I_p$ , которая носит емкостной характер и опережает напряжение на  $90^\circ$ .

Построим векторную диаграмму для данной цепи (рис. 10.2) и на ее основе запишем соотношения между токами.

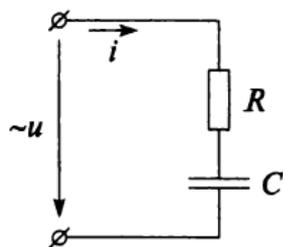


Рис. 10.1

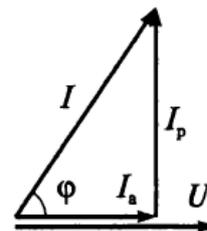


Рис. 10.2

Активная составляющая тока:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{R}{z} = \frac{UR}{z^2} = Ug,$$

где  $g$  — активная проводимость, равная

$$g = \frac{R}{z^2}.$$

Реактивная составляющая тока:

$$I_p = I \sin \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{x}{z} = \frac{Ux}{z^2} = Ub,$$

где  $b$  — реактивная проводимость, равная

$$b = \frac{x}{z^2}.$$

Отсюда величина полного тока в цепи:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = Uy,$$

где  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$  — полная проводимость цепи, определенная из треугольника проводимостей (рис. 10.3).

Построить векторную диаграмму токов можно и другим способом. Необходимо знать длину вектора тока  $I = Uy$  и угол сдвига фаз между током и напряжением  $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$  или  $\varphi = \arcsin \frac{b}{y}$ .

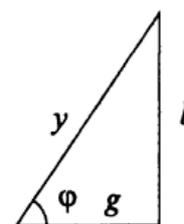


Рис. 10.3

### Задание

Цепь переменного тока состоит из двух параллельных ветвей, каждая из которых содержит активное  $R$  и реактивное  $X$  сопротивление, величины которых и действующее значение входного напряжения  $U$  заданы в таблице 11.1.

Пользуясь методом проводимостей, определить токи в параллельных ветвях  $I_1$ ,  $I_2$  и ток в неразветвленной части цепи  $I$ , а также мощности каждой ветви и всей цепи.

Построить треугольники токов и треугольник мощностей.

\*Записать формулы мгновенных значений напряжения  $u$ , тока в неразветвленной части цепи  $i$  и токов в ветвях  $i_1$ ,  $i_2$  при условии, что частота  $f = 100$  Гц,  $\psi_u = 90^\circ$

Таблица 11.1

Вариант	U, В	Z <sub>1</sub>		Z <sub>2</sub>	
		R <sub>1</sub> , Ом	X <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	X <sub>2</sub> , Ом
1	200	16	1/ωC <sub>1</sub> =12	10	ωL <sub>2</sub> =20
2	190	18,33	ωL <sub>1</sub> =8	15	1/ωC <sub>2</sub> =24
3	180	16,6	ωL <sub>1</sub> =15	7	1/ωC <sub>2</sub> =14,18
4	170	24	1/ωC <sub>1</sub> =20,6	17	ωL <sub>2</sub> =14,5
5	160	20	1/ωC <sub>1</sub> =10	12	1/ωC <sub>2</sub> =12
6	150	30	ωL <sub>1</sub> =21	15	1/ωC <sub>2</sub> =30
7	140	6	ωL <sub>1</sub> =20	10	1/ωC <sub>2</sub> =15
8	130	12	1/ωC <sub>1</sub> =15	18	ωL <sub>2</sub> =5
9	120	24	1/ωC <sub>1</sub> =18	20	ωL <sub>2</sub> =7
10	110	13	ωL <sub>1</sub> =10	22	1/ωC <sub>2</sub> =16
11	100	15	ωL <sub>1</sub> =12	25	1/ωC <sub>2</sub> =15
12	90	24	1/ωC <sub>1</sub> =12	23	ωL <sub>2</sub> =10
13	80	10	1/ωC <sub>1</sub> =20	15	ωL <sub>2</sub> =15
14	70	12	ωL <sub>1</sub> =16	12	1/ωC <sub>2</sub> =8

15	60	16	$\omega L_1=8$	8	$1/\omega C_2=15$
----	----	----	----------------	---	-------------------

### Последовательность выполнения

1. Изобразить схему цепи, учитывая характер нагрузок согласно данным своего варианта. Например, если в первой ветви имеется индуктивное сопротивление  $\omega L_1=20$  Ом, то следует обозначить его  $X_{L1}=20$  Ом.
2. Определить активные и реактивные проводимости ветвей  $g_i, b_i$ .
3. Определить активные и реактивные составляющие токов в ветвях  $I_{ai}, I_{pi}$  и тока в неразветвлённой части цепи  $I_a, I_p$ .
4. Вычислить полные токи в ветвях  $I_1, I_2$  и ток в неразветвлённой части цепи  $I$ .
5. Вычислить мощности  $P, Q, S$  в ветвях и всей цепи.
6. Выбрать масштабы по току и по напряжению. Построить треугольники токов.
7. Выбрать масштаб по мощности. Построить треугольник мощностей.
8. Определить  $\cos\varphi$  и  $\varphi$  для каждой ветви и для всей цепи.
9. Найти максимальные значения токов. Записать формулы мгновенных значений напряжения  $u$ , общего тока  $i$  и токов в ветвях  $i_1, i_2$ , учитывая сдвиги фаз  $\varphi$ .

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схему электрической цепи выполнять с применением чертёжных инструментов.
4. Задание 1,2,3.
5. Вывод.

### Контрольные вопросы

1. Формулы активной и реактивной проводимостей.
2. Из каких составляющих состоит ток каждой параллельной ветви по методу проводимостей?
3. Как заменяют ветви с приемниками при расчете электрической цепи методом проводимостей?
4. Как определяются активные и реактивные составляющие токов?
5. Как находится полный ток по методу проводимостей?
6. Как можно определить углы сдвига фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  между напряжениями и токами в ветвях?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №10

### «Расчет симметричных трехфазных цепей при соединении в звезду»

**Цель:** закрепить знания методов расчета параметров трехфазных цепей переменного тока.

#### Теоретические сведения

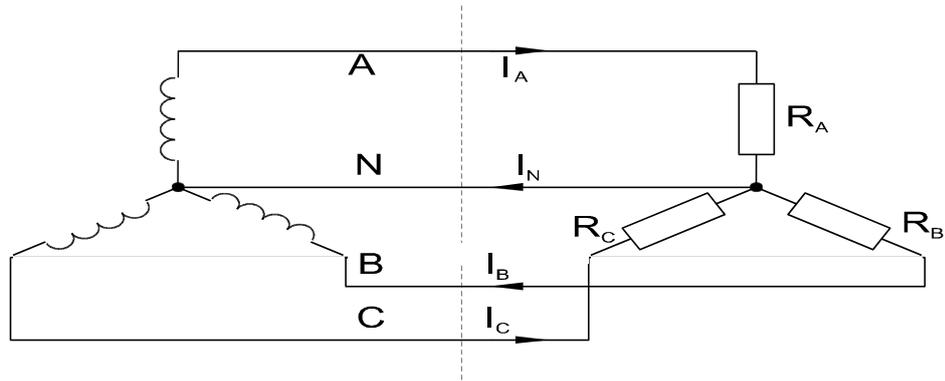
Электрические цепи, которые состоят из совокупности переменных ЭДС одной частоты и сдвинутых по фазе друг относительно друга на треть периода называют трехфазной системой переменного тока. Однофазная цепь, входящая в систему данной многофазной цепи называется *фазой*.

В трехфазных системах обмотки генератора и электроприемника соединяют по схемам «звезда» или «треугольник». Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «звезда», то к сопротивлениям нагрузки приложены фазные напряжения. Линейные токи равны фазным и определяются по закону Ома:

$$I_A = \frac{U_A}{R_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{R_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{R_C},$$

а ток в нейтрали равен векторной сумме этих токов:

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

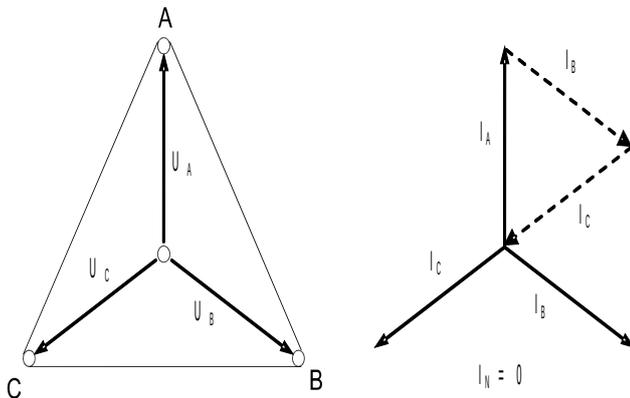


При симметричных напряжениях  $U_A, U_B, U_C$  и одинаковых сопротивлениях  $R_A = R_B = R_C = R$  токи  $I_A, I_B, I_C$  также симметричны и их векторная сумма ( $I_N$ ) равна нулю. Тогда

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R}; \quad I_N = 0$$

а напряжение  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$

Векторные диаграммы имеют вид:



Мощность трёхфазной нагрузки складывается из мощностей фаз:

$$\sum P = P_A + P_B + P_C$$

Когда нагрузка симметричная и чисто резистивная, имеем

$$\sum P = P_A + P_B + P_C = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi}$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке: активная мощность

$$\sum P = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos\phi = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos\phi$$

реактивная мощность

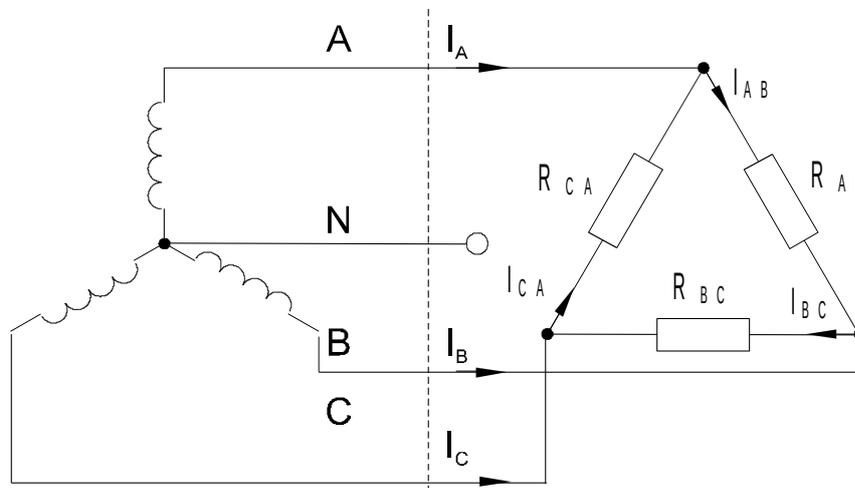
$$\sum Q = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin\phi = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л} \cdot \sin\phi$$

полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л}$$

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «треугольник», нагрузка  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$  и  $R_{CA}$  каждой фазы включается на полное линейное напряжение, которое равно фазному:

$$U_{л} = U_{\phi}$$



Фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  определяются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{R_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{R_{CA}},$$

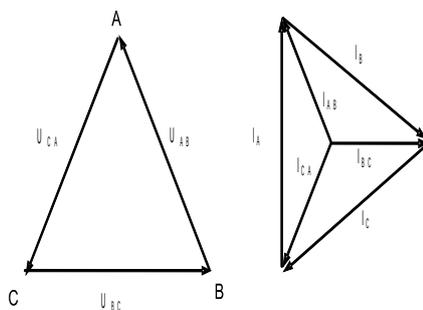
Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

При симметричных напряжениях  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и одинаковых нагрузках фаз  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$  токи также симметричны:

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi} = \sqrt{3} \frac{U_{\phi}}{R}$$

Векторные диаграммы имеют вид:



Мощность, потребляемая трехфазной нагрузкой при ее соединении в «треугольник», складывается из мощностей фаз

$$\sum P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$$

При симметричной или чисто активной нагрузке

$$\sum P = 3P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi}$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке:  
активная мощность

$$\sum P = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \phi$$

реактивная мощность

$$\sum Q = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \phi = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л} \cdot \sin \phi$$

полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3}U_{л} \cdot I_{л}$$

Расчет симметричной трехфазной системы при равномерной нагрузке сводится к расчету одной фазы независимо от наличия нейтрального провода.

При несимметричной системе напряжений или при неравномерной нагрузке фаз мощности определяются отдельно для каждой фазы.

Пример 1. Трехфазный потребитель с симметричной нагрузкой имеет активное сопротивление  $R = 6 \text{ Ом}$  и индуктивное сопротивление  $X_L = 8 \text{ Ом}$  в каждой фазе. Линейное напряжение  $U = 220 \text{ В}$ .

Определить мощность потребителя, если он соединен *звездой*.

Решение:  $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}$

$$Z_1 = Z_2 = Z_3, Z_{\phi} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10 \text{ Ом}$$

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ А}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0,6$$

$$P_{\phi} = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = 12,7 \cdot 127 \cdot 0,6 = 967,74 \text{ Вт}$$

мощность всех фаз  $P = 3P_{\phi} = 967,74 \cdot 3 = 2903,22 \text{ Вт} = 2,9 \text{ кВт}$

или  $P = \sqrt{3} \cdot IU \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 12,7 \cdot 220 \cdot 0,6 = 2903,22 \text{ Вт} = 2,9 \text{ кВт}$

**При несимметричной нагрузке необходимо сначала подсчитать мощность, потребляемую каждой фазой, а уже потом можно суммировать мощности всех фаз**

Пример 2. Потребитель трехфазного тока с несимметричной нагрузкой включен по схеме треугольник в сеть с линейным напряжением  $U = 380 \text{ В}$ .

В каждой фазе потребителя включены последовательно активное и индуктивное сопротивления, величины которых равны:

фаза I	$R_1 = 8 \text{ Ом}, X_{L1} = 4 \text{ Ом}$
фаза II	$R_2 = 2 \text{ Ом}, X_{L2} = 6 \text{ Ом}$
фаза III	$R_3 = 3 \text{ Ом}, X_{L3} = 5 \text{ Ом}$

Определить активную мощность потребителя.

Решение: фаза 1:  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{8^2 + 4^2} = \sqrt{80} = 8,9 \text{ Ом}$

$$I_{\phi 1} = \frac{U_{\phi}}{Z_1} = \frac{380}{8,9} = 42,6 \text{ А}$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{8}{8,9} = 0,9$$

$$P_1 = I_{\phi 1} U_{\phi} \cos \varphi_1 = 42,6 \cdot 380 \cdot 0,9 = 14569 \text{ Вт} \approx 14,57 \text{ кВт}$$

фаза 2:  $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{2^2 + 6^2} = \sqrt{40} = 6,3 \text{ Ом}$

$$I_{\phi 2} = \frac{U_{\phi}}{Z_2} = \frac{380}{6,3} = 60,3 \text{ А}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{2}{6,3} = 0,329$$

$$P_2 = I_{\phi 2} U_{\phi} \cos \varphi_2 = 60,3 \cdot 380 \cdot 0,32 = 7332 \text{ Вт} \approx 7,33 \text{ кВт}$$

фаза 3:  $Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_{L3}^2} = \sqrt{3^2 + 5^2} = \sqrt{34} = 5,8 \text{ Ом}$

$$I_{\phi 3} = \frac{U_{\phi}}{Z_3} = \frac{380}{5,8} = 65,5 A$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{3}{5,8} = 0,51$$

$$P_3 = I_{\phi 3} U_{\phi 3} \cos \varphi_3 = 65,5 \cdot 380 \cdot 0,51 = 12694 \text{ Вт} \approx 12,7 \text{ кВт}$$

Мощность трех фаз  $P = P_1 + P_2 + P_3 = 14,57 \text{ кВт} + 7,33 \text{ кВт} + 12,7 \text{ кВт} = 34,6 \text{ кВт}$

**Пример 3.** Три катушки с сопротивлением  $Z=10 \text{ Ом}$  соединены звездой и подключены к сети с  $U_{\text{Л}}=120 \text{ В}$ . Определить активную мощность фазы и всей цепи, если активное сопротивление каждой катушки  $R=6 \text{ Ом}$ .

Определить мощность потребителя, если он соединен звездой.

**Решение:** 1). коэффициент мощности  $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0,6$

2). Фазное напряжение и фазный (он же линейный ток)

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{120}{\sqrt{3}} = \frac{120}{1,73} = 69 \text{ В} \quad \text{и} \quad I_{\text{Л}} = I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{69}{10} = 6,9 \text{ А}$$

3). Активная мощность фазы  $P_{\phi} = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = 69 \cdot 6,9 \cdot 0,6 = 286 \text{ Вт}$

4). Активная мощность цепи  $P = 3P_{\phi} = 3 \cdot 286 = 858 \text{ Вт}$

### Задача 1

Трехфазный потребитель с симметричной нагрузкой имеет активное сопротивление  $R= \text{ Ом}$  и индуктивное сопротивление  $XL= \text{ Ом}$  в каждой фазе. Линейное напряжение  $U = \text{ В}$ .

Определить мощность потребителя, если он соединен звездой.

Вариант	R, Ом	, XL Ом	Uн, В	f, Гц
1	25	5	380	50
2	5	10	220	50
3	10	15	380	50
4	15	20	220	50
5	20	25	380	50
6	25	5	220	50
7	5	10	380	50
8	10	15	220	50
9	15	20	380	50
10	20	25	220	50

### Задача 2

Три катушки с сопротивлением  $Z= \text{ Ом}$  соединены звездой и подключены к сети с  $U_{\text{Л}} = \text{ В}$ . Определить активную мощность фазы и всей цепи, если активное сопротивление каждой катушки  $R= \text{ Ом}$ .

Определить мощность потребителя, если он соединен звездой.

Вариант	Z , Ом	, R Ом	Uл, В	f, Гц
1	25	5	380	50

2	5	10	220	50
3	10	15	380	50
4	15	20	220	50
5	20	25	380	50
6	25	5	220	50
7	5	10	380	50
8	10	15	220	50
9	15	20	380	50
10	20	25	220	50

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №11

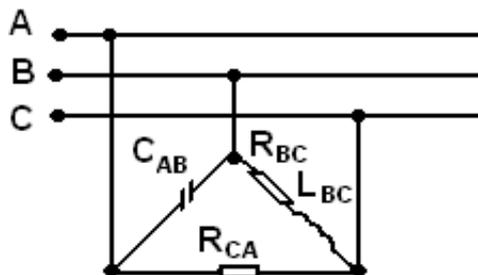
#### «Расчет трехфазных цепей соединенных в треугольник»

Цель: научиться производить расчет трехфазных цепей соединенных в треугольник.

#### Задание

В трехфазную сеть включили треугольником несимметричную нагрузку. В фазу АВ – емкостный элемент  $C_{AB}$ , в фазу ВС – индуктивный элемент с активным сопротивлением  $R_{BC}$  и индуктивностью  $L_{BC}$ , в фазу С – резистор с сопротивлением  $R_{CA}$ . Линейное напряжением сети  $U_H$ . Определить фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$ , активную мощность цепи  $P$ , реактивную мощность  $Q$  и полную мощность трехфазной цепи  $S$ .

Вариант	$R_{BC}$ , Ом	$R_{CA}$ , Ом	$L_{BC}$ , мГн	$C_{AB}$ , мкФ	$U_H$ , В	$f$ , Гц
1	4	10	9,55	318,5	220	50



1. При соединении потребителей треугольником выполняется соотношение:

$$U_H = U_L = U_\phi = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 220 \text{ В};$$

2. Определить сопротивление емкостного элемента в фазе АВ:

$$X_{AB} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{AB}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 318,5 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ Ом}$$

3. Определить сопротивление индуктивного элемента в фазе ВС:

$$X_{BC} = 2\pi \cdot f \cdot L_{BC} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9,55 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ Ом}$$

4. Определить полное сопротивление фазы ВС:

$$Z_{BC} = \sqrt{R_{BC}^2 + X_{BC}^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5 \text{ Ом}$$

5. Определить фазные токи:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{X_{AB}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А}$$

$$I_{CA} = \frac{U_{CA}}{R_{CA}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

6. Определить активную мощность фаз:

$$P_{AB} = I_{AB}^2 \cdot R_{AB} = 0 \text{ Вт}$$

$$P_{BC} = I_{BC}^2 \cdot R_{BC} = 44^2 \cdot 4 = 7744 \text{ Вт}$$

$$P_{CA} = I_{CA}^2 \cdot R_{CA} = 22^2 \cdot 10 = 4840 \text{ Вт}$$

$$\sum P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA} = 7744 + 4840 = 12584 \text{ Вт}$$

7. Определить реактивную мощность фаз:

$$Q_{AB} = I_{AB}^2 \cdot (-X_{AB}) = 22^2 \cdot (-10) = -4840 \text{ вар}$$

$$Q_{BC} = I_{BC}^2 \cdot X_{BC} = 44^2 \cdot 3 = 5808 \text{ вар}$$

$$Q_{CA} = I_{CA}^2 \cdot X_{CA} = 0 \text{ вар}$$

$$\sum Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA} = -4840 + 5808 = 968 \text{ вар}$$

8. Определить полную мощность трехфазной цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{12584^2 + 968^2} = 12638 \text{ В} \cdot \text{А} = 12,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

В трехфазную сеть включили треугольником несимметричную нагрузку. В фазу АВ – емкостный элемент  $C_{AB}$ , в фазу ВС – индуктивный элемент с активным сопротивлением  $R_{BC}$  и индуктивностью  $L_{BC}$ , в фазу С – резистор с сопротивлением  $R_{CA}$ . Линейное напряжением сети  $U_H$ . Определить фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{CA}$ , активную мощность цепи  $P$ , реактивную мощность  $Q$  и полную мощность трехфазной цепи  $S$ .

Вариант	$R_{BC}$ , Ом	$R_{CA}$ , Ом	$L_{BC}$ , мГн	$C_{AB}$ , мкФ	$U_H$ , В	$f$ , Гц
1	4	10	10	320	220	50
2	2	5	12	310	127	50
3	6	15	14	300	220	50
4	8	20	16	280	127	50
5	12	15	18	330	220	50
6	8	10	20	325	127	50

7	6	5	18	290	220	50
8	4	20	10	310	127	50
9	2	15	14	315	220	50
10	4	5	12	270	127	50

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схему электрической цепи выполнять с применением чертёжных инструментов.
4. Решить задачу
5. Вывод.

### Контрольные вопросы и задания

1. Начертите схему соединения обмоток генератора треугольником.
2. Каково соотношение между линейным и фазным напряжением в симметричной трехфазной системе при соединении обмоток генератора треугольником?
3. Начертите векторную диаграмму симметричной системы ЭДС трехфазной цепи при соединении обмоток генератора треугольником.
4. Напишите формулу тока в обмотках генератора, соединенных треугольником, при холостом ходе.
5. Чем опасно неправильное соединение обмоток генератора треугольником?

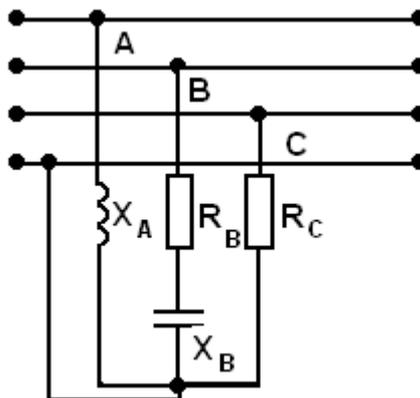
## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №12 «Расчет несимметричных трехфазных цепей»

### Вариант 1

1. В трехфазную четырех проводную сеть включили звездой несимметричную нагрузку: в фазу А – индуктивный элемент с индуктивностью  $L_A$ , в фазу В – резистор с сопротивлением  $R_B$ , и емкостный элемент с емкостью  $C_B$ , в фазу С – резистор с сопротивлением  $R_C$ . Линейное напряжение сети  $U_{НОМ}$ . Определить фазные токи  $I_A, I_B, I_C$ , активную мощность цепи  $P$ , реактивную мощность  $Q$  и полную мощность  $S$ .

Вариант	$R_B$ , Ом	$R_C$ , Ом	$L_A$ , мГн	$C_B$ , мкФ	$U_n$ , В	$f$ , Гц
1	25	5	10	100	380	50
2	5	10	20	200	220	50
3	10	15	15	300	380	50

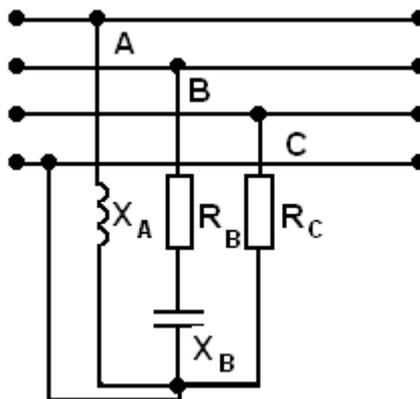
4	15	20	25	400	220	50
5	20	25	12	500	380	50
6	25	5	24	600	220	50
7	5	10	22	700	380	50
8	10	15	14	800	220	50
9	15	20	18	900	380	50
10	20	25	30	100	220	50



### Порядок выполнения расчета

#### Задание 1

1. Начертить исходную схему



Вариант	R <sub>B</sub> , Ом	R <sub>C</sub> , Ом	L <sub>A</sub> , мГн	C <sub>B</sub> , мкФ	U <sub>н</sub> , В	f, Гц
1	8	5	31,8	600	380	50

2. Определить фазные напряжения:

$$U_{\phi} = U_A = U_B = U_C; \quad U_n = U_l$$

В четырехпроводной цепи при любой нагрузке фаз выполняется соотношение:

$$U_{\phi} = U_A = U_B = U_C = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

3. Определить сопротивление индуктивного элемента  $L_A$ :

$$X_A = 2\pi \cdot f \cdot L_A = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,8 \cdot 10^{-3} = 100 \text{ Ом}$$

4. Определить сопротивление емкостного элемента  $C_B$ :

$$X_B = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_B} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ Ом}$$

5. Определить полное сопротивление в фазе В:

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + (-X_B)^2} = \sqrt{8^2 + (-6)^2} = 10 \text{ Ом}$$

6. Найти фазные токи, применяя закон Ома для участка цепи:

$$I_A = \frac{U_A}{X_A} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А}$$

$$I_C = \frac{U_C}{R_C} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А}$$

7. Определить активную мощность фаз:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 0 \text{ Вт}$$

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = 22^2 \cdot 8 = 3872 \text{ Вт}$$

$$P_C = I_C^2 \cdot R_C = 44^2 \cdot 5 = 9680 \text{ Вт}$$

$$\sum P = P_A + P_B + P_C = 3872 + 9680 = 13552 \text{ Вт}$$

8. Определить реактивную мощность фаз:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_A = 22^2 \cdot 10 = 4840 \text{ вар}$$

$$Q_B = I_B^2 \cdot X_B = 22^2 \cdot (-6) = -2904 \text{ вар}$$

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_C = 0 \text{ вар}$$

$$\sum Q = Q_A + Q_B + Q_C = 4840 - 2904 = 1936 \text{ вар}$$

9. Полная мощность трехфазной цепи равна:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{13552^2 + 1936^2} = 13686 \text{ В} \cdot \text{А} = 13,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 13

#### «Решение задач: Магнитное поле»

##### Магнитное поле электрического тока.

При прохождении электрического тока по проводнику вокруг него образуется магнитное поле.

**Магнитным полем** называется пространство, созданное электрическим током, в котором обнаруживается действие магнитных сил (например, на магнитную стрелку или ток).

##### Характеристики магнитного поля электрического тока.

1. При прохождении электрического тока по проводнику вокруг него образуется магнитное поле.

2. Магнитное поле представляет собой один из видов материи. Оно обладает энергией, которая проявляет себя в виде электромагнитных сил, действующих на отдельные движущиеся электрические заряды (электроны и ионы) и на их потоки, т. е. электрический ток.

3. Магнитное поле образуется только вокруг движущихся электрических зарядов, и его действие распространяется тоже лишь на движущиеся заряды.

Магнитное и электрические поля неразрывны и образуют совместно единое электромагнитное поле. Всякое изменение электрического поля приводит к появлению магнитного поля и, наоборот.

Электромагнитное поле распространяется со скоростью света, т. е. 300 000 км/с.

### 3. Графическое изображение магнитного поля

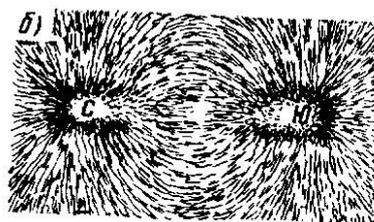
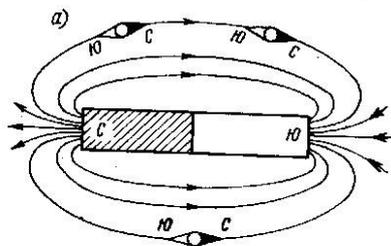


Рис.1. Магнитное поле, созданное постоянным магнитом

На рисунках магнитное поле изображается в виде магнитных линий, направленных от северного полюса к южному (рис.1).

- Магнитные силовые линии всегда являются непрерывными и представляет собой замкнутую кривую.

- Направление магнитного поля в каждой точке может быть определено при помощи магнитной стрелки. Северный полюс стрелки всегда устанавливается в направлении действия сил поля.

- Конец постоянного магнита, из которого выходят силовые линии (рис. 1), принято считать **северным** полюсом, а противоположный конец, в который входят силовые линии,— **южным** полюсом.

Распределение силовых линий между полюсами плоского магнита можно обнаружить при помощи стальных опилок.

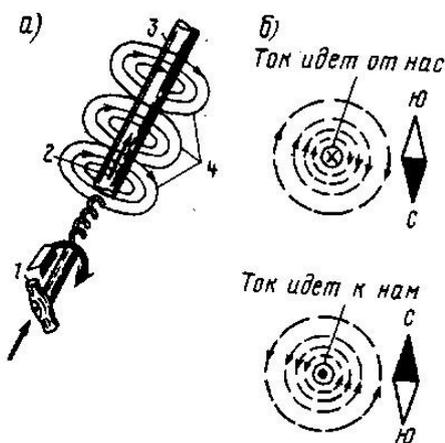


Рис.2 Определение направления магнитного поля вокруг проводника с током по правилу буравчика (а) и направление силовых линий магнитного поля при различном направлении тока (б)



Рис. 70. Условное обозначение направления тока в проводниках

#### Действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током

При прохождении тока по **прямолинейному проводнику** вокруг него возникает круговое магнитное поле.

Магнитные линии (линии индукции), располагаются по окружностям, центром которых является ось проводника. Это легко доказать при помощи несложного опыта.

Направление магнитного поля вокруг проводника с током находится в строгом соответствии с направлением тока, проходящего по проводнику. Направление магнитных силовых линий определяется по правилу буравчика (рис.2,а)

Чтобы показать направление тока в проводнике, изображенном в разрезе, принято условное обозначение. Если мысленно поместить стрелу по направлению тока, то в проводнике который направлен от нас, увидим хвост оперения стрелы (крестик), если же ток направлен к нам, увидим острие стрелы (точку).

#### **Направление магнитных линий определяется по правилу буравчика:**

**если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки буравчика, указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг проводника.**

Чем больше ток, проходящий по проводнику, тем сильнее возникающее вокруг него магнитное поле. При изменении направления тока магнитное поле тоже изменит направление.

## Способы усиления магнитных полей

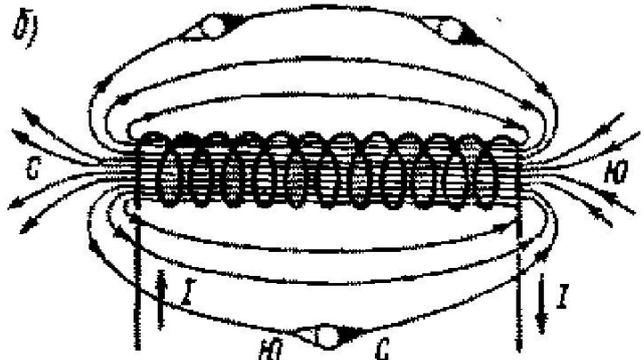
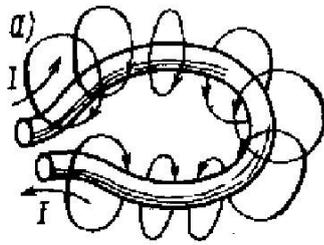


Рис.3. Магнитное поле, созданное а - витком с током, б - катушкой

Если проводник представляет собой виток, (рис.3а), то магнитные силовые линии при прохождении по нему тока образуются всеми участками проводника и имеют одинаковое направление. Поэтому интенсивность магнитного поля внутри витка будет больше, чем вокруг прямолинейного проводника.

При объединении витков в катушку, магнитные поля, созданные отдельными витками, складываются (рис. 3, б) и их силовые линии соединяются в общий магнитный поток. При этом концентрация силовых линий внутри катушки растет, т.е. магнитное поле внутри катушки усиливается. Снаружи концентрация силовых линий меньше и поле меньше.

Направление магнитных полей тоже определяется правилом буравчика. Катушка с током представляет собой искусственный электрический магнит. Обычно для усиления магнитного поля внутрь катушки вставляют стальной сердечник, такое устройство называют электромагнитом.

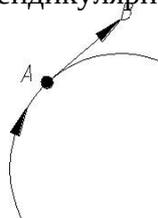
Магнитное поле называется **однородным**, если имеет во всех точках одинаковое направление и одинаковую интенсивность.

**Графически однородное** магнитное поле изображают параллельными линиями с одинаковой плотностью, например в воздушном зазоре между разноименными параллельными полюсами магнита.

### 4. Магнитная индукция и магнитный поток

Интенсивность магнитного поля определяется **магнитной индукцией  $B$** .

Магнитную индукцию можно характеризовать плотностью силовых магнитных линий, т.е. количеством силовых линий, проходящих через площадь в  $1 \text{ м}^2$  или  $1 \text{ см}^2$ , расположенную перпендикулярно к магнитному полю.



Магнитная индукция – векторная величина.

Направление вектора магнитной индукции совпадает с касательной к магнитной линии в данной точке поля.

Однородный магнитный поток  $\Phi$ , проходящий через какую-либо поверхность, определяется общим числом силовых линий, пронизывающих эту поверхность.

Произведение магнитной индукции  $B$  на величину площади  $S$ , перпендикулярной направлению поля (вектору магнитной индукции), **называется магнитным потоком**, и обозначается  $\Phi$ .

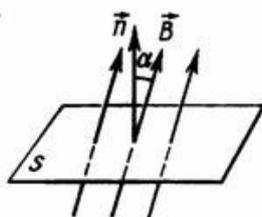


Рис.4 Поток вектора магн. индукции  $\Phi$

$$\Phi = B \cdot S \quad \text{или} \quad \Phi = B \cdot S \cos \alpha$$

( $\alpha$  угол между  $B$  и нормалью  $n$  к площади  $S$ )

$$\text{Отсюда магнитная индукция} \quad B = \frac{\Phi}{S}$$

В международной системе единиц (СИ) Магнитный поток  $\Phi$  измеряется в веберах (Вб) или вольт-секунда (В·с).

Магнитная индукция  $B$  в теслах (Тл)  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2$

## 5. Магнитная проницаемость

Магнитная индукция зависит не только от величины тока, проходящего по проводнику или катушке, но и от свойств среды, в которой создается магнитное поле.

Магнитные свойства среды характеризуются абсолютной магнитной проницаемостью  $\mu$  ( )

Единица измерения магнитной проницаемости

$$\frac{\text{Ом} \cdot \text{сек}}{\text{метр}}$$

Величина  $\mu$ , характеризующая магнитные свойства среды, называется абсолютной магнитной проницаемостью среды.

$\mu_0$

Для пустоты абсолютная магнитная проницаемость имеет минимальное значение и ее принято обозначать  $\mu_0$  и называть **абсолютной магнитной проницаемостью пустоты**.

$$\mu_0 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ генри} \cdot \text{сек}}{\text{метр}}$$

$\mu_r$  **Относительная** магнитная проницаемость показывает во сколько раз

абсолютная магнитная проницаемость среды больше абсолютной магнитной проницаемости пустоты.

## 6. Напряженность магнитного поля.

Напряженность – векторная величина, характеризующая магнитное поле. Напряженность не зависит от магнитных свойств среды, но учитывает влияние величины тока и формы проводов на интенсивность магнитного поля в данной точке пространства.

Магнитная индукция  $B$  с напряженностью магнитного поля  $H$  связаны соотношением:  $B = \mu H$ ,

$\mu$

(Магнитная индукция равна произведению абсолютной магнитной проницаемости среды на напряженность магнитного поля).

откуда  $H = \frac{B}{\mu}$

измеряется в (А/м) Амперах на метр

В пространстве, окружающем прямолинейный проводник, по которому проходит ток  $I$ , возникает магнитное поле, напряженностью

$$H = \frac{I}{2R}$$

где  $R$  – расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки, м.



На внешней поверхности проводника напряженность максимальная. Н макс, по мере удаления от внешней поверхности внутрь проводника напряженность уменьшается. Так же изменяется и магнитная индукция поля.

**Пример 5-1.** Определить напряженность магнитного поля и магнитную индукцию в точках, расположенных на расстояниях 0,2; 0,4 и 1 см от оси прямолинейного провода. Радиус провода  $a=0,4$  см; ток в проводе  $I=50$  а и  $\mu=1$ .

Точка, лежащая на расстоянии 0,2 см от оси провода, находится внутри провода:

$$H_1 = \frac{I r_1}{2\pi a^2} = \frac{50 \cdot 0,002}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,004^2} = 1\,000 \text{ а/м};$$

$$B_1 = \mu_0 H_1 = 125 \cdot 1\,000 \cdot 10^{-8} = 125 \cdot 10^{-5} \text{ тл} = 12,5 \text{ гс}.$$

Точка, лежащая на расстоянии 0,4 см от оси провода, находится на его поверхности:

$$H_2 = \frac{I}{2\pi a} = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,004} = 2\,000 \text{ а/м};$$

$$B_2 = \mu_0 H_2 = 125 \cdot 2\,000 \cdot 10^{-8} = 250 \cdot 10^{-5} \text{ тл} = 25 \text{ гс}.$$

Наконец, точка, лежащая на расстоянии 1 см от оси провода, находится за пределами провода:

$$H_3 = \frac{I}{2\pi r_3} = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-2}} = 800 \text{ а/м};$$

$$B_3 = \mu_0 H_3 = 125 \cdot 800 \cdot 10^{-8} = 100 \cdot 10^{-5} \text{ тл} = 10 \text{ гс}.$$

#### Задание

Определить напряженность магнитного поля и магнитную индукцию в точках расположенных 0.2 0.5 и 2 см от оси прямолинейного провода .

Вариант	a, см	I, F	m,
1	0,4	5	1
2	0,5	10	1
3	0,1	15	1
4	0,15	20	1
5	0,20	25	1
6	0,25	5	1
7	0,5	10	1
8	0,1	15	1
9	0.15	20	1
10	0.2	25	1

### Задача 2

В однородном магнитном поле расположен провод с током  $I = 20$  А перпендикулярно линиям магнитной индукции  $B = 0,6$  Тл. Определить силу, действующую на провод, если длина провода 2 м.

### Задача 3

Два параллельных провода расположены в воздухе на расстоянии 30 см. На каждый метр провода действует сила 50 Н. Определить значения токов в проводах при условии, что они равны.

### Задача 4

С какой скоростью нужно перемещать проводник длиной  $l = 80$  см под углом  $45^\circ$  к линиям магнитной индукции однородного магнитного поля, имеющего индукцию  $B = 2$  Тл, чтобы в нем наводилась ЭДС  $E = 30$  В?

## 5. Заполните табл. 5.1

Таблица 5.1

Вид преобразования	Преобразование механической энергии в электрическую (в генераторе)	Преобразование электрической энергии в механическую (в двигателе)
Концы проводника в электрической цепи замкнуты на...		
Вид потребляемой энергии		
Источник энергии		
Движущая сила		
Тормозящая сила		
Взаимное направление тока и ЭДС		
Уравнение напряжения		

#### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задание
4. Ответить на контрольные вопросы

## 5. Вывод.

### Контрольные вопросы:

1. Что такое магнетизм? Основные свойства магнита.
2. Графическое изображение магнитного поля?
3. Какова связь между магнитным полем и электрическим током?
4. Каковы свойства магнитных линий?
5. Как определить направление магнитных линий? Правило буравчика.
6. Что такое магнитная индукция  $B$ ? Ее формула и единицы измерения.
7. Что называется абсолютной магнитной проницаемостью среды  $\mu_a$  и магнитной проницаемостью пустоты  $\mu_0$ .
8. Напишите формулу магнитного потока  $\Phi$ . В каких единицах он измеряется?
9. Что такое напряженность магнитного поля? В каких единицах измеряется?

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №14 Расчет магнитных цепей

Цель работы - освоить методику расчета магнитных цепей .

### Теоретические сведения

**Магнитной цепью** называется электротехническое устройство, выполненное из ферромагнитных материалов по которому замыкается магнитный поток. Примером простой магнитной цепи может служить сердечник кольцевой катушки.

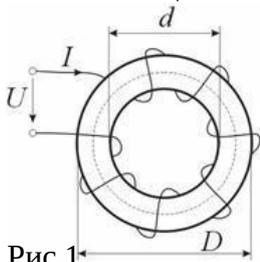
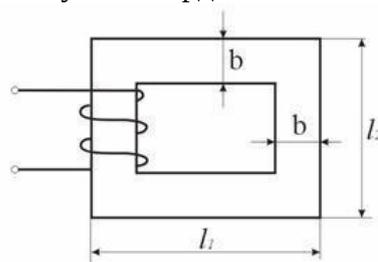


Рис.1



Магнитные цепи трансформаторов, эл. машин имеют более сложную форму.

Магнитная цепь, которая выполнена из одного материала и по всей длине имеет одинаковое сечение, наз. **однородной**. (рис.1)

**Неоднородная магнитная цепь** состоит из нескольких однородных участков, отличающихся длиной, сечением и материалом. Наиболее часто встречаются магнитные цепи, в которых кроме ферромагнитных участков имеются и воздушные зазоры. Неоднородная цепь изображена на рис. 3.9 а, имеет 3 участка, одним из которых является воздушный зазор.

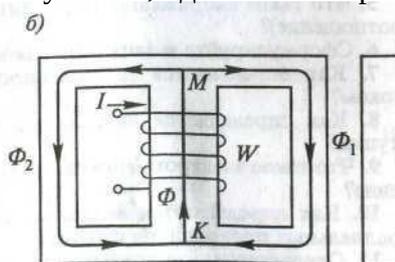
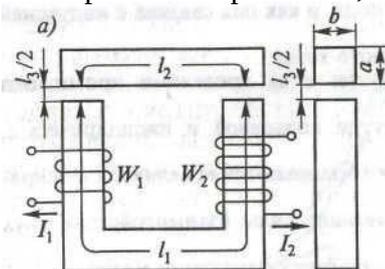


Рис. 3.9

Магнитные цепи, как и электрические бывают неразветвленными и разветвленными (рис 3.9).

Трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник. Сердечники трансформаторов собирают из нескольких частей, но во время сборки принимают меры к тому, чтобы воздушные зазоры между отдельными частями практически были равны 0.

Устройство, выполненное из ферромагнитных материалов, в котором замыкается магнитный поток, **называют магнитопроводом** или **сердечником**.

Помимо рабочего магнитного потока, существует магнитный поток рассеяния, который замыкается по воздуху, вне того места, где используется рабочий поток. Т.о. **общий магнитный поток**, который должна создавать обмотка возбуждения электромагнита, **равен сумме рабочего потока и потока рассеяния**.

### Методика расчета магнитных цепей.

Для расчета магнитных цепей можно пользоваться законом полного тока. При этом решается одна из двух задач:

1. Прямая задача, в которой по заданному потоку  $\Phi$  в магнитной цепи определяют намагничивающую силу  $IW$ .

2. Обратная задача, в которой по заданной намагничивающей силе  $IW$  определяют магнитный поток  $\Phi$ .

Для однородной магнитной цепи прямая задача решается в следующем порядке:

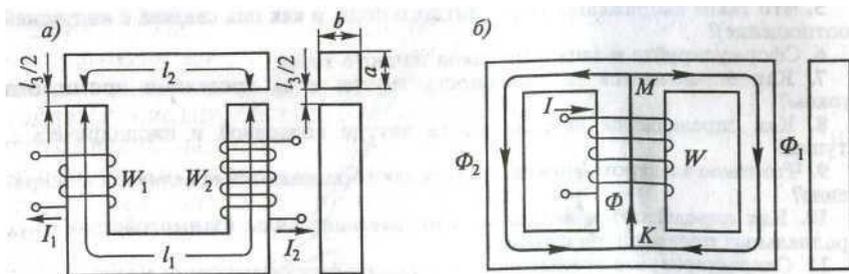


Рис. 3.9

по заданному магнитному потоку и габаритам цепи определяют магнитную

индукцию  $B = \frac{\Phi}{S}$ ;

2) по кривой намагничивания материала сердечника определяют напряженность  $H$  по вычисленной индукции  $B$ ;

3) по закону полного тока определяют намагничивающую силу  $IW = Hl$ ;

где  $S$  – сечение магнитопровода,  $l$  – длина средней линии магнитопровода. Обратная задача решается в обратном порядке

1) по закону полного тока определяют напряженность магнитной цепи

$$H = \frac{IW}{l}$$

2) по кривым намагничивания материала сердечника определяют магнитную индукцию  $B$ , по вычисленному значению напряженности  $H$

3) определяют магнитный поток цепи  $\Phi = BS$

Для неоднородной неразветвленной магнитной цепи (рис.3.9а) прямая задача решается в следующем порядке:

1) по заданному магнитному потоку  $\Phi$ , который для всех участков неразветвленной цепи имеет одинаковое значение, определяют магнитную индукцию

каждого участка  $B = \frac{\Phi}{S_1}$ ;  $B = \frac{\Phi}{S_2}$ ;  $B = \frac{\Phi}{S_3}$ ,

где  $S$  - площадь сечения участка. Для прямоугольного участка  $S=ab$ , для круглого сечения  $S = \frac{d^2}{4}$ .

Если задана магнитная индукция какого-либо участка  $B_{уч}$ , то находят магнитный поток этого участка  $\Phi_{уч} = B_{уч} S_{уч}$ , который для всех участков неразрывной цепи имеет одинаковое значение

2) по кривым намагничивания материалов определяют напряженность ферромагнитных участков  $H_1$  и  $H_2$ . Напряженность в воздушном зазоре вычисляют

$$H = \frac{B}{\mu_0}$$

3) определяют длину средней линии каждого участка, по закону полного тока (2-й закон Кирхгофа для магнитной цепи), вычисляют намагничивающую силу рассчитываемой магнитной цепи

Пример

Определить число витков обмотки, расположенной на сердечнике из электротехнической стали, с размерами см. рис. в см, если по обмотке проходит ток  $I=5A$ , который создает в магнитной цепи магнитный поток  $\Phi=43,2 \cdot 10^{-4}$  Вб.

Рис 3.10 и 3.11

### Порядок выполнения расчета

Магнитная цепь состоит из трех одинаковых участков сечением:

$$S_1 = 6 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$S_2 = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

$$S_3 = S_1 = 6 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{-2} = 36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 - \text{воздушный зазор,}$$

1) По заданному магнитному потоку определяется магнитная индукция в каждом однородном участке

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл}$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{48 \cdot 10^{-4}} = 0,9 \text{ Тл}$$

$$\Phi = 43,2 \cdot 10^{-4}$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{43,2 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Тл}$$

2) По кривой намагничивания для листовой электротехнической стали (Прил б) определяем напряженность первого  $H_1=1000 \text{ А/м}$  и второго  $H_2=500 \text{ А/м}$  участков.

Напряженность в воздушном зазоре  $H_3 = \frac{B_3}{\mu_0} = \frac{1,2}{4 \cdot 10^{-7}} = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}$

3) Составляем уравнение по второму закону Кирхгофа для магнитной цепи

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = NI$$

, из которого определяем искомое число витков обмотки

$$N = \frac{H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3}{I} = \frac{1000 \cdot 0,545 + 500 \cdot 0,17 + 1 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-2}}{1} = 1126 \text{ витков}$$

Длина средней линии каждого участка:

$$l_1 = 20 + 3 + 9 + 3 + 19,5 = 54,5 \text{ см} = 0,545 \text{ м}$$

$$l_2 = 4 + 9 + 4 = 17 \text{ см} = 0,17 \text{ м}$$

$$l_3 = 0,5 \text{ см} = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

**Обратная задача** расчета неоднородной неразветвленной магнитной цепи – определение магнитного потока по заданной намагничивающей силе может быть решена методом последовательных приближений. Для этого задаются несколькими значениями магнитного потока, и для каждого из них решают прямую задачу расчета магнитной цепи. По результатам расчетов намагничивающих сил для разных магнитных потоков строят кривую зависимости  $\Phi = f(NI)$  по которой определяют искомый магнитный поток  $\Phi_{иск}$  по заданной намагничивающей силе (ампер-витками)  $NI_{зад}$  (рис 3.11)

### Задание

Определить число витков обмотки, расположенной на сердечнике из электротехнической стали, с размерами см. рис. в см, если по обмотке проходит ток  $I$ , который создает в магнитной цепи магнитный поток  $\Phi = \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$ .

Вариант	$I, \text{ А}$	$\Phi, 10^{-4} \text{ Вб}$	а	в
1	5	43	18	2
2	10	40	50	10
3	3	45	5	2
4	12	37	30	6
5	4	60	18	2
6	2	64	4	8
7	1	78	2	5
8	1	29	8	4
9	20	47	10	50
10	8	34	6	22

## Порядок выполнения расчета

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема соединения
4. Задание
5. Расчеты токов и напряжений
6. Расчеты мощности и проверка баланса мощности
7. Вывод.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется магнитной цепью?
2. Что называется магнитопроводом или сердечником?
3. Какие цепи называются однородными?
4. В каком порядке проходит расчет магнитных цепей?
5. Сформулируйте закон полного тока для катушки?  $\oint H = I_w$   
где:  $l$  - длина оси катушки,  $W$  – число витков катушки,  $I$  – ток катушки
6. Чему равен магнитный поток разветвленной магнитной цепи?
7. Сформулируйте закон электромагнитных сил (для проводника с током в магнитном поле)  $F = B I l \sin \alpha$

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №15

### Решение задач; Переходные процессы в электрических цепях

**Цель работы** - освоить методику расчета переходных процессов в электрических цепях.

**Теоретические сведения**  
*переходный процесс в электрической цепи* — это электромагнитный процесс, возникающий при переходе от одного установившегося

Изменение тока скачком означало бы, что и энергия магнитного поля катушки  $W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2}$  изменилась скачком, что потребовало бы источника бесконечно большой мощности:

$$P = \frac{dW}{dt} = \infty.$$

В реальных условиях ЭДС самоиндукции и мощность генератора могут иметь только конечные значения, поэтому **первый закон коммутации** формулируется так: *ток индуктивного элемента не может изменяться скачком.*

Теперь рассмотрим цепь, содержащую конденсатор. Если бы напряжение на конденсаторе изменилось скачком, то это вызвало появление бесконечно большого зарядного тока:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \infty.$$

Изменение напряжения на конденсаторе скачком означало бы также, что энергия электрического поля конденсатора увеличилась скачком от нуля до  $W_{Cm} = \frac{CU_m^2}{2}$ , тогда питающий цепь генератор должен был бы развить бесконечно большую мощность. Но ток в цепи и мощность генератора могут иметь только конечные значения, поэтому **второй закон коммутации**: *напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком.*

Из этих рассуждений следует вывод, справедливый для любой электрической цепи, что переход от одного установившегося режима к другому возможен в течение определенного промежутка времени.

Изучение переходных процессов в линейных цепях упрощается, если переходный режим рассматривать как наложение двух режимов:

- 1) нового установившегося режима, который якобы наступает мгновенно после коммутации;

при этих условиях ток  $i$  в цепи в течение переходного процесса можно рассматривать как сумму двух составляющих: нового установившегося тока  $i_{уст}$  и свободного тока  $i_{св}$ :

$$i = i_{уст} + i_{св}. \quad (15.1)$$

Аналогично можно записать выражение для напряжения в течение переходного процесса

$$u = u_{уст} + u_{св}. \quad (15.2)$$

#### Контрольные вопросы

2. Приведите примеры коммутации в электрических цепях.
3. Какое отрицательное влияние могут оказывать переходные процессы на работу электрической цепи?
4. Где переходные процессы находят полезное практическое при-

*Пример 7.1.* Катушка электромагнита с параметрами  $R=11 \text{ Ом}$  и  $L=0,11 \text{ мГн}$  подключена в сети постоянного тока с напряжением  $U=110 \text{ В}$  (рис1,а). Определить время  $t$  за которое ток в катушке  $i$  увеличится от нуля до  $8 \text{ А}$ , Определить/ какого значения достигнет ЭДС самоиндукции  $e_L$  за это время  $t$ .

*Решение:*

Установившийся ток:  $I = \frac{U}{R} = \frac{110}{11} = 10 \text{ А}$

Постоянная времени для катушки  $\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,11 \cdot 10^{-3}}{11} = 10^{-5} \text{ с}$

Подставим значения величин в (7.4)  $i = I \cdot (1 - e^{-t/\tau})$

откуда  $e^{-t/\tau} = \frac{10-8}{10} = 0,2$

По приложению 9 определим  $X = \frac{t}{\tau} = 1,6$ ,

Откуда  $t = 1,6 \tau = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}$

ЭДС самоиндукции за время  $t = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}$  уменьшится со значения  $110 \text{ В}$  до значения  $e_L = -U \cdot e^{-t/\tau} = 110 e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-5}}{10^{-5}}} = -110 e^{-1,6} = -110 \cdot 0,2 = -22 \text{ В}$

Цепь состоит из источника с постоянным напряжением 50 В и катушки индуктивности с параметрами:  $R = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,5 \text{ мГн}$ . Определить установившийся ток, постоянную времени для данной цепи, значение ЭДС самоиндукции и ток переходного процесса в момент времени  $t = 3\tau$ .

**Решение**

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50}{5} = 10 \text{ А};$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{5} = 10^{-4} \text{ с};$$

$$e_L = Ue^{-t/\tau} = 50e^{-3\tau/\tau} = 50e^{-3} = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ В};$$

$$i = I(1 - e^{-t/\tau}) = 10(1 - e^{-3\tau/\tau}) = 10(1 - e^{-3}) = 10(1 - 0,05) = 9,5 \text{ А}.$$

**Пример 3**

Конденсатор емкостью 2 мкФ включен последовательно с резистором. При каком значении сопротивления резистора переходный процесс практически закончится в данной цепи через 9 с после подключения ее к источнику постоянного напряжения?

**Решение**

Переходный процесс практически закончится при  $t = 4,6\tau$ , так как конденсатор зарядится до  $u_C = 0,99U$ . Учитывая, что  $\tau = RC$ , запишем

$$t = 4,6\tau;$$

$$9 = 4,6 \cdot 2 \cdot 10^{-6} R;$$

$$R = \frac{9}{4,6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 0,978 \cdot 10^6 \text{ Ом} \approx 1 \text{ МОм}.$$

**Задание**

**Задача 1**

Катушка электромагнита с параметрами отключена в сети постоянного тока с напряжением. Определить время за которое ток в катушке увеличится от нуля до 10 А. Определить какого значения достигнет ЭДС самоиндукции за время

Вариант	$R, \text{ом}$	$L, \text{мГн}$	$U, \text{В}$
1	5	0,43	180
2	10	0,40	50
3	3	0,45	120
4	12	0,37	380
5	4	0,60	180
6	2	0,64	40
7	1	0,78	24
8	1	0,29	80
9	20	0,47	10
10	8	0,34	60

### Задача 2

Цепь состоит из источника с постоянным напряжением 50 В и катушки индуктивности с параметрами:  $R = 5 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,5 \text{ мГн}$ . Определить установившийся ток, постоянную времени для данной цепи, значение ЭДС самоиндукции и ток переходного процесса в момент времени  $t = 3\tau$ .

### Задача 3

Конденсатор емкостью 2 мкФ включен последовательно с резистором. При каком значении сопротивления резистора переходный процесс практически закончится в данной цепи через 9 с после подключения ее к источнику постоянного напряжения?

#### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задачи
5. Ответить на контрольные вопросы
6. Вывод.

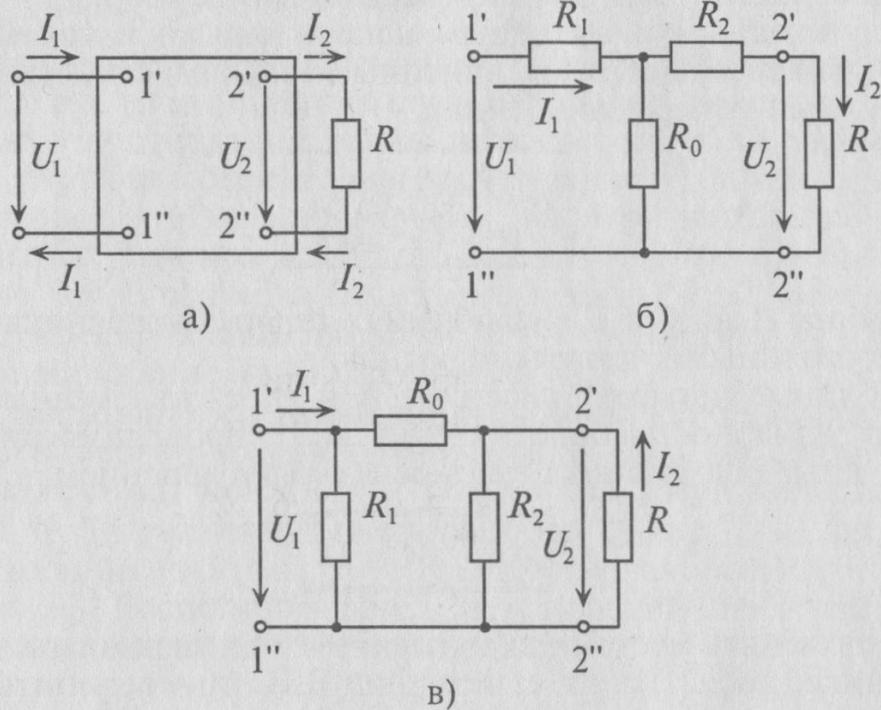
### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №16

#### Решение задач; Четырехполосники

Цель работы - освоить методику расчета четырехполосников.

### 21.1. Четырехполюсник в цепях постоянного и переменного тока

Четырехполюсником называется часть электрической цепи, имеющая две пары зажимов (рис. 21.1а).



К одной паре зажимов — входных ( $1'-1''$ ) — может быть присоединен источник, а к другой паре — выходных ( $2'-2''$ ) — присоединяется потребитель.

Если внутри четырехполюсников нет источников питания, то его называют пассивным. К пассивным четырехполюсникам относятся двухпроводная линия электропередачи, трансформаторы, выпрямители, фильтры, делители напряжения, мостовая схема и др.

Если электрическая схема содержит источник ЭДС, то в прямоугольнике, который изображает четырехполюсник, ставится буква «А» (активный).

Рассмотрим пассивный четырехполюсник.

Такой четырехполюсник является передаточным звеном между источником питания и потребителем. При этом предполагается, что может изменяться нагрузка четырехполюсника и напряжение на входе, но схема внутренних соединений четырехполюсника и значения сопротивлений в ней остаются неизменными.

Напряжение  $U_1$ , приложенное к входным зажимам ( $1'-1''$ ), называется входным напряжением. Ток, проходящий через входные зажимы ( $1'-1''$ ), называется входным током  $I_1$ .

Напряжение  $U_2$  между выходными зажимами ( $2'-2''$ ) называется выходным напряжением. Ток, проходящий через выходные зажимы ( $2'-2''$ ), называется выходным током  $I_2$  (рис. 21.1). Положительное направление напряжений и токов выбирается произвольно. Расчет подтвердит или опровергнет этот выбор.

Между входным и выходным напряжениями и токами четырехполюсника существуют линейные зависимости, называемые уравнениями четырехполюсника:

$$\begin{aligned} U_1 &= AU_2 + BI_2, \\ I_1 &= CU_2 + DI_2. \end{aligned} \quad (21.1)$$

Величины  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  в уравнениях четырехполюсника называются постоянными четырехполюсника.

Постоянные четырехполюсника  $A$  и  $D$  — отвлеченные числа,  $B$  имеет размерность сопротивления, а  $C$  — проводимости. Постоянные четырехполюсника взаимосвязаны уравнением

$$AD - BC = 1. \quad (21.2)$$

Если поменять местами входные и выходные зажимы четырехполюсника (рис. 21.1а), т. е. источник ЭДС присоединить к зажимам ( $2'-2''$ ), а потребитель к зажимам ( $1'-1''$ ), то уравнение четырехполюсника изменится:

$$\begin{aligned} U_1 &= DU_2 + BI_2, \\ I_1 &= CU_2 + AI_2. \end{aligned} \quad (21.3)$$

Как видно, при перемене входных и выходных зажимов четырехполюсника в уравнениях четырехполюсника меняются местами коэффициенты  $A$  и  $D$  (ср. (21.1) и (21.3)). Уравнение (21.2) остается справедливым и для этого случая.

Четырехполюсник называется симметричным, если при перемене мест источника и потребителя входные и выходные напря-

жения и токи не изменяются. Для симметричного четырехполюсника существует дополнительная связь между постоянными:

$$A = D. \quad (21.4)$$

Любой пассивный четырехполюсник, сопротивления которого постоянны, можно заменить эквивалентным четырехполюсником с тремя сопротивлениями, соединенными звездой — Т-образная схема замещения (рис. 21.1б) или треугольником — П-образная схема замещения (рис. 21.1в).

Уравнения четырехполюсника (21.1) и (21.3) справедливы для Т- и П-образных схем замещения. Постоянные четырехполюсника по-разному зависят от своих сопротивлений в этих схемах замещения.

Постоянные четырехполюсника А, В, С и D (в любом случае) зависят от схемы внутренних соединений четырехполюсника, от величины сопротивлений схемы и от частоты (для переменного тока) и могут быть определены расчетным или опытным путем.

Постоянные четырехполюсника экспериментально можно определить в режимах холостого хода и короткого замыкания. В режиме холостого хода (выходные зажимы 2'—2" разомкнуты,  $I_2 = 0$ ) четырехполюсник подключают к источнику и измеряют входное напряжение  $U_{1x}$  и входной ток  $I_{1x}$ .

В режиме короткого замыкания (зажимы 2'—2" замкнуты накоротко) измеряют входное напряжение  $U_{1к}$  и входной ток  $I_{1к}$ . Поменяв местами источник и потребитель, при холостом ходе (зажимы 1'—1" разомкнуты) определяют  $U_{2x}$  и  $I_{2x}$ , а при коротком замыкании (зажимы 1'—1" замкнуты накоротко) определяют  $U_{2к}$  и  $I_{2к}$ . Воспользовавшись результатами этих измерений, определяют постоянные четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{1}{\sqrt{\frac{U_{2x}}{I_{2x}} \left( \frac{U_{1x}}{I_{1x}} - \frac{U_{1к}}{I_{1к}} \right)}}; \quad A = C \frac{U_{1x}}{I_{1x}}; \\ D &= C \frac{U_{2к}}{I_{2к}}; \quad B = D \frac{U_{1к}}{I_{1к}}. \end{aligned} \right\} \quad (21.5)$$

По вычисленным постоянным четырехполюсника (21.5) определяют параметры Т-образной и П-образной схем замещения. Для Т-образной схемы:

$$R_0 = \frac{1}{C}; \quad R_1 = \frac{A-1}{C}; \quad R_2 = \frac{D-1}{C}. \quad (21.6)$$

Для П-образной схемы:

Построить круговую диаграмму неразветвленной цепи с постоянным емкостным и переменным активным сопротивлениями (рис. 21.4а) и определить по ней значения тока, активного и реактивного напряжений, активной, реактивной и полной мощностей, а также полного сопротивления, угла  $\varphi$  и коэффициента мощности для переменных активных сопротивлений:  $R=0; 5; 10; 15; 20$  Ом, если к цепи приложено напряжение  $U=200$  В, а емкостное сопротивление  $X_C=10$  Ом.

### Решение

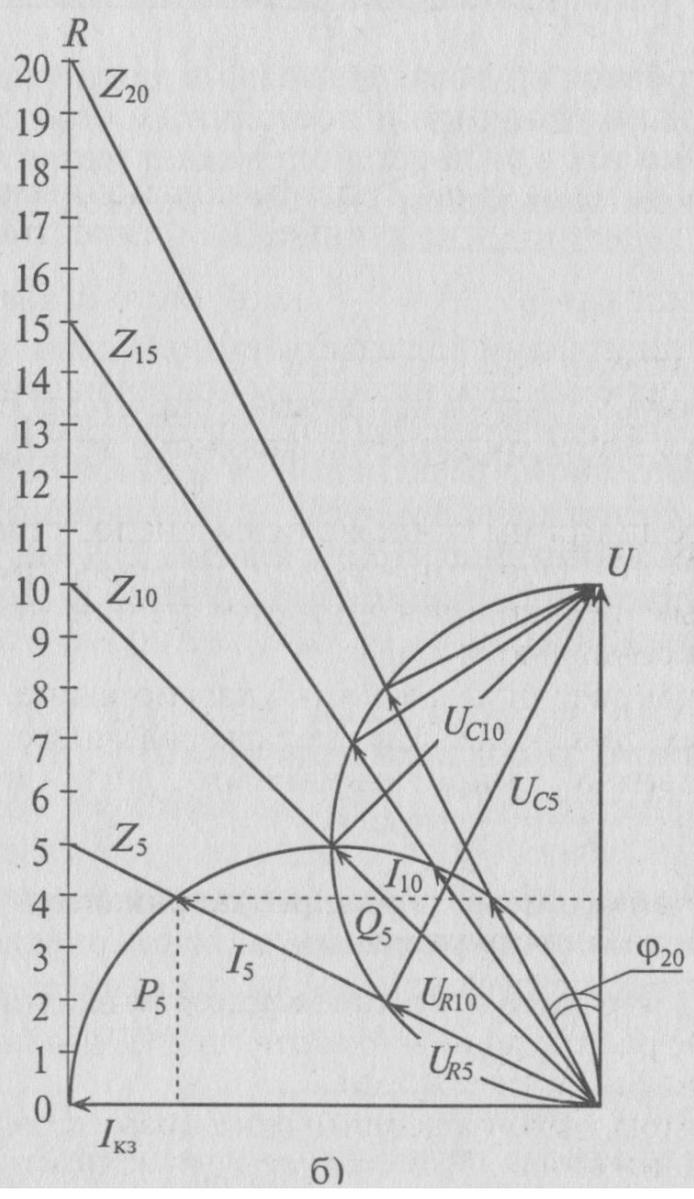
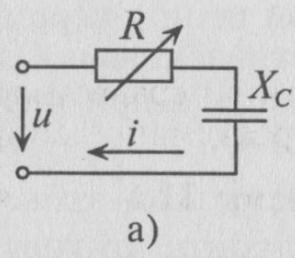
Определяем ток короткого замыкания цепи ( $R=0$ )

$$I_{\text{кз}} = \frac{U}{X_C} = \frac{200}{10} = 20 \text{ А.}$$

Выбираем масштабы тока  $M_I=2$  А/см и напряжения  $M_U=20$  В/см. Тогда масштаб сопротивлений можно определить  $M_R = \frac{X_C}{I_{\text{кз}}} M_I = \frac{10}{20} \cdot 2 = 1$  Ом/см, а масштаб мощности  $M_P = M_I U = 2 \cdot 200 = 400$  Вт/см.

В этих масштабах строим круговую диаграмму (рис. 21.4б), по которой определяем все искомые величины для цепи (рис. 21.4а) при указанных сопротивлениях  $R$  и заносим их в таблицу 21.1.

$R$	$Z$	$I$	$U_R$	$U_C$	$P$	$Q$	$S$	$\varphi$	$\cos \varphi$
Ом	Ом	А	В	В	Вт	вар	В·А	град	
0	10	20	0	200	0	4000	4000	90	0
5	11,2	17,8	80	178	1588	3178	3560	63	0,446
10	14,1	14	141	141	2000	2000	2820	45	0,705
15	18	11,2	166	110	1920	1280	2320	33	0,83
20	22,3	9	176	90	1640	840	1880	27	0,89



The phasor diagram (b) illustrates the relationship between the voltage  $U$  and current  $I$  for different values of the resistor  $R$  (5, 10, 15, 20). The vertical axis represents  $R$  (0 to 20) and the horizontal axis represents  $I_{k3}$  (0 to 4). The total voltage  $U$  is constant and represented by a vertical vector. The current  $I$  is represented by a horizontal vector. The impedance  $Z$  is represented by a vector from the tip of  $I$  to the tip of  $U$ . The diagram shows the following parameters and vectors:

- $Z_{20}$ ,  $Z_{15}$ ,  $Z_{10}$ ,  $Z_5$ : Impedance vectors for  $R=20, 15, 10, 5$  respectively.
- $I_{10}$ ,  $I_5$ : Current vectors for  $R=10, 5$  respectively.
- $U_{C10}$ ,  $U_{C5}$ : Voltage vectors across the capacitor for  $R=10, 5$  respectively.
- $U_{R10}$ ,  $U_{R5}$ : Voltage vectors across the resistor for  $R=10, 5$  respectively.
- $Q_5$ : Reactive power vector for  $R=5$ .
- $P_5$ : Active power vector for  $R=5$ .
- $\Phi_{20}$ : Phase angle for  $R=20$ .

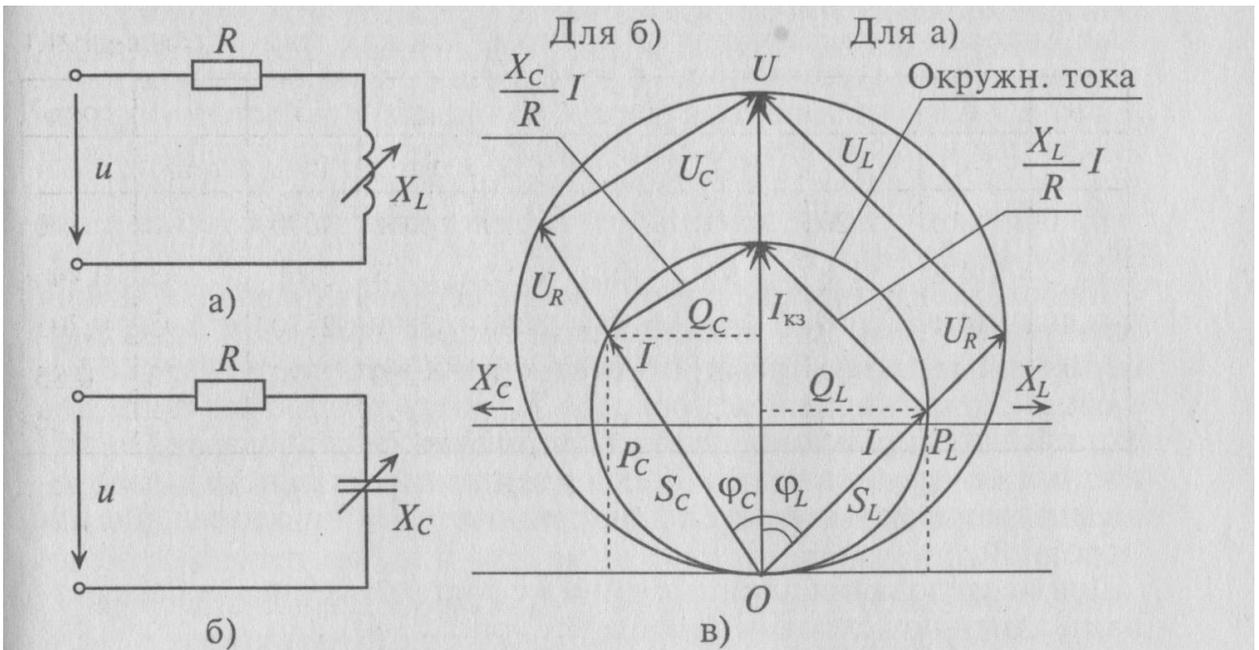


Рис. 21.5

Если в неразветвленной цепи (рис. 21.5а, б) переменным является реактивное сопротивление (индуктивное или емкостное), то при коротком замыкании ( $X=0$ )  $\dot{I}_{кз} = \frac{\dot{U}}{R}$ , цепь чисто активная и напряжение цепи совпадает по фазе с током  $I_{кз}$ .

Для построения круговой диаграммы цепей (рис. 21.5а, б) учитывают, что диаметрами полуокружностей являются ток  $I_{кз}$  и напряжение цепи  $U$ .

Построение круговых диаграмм производится аналогично предыдущим (рис. 21.3 и 21.4б). Особенностью построения круговых диаграмм с переменным реактивным сопротивлением является то, что векторы  $I_{кз}$  и  $U$  совпадают по фазе.

Масштабы выбирают и рассчитывают как указано выше.

Построение круговых диаграмм для неразветвленных цепей с переменными реактивными сопротивлениями  $X_L$  и  $X_C$  показано на рис. 21.5в.

#### Задание

Построить круговую диаграмму неразветвленной цепи с постоянным емкостным и переменным активным сопротивлениями (рис. 21.4а) и определить по ней значения тока, активного и реактивного напряжений, активной, реактивной и полной мощностей, а также полного сопротивления, угла  $\varphi$  и коэффициента мощности для переменных активных сопротивлений:  $R=0; 5; 10; 15; 20$  Ом, если к цепи приложено напряжение  $U=200$  В, а емкостное сопротивление  $X_C=10$  Ом.

#### Задание

Построить круговую диаграмму неразветвленной цепи с постоянным емкостным и переменным активным сопротивлениями и определить по ней значения тока, активного и

реактивного напряжений для переменных активных сопротивлений. Если к ней приложено напряжение  $U$ , а емкостное сопротивление.

**Содержание отчета**

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задание
4. Вывод.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №17**

**«Расчет трансформатора.»**

*Цель:* Рассчитать основные параметры однофазного трансформатора

*Краткие теоретические сведения:*

Трансформатором называют статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции. Простейший трансформатор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и двух расположенных на нем обмоток (рис. 1а).

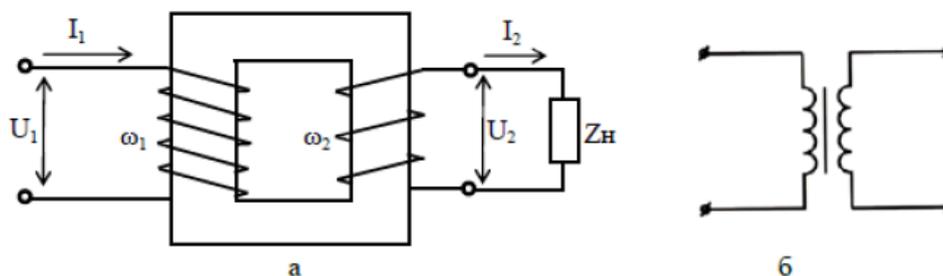


Рис1.– Принципиальная схема включения однофазного трансформатора с потребителем а), изображение трансформатора на схеме б).

Одна обмотка подсоединяется к источнику переменного тока и называется первичной. К другой обмотке, называемой вторичной, подключают потребителей.

При прохождении переменного тока по первичной обмотке в сердечнике образуется переменный магнитный поток. Это поток пересекает витки вторичной обмотки и наводит в них переменную ЭДС взаимной индукции. Если вторичная обмотка замкнута на потребитель, то по цепи потребителя начинает проходить переменный ток.

Если во вторичной обмотке число витков больше чем в первичной, то напряжение вторичной обмотки превышает напряжение первичной обмотки и трансформатор будет повышающий. Если в первичной обмотке число витков больше чем во вторичной, то напряжение вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки и трансформатор будет понижающий.

*Основные параметры трансформатора*

1. Номинальная мощность  $S_H$  – это полная мощность, которую трансформатор может непрерывно отдавать в течение своего срока службы при номинальном напряжении и номинальных температурных условиях

$$S_H = U_{2H} \cdot I_{2H}, \text{ ВА} \quad (1)$$

2. Номинальное первичное напряжение  $U_{1H}$  – напряжение, на которое рассчитана первичная обмотка

3. Номинальное вторичное напряжение  $U_{2H}$  – напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора при номинальном первичном напряжении.

4. Коэффициент трансформации

$$K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{I_{2H}}{I_{1H}} \quad (2)$$

где  $w$ - число витков первичной и вторичной обмоток;

$E$  – действующее значение ЭДС электромагнитной индукции в обмотках трансформатора.

5. Номинальный первичный  $I_{1H}$  и вторичный  $I_{2H}$  токи в обмотках трансформатора при номинальной мощности и номинальных напряжениях обмоток

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H} \cdot \eta_H}, A \quad (3)$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}}, A \quad (4)$$

6. Коэффициент нагрузки трансформатора. Трансформатор чаще всего работает с нагрузкой, меньше номинальной, поэтому

$$K_{HT} = \frac{S_2}{S_H} \quad (5)$$

где  $S_2$  – фактическая полная мощность нагрузки

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}, VA \quad (6)$$

7. Токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке  $S_2$

$$I_1 = I_{1H} \cdot K_{HT}, A \quad (7)$$

$$I_2 = I_{2H} \cdot K_{HT}, A \quad (8)$$

8. Общая мощность потерь энергии в трансформаторе:

– при номинальной нагрузке

$$\Delta P_H = P_{CT} + P_{MH}, Bm \quad (9)$$

– при фактической нагрузке

$$\Delta P = P_{CT} + P_M = P_{CT} + P_{MH} \cdot K_{HT}^2, Bm \quad (10)$$

где  $P_{CT}$  - мощность потерь в стали сердечника;

$P_M$  - мощность потерь в обмотках трансформатора при фактической нагрузке;

$P_{MH}$  - мощность потерь в обмотках при номинальной нагрузке.

Если известно сопротивление меди первичной ( $R_1$ ) и вторичной ( $R_2$ ) обмоток трансформатора, то при любой нагрузке можно определить мощность потерь в обмотках

$$P_M = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2, Bm \quad (11)$$

9. Коэффициент мощности нагрузки

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} \quad (12)$$

где  $P_2$ ,  $Q_2$ ,  $S_2$  – активная, реактивная и полная мощность нагрузки, питаемой от вторичной обмотки трансформатора.

10. Коэффициент полезного действия трансформатора

– при номинальной нагрузке

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + \Delta P_H} = \frac{S_H \cdot \cos \varphi_2}{S_H \cdot \cos \varphi_2 K_{HT} + P_{CT} + P_{MH}} \quad (13)$$

– при фактической нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{S_H \cdot \cos \varphi_2 \cdot K_{HT}}{S_H \cdot \cos \varphi_2 K_{HT} + P_{CT} + P_{MH} \cdot K_{HT}^2} \quad (14)$$

### **Порядок выполнения расчета**

1. Выписать исходные данные согласно варианту (таблица 8.1) и вычертить схему цепи (рисунок 1 а).

2. Ознакомиться с параметрами однофазного трансформатора.

3. Выполнить расчет неизвестных параметров, отмеченных в таблице 1 прочерками.

4. В заключении кратко описать принцип действия и виды трансформаторов.

### Пример расчета

Дано:

- номинальная мощность  $S_H=100 \text{ ВА}$ ;
- номинальное первичное напряжение  $U_{1H}=220 \text{ В}$ ;
- номинальное вторичное напряжение  $U_{2H}=22 \text{ В}$ ;
- активная мощность нагрузки  $P_2=48 \text{ Вт}$ ;
- реактивная мощность нагрузки  $Q_2=36 \text{ вар}$ ;
- мощность потерь в стали сердечника  $P_{ст}=7,3 \text{ Вт}$ ;
- мощность потерь в обмотках при номинальной нагрузке  $P_{мн}=5,66 \text{ Вт}$ .

Определить:

- коэффициент трансформации трансформатора;
- полную мощность нагрузки;
- коэффициент мощности нагрузки;
- коэффициент нагрузки трансформатора;
- КПД трансформатора при номинальной нагрузке;
- номинальные токи в обмотках трансформатора;
- токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке;
- потери мощности в трансформаторе при фактической нагрузке;
- КПД трансформатора при фактической нагрузке.

#### Порядок расчета

1. Коэффициент трансформации трансформатора

$$K = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{220}{22} = 10$$

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Вариант	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
$S_H$	-		1270	-		500	1500	4000	400	-		-		600						
$S_2$	BA		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$U_{1H}$	B		100	-	-	-	5800	-	-	300	180	100								
$U_{2H}$	B		10	100	220	127	120	127	-	-	36	10								
$K$	-		2,5	8,18	-	-	-	-	0,4	4,4	-	-								
$K_{нг}$	-		-	-	-	-	-	-	0,83	0,68	-	-								
$Q_2, \text{вар}$	225		-	250	-	590	-	-	-	120	-	-								
$\cos \varphi_2$	-		0,8	0,6	0,87	-	1	-	0,73	1	0,93									
$I_{1H}$	A		-	-	-	1,7	-	-	2,6	-	-	12,5								
$I_{2H}$	A		25	-	3,5	-	-	-	-	-	3,5	-								
$I_1$	A		-	-	-	-	-	9,6	-	-	-	-								
$I_2$	A		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
$\eta_H$	-		0,95	0,94	-	-	-	-	0,92	-	-	0,96								
$\eta$	-		-	-	-	-	-	0,97	-	-	-	-								
$P_2$	Bm		375	700	-	260	850	2100	-	-	72	432								
$P_{ст}$	Bm		2,32	9,8	-	18,2	42,15	-	21,2	14	4,1	11								
$P_{мн}$	Bm		4,8	-	2,4	17	27,9	50	10,4	7,3	1,69	-								

2. Полная мощность нагрузки, питающейся энергией от вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{48^2 + 36^2} = 60 \text{ ВА}$$

3. Коэффициент мощности нагрузки

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{48}{60} = 0,8$$

4. Коэффициент нагрузки трансформатора

$$K_{HT} = \frac{S_2}{S_H} = \frac{60}{100} = 0,65$$

5. КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{S_H \cdot \cos \varphi_2}{S_H \cdot \cos \varphi_2 K_{HT} + P_{CT} + P_{MH}} = \frac{100 \cdot 0,8}{100 \cdot 0,8 + 7,3 + 5,66} = 0,86$$

6. Номинальные токи в обмотках трансформатора

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H} \cdot \eta_H} = \frac{100}{220 \cdot 0,86} = 0,528 \text{ A}$$

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{2H}} = \frac{100}{22} = 4,55 \text{ A}$$

7. Токи в обмотках трансформатора при фактической нагрузке

$$I_1 = I_{1H} \cdot K_{HT} = 0,528 \cdot 0,6 = 0,317 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{2H} \cdot K_{HT} = 4,55 \cdot 0,6 = 2,73 \text{ A}$$

8. Потери мощности в трансформаторе при фактической нагрузке

$$\Delta P = P_{CT} + P_{MH} \cdot K_{HT}^2 = 7,3 + 5,66 \cdot 0,6^2 = 9,34 \text{ Вт}$$

9. КПД трансформатора при фактической нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{48}{48 + 9,34} = 0,837$$

#### *Содержание отчета*

1. Тема и цель занятия
2. Задание
3. Исходные данные
4. Схема включения трансформатора
5. Расчетная часть
6. Вывод

#### *Контрольные вопросы*

1. Объясните принцип работы однофазного трансформатора.
2. Почему трансформатор работает только на переменном токе?
3. Как практически определить коэффициент трансформации?

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №18

#### «Машины постоянного тока.»

Цель: Рассчитать основные параметры машины постоянного тока

**Задача 5.7.** Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ , напряжение питания  $U_{\text{ном}}$ , номинальная частота вращения  $n_{\text{ном}}$ , сопро-

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$P_{\text{ном}}$ , кВт	25	15	45	4,2	18
$U_{\text{ном}}$ , В	440	220	440	220	220
$n_{\text{ном}}$ , об/мин	1500	1000	1500	1500	1200
$\eta_{\text{ном}}$ , %	85	83,8	88	78	84
$\Sigma r$ , Ом	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12
$r_{\text{в}}$ , Ом	88	73	88	64	73

тивление обмоток в цепи якоря  $\Sigma r$ , сопротивление цепи возбуждения  $r_{\text{в}}$ , падение напряжения в щеточном контакте щеток  $\Delta U_{\text{щ}} = 2$  В. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.8.

Требуется определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки  $I_{\text{ном}}$ , сопротивление пускового реостата  $R_{\text{п.р}}$ , при котором начальный пусковой ток в цепи якоря двигателя был бы равен  $2,5I_{\text{аном}}$ , начальный пусковой момент  $M_{\text{п}}$ , частоту вращения  $n_0$  и ток  $I_0$  в режиме холостого хода, номинальное изменение частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение варианта 1.

1. Потребляемая двигателем мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{Iном}} = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 25/0,85 = 29,4 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке,

$$I_{\text{Iном}} = P_{\text{Iном}}/U_{\text{ном}} = 29,4 \cdot 10^3/440 = 67 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}}/r_{\text{в}} = 440/88 = 5 \text{ А.}$$

4. Ток в обмотке якоря

$$I_{\text{а ном}} = I_{\text{Iном}} - I_{\text{в}} = 67 - 5 = 62 \text{ А.}$$

5. Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности 2,5

$$I_{\text{ап}} = 2,5I_{\text{аном}} = 2,5 \cdot 62 = 155 \text{ А.}$$

6. Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности пускового тока 2,5

$$R_{\text{а}} = R_{\text{п.р}} + \Sigma r = U_{\text{ном}}/I_{\text{ап}} = 440/155 = 2,83 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{п.р}} = R_{\text{а}} - \Sigma r = 2,83 - 0,15 = 2,68 \text{ Ом.}$$

8. ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки

$$E_{a\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{a\text{ном}} \sum r - \Delta U_{\text{щ}} = 440 - 62 \cdot 0,15 - 2 = 428,7 \text{ В.}$$

9. Из выражения

$$E_a = c_e \Phi n,$$

определим

$$c_e \Phi = E_a / n = 428,7 / 1500 = 0,285;$$

отношение коэффициентов

$$c_m / c_e = [pN / (2\pi a)] / [pN / (60a)] = 9,55;$$

следовательно, в данном случае

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,285 = 2,72.$$

10. Начальный пусковой момент при заданной кратности пускового тока 2,5

$$M_{\text{п}} = c_m \Phi I_{a\text{п}} = 2,72 \cdot 155 = 422 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

11. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 1500 = 159 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 26\,579 / 1500 = 169 \text{ Н} \cdot \text{м,}$$

где электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм.ном}} = E_{a\text{ном}} I_{a\text{ном}} = 428,7 \cdot 62 = 26\,579 \text{ Вт.}$$

13. Момент холостого хода

$$M_0 = M_{\text{ном}} - M_{2\text{ном}} = 169 - 159 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

14. Ток якоря в режиме холостого хода

$$I_{a0} = M_0 / (c_m \Phi) = 10 / 2,72 = 3,68 \text{ А.}$$

15. ЭДС якоря в режиме холостого хода (принимая  $\Delta U_{\text{щ}} = 0$ )

$$E_{a0} = U_{\text{ном}} - I_{a0} \sum r = 440 - 3,68 \cdot 0,15 = 439 \text{ В.}$$

16. Частота вращения якоря в режиме холостого хода

$$n_0 = E_{a0} / (c_e \Phi) = 439 / 0,285 = 1540 \text{ об/мин.}$$

17. Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} 100 = \frac{1540 - 1500}{1500} 100 = 2,66 \text{ \%}.$$

#### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задание
4. Вывод.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №19

### «Расчет потерь и КПД асинхронного двигателя.»

Цель: Рассчитать потери и КПД асинхронного двигателя

**Задача 3.6.** Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Статический нагрузочный момент на валу двигателя  $M_c$ , полезная мощность двигателя  $P_{ном}$ , потребляемая из сети мощность  $P_{1ном}$ , КПД  $\eta_{ном}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$ , величина тока в фазной обмотке статора  $I_{1ном}$ , число полюсов  $2p$ , скольжение  $s_{ном}$ . Некоторые из перечисленных параметров указаны в табл. 3.7. Требуется определить значения недостающих параметров.

ны параметры двигателя, соответствующие его номинальной нагрузке: мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$ , КПД  $\eta_{\text{ном}}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$ . При нагрузке  $P_2 = 0,85P_{\text{ном}}$  КПД двигателя имеет наибольшее значение  $\eta_{\text{max}} = 1,03\eta_{\text{ном}}$ . Необходимо определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Решение варианта 1.

1. Наибольшее значение КПД

$$\eta_{\text{max}} = 1,03\eta_{\text{ном}} = 1,03 \cdot 0,81 = 0,834 \%$$

2. Нагрузка двигателя при этом КПД

$$P_2 = 0,85P_{\text{ном}} = 0,85 \cdot 3 = 2,55 \text{ кВт.}$$

3. Потребляемая мощность при  $\eta_{\text{max}}$

$$P_1 = P_2/\eta_{\text{max}} = 2,55/0,834 = 3,06 \text{ кВт.}$$

4. Суммарные потери при  $\eta_{\text{max}}$

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = 3,06 - 2,55 = 0,57 \text{ кВт.}$$

5. Постоянные потери двигателя

$$P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = 0,5\Sigma P = 0,5 \cdot 570 = 285 \text{ Вт.}$$

6. Потребляемая мощность в номинальном режиме

$$P_{\text{1ном}} = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 3,0/0,81 = 3,7 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные потери в номинальном режиме

$$\Sigma P_{\text{ном}} = P_{\text{1ном}} - P_{\text{ном}} = 3,7 - 3,0 = 0,7 \text{ кВт} = 700 \text{ Вт.}$$

8. Переменные потери в номинальном режиме

$$P_{\text{пер}} = P_{\Sigma} + P_{\text{доб}} = \Sigma P_{\text{ном}} - P_{\text{пост}} = 700 - 285 = 415 \text{ Вт.}$$

9. Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55P_{\text{пост}}/n_1 = 9,55 \cdot 285/1500 = 1,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

10. Номинальная частота вращения

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - s_{\text{ном}}) = 1500(1 - 0,055) = 1417 \text{ об/мин.}$$

11. Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_2 = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 3000/1417 = 20,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = M_2 + M_0 = 20,2 + 1,8 = 22 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

13. Номинальное значение электромагнитной мощности

$$P_{\text{эм}} = 0,105M_{\text{ном}}n_1 = 0,105 \cdot 22 \cdot 1500 = 3465 \text{ Вт.}$$

14. Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\text{э2}} = s_{\text{ном}} P_{\text{эм}} = 0,055 \cdot 3465 = 190 \text{ Вт.}$$

15. Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 3700 = 18 \text{ Вт.}$$

16. Электрические потери в номинальном режиме

$$P_{\text{э}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{доб}} = 415 - 18 = 397 \text{ Вт,}$$

17. Электрические потери в обмотке статора

$$P_{\text{э1}} = P_{\text{э}} - P_{\text{э2}} = 397 - 190 = 207 \text{ Вт.}$$

18. Проверка:

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{ном}} &= P_{\text{пост}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{доб}} = 285 + 207 + 190 + 18 = \\ &= 700 \text{ Вт (см. п. 7).} \end{aligned}$$

### Задание

Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть

напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Статический нагрузочный момент на валу двигателя  $M_c$ , полезная мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$ , потребляемая из сети мощность  $P_{1\text{ном}}$ , КПД  $\eta_{\text{ном}}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$ , величина тока в фазной обмотке статора  $I_{1\text{ном}}$ , число полюсов  $2p$ , скольжение  $s_{\text{ном}}$ . Некоторые из перечисленных параметров указаны в табл. 3.7. Требуется определить значения недостающих параметров.

ны параметры двигателя, соответствующие его номинальной нагрузке: мощность двигателя  $P_{\text{ном}}$ , КПД  $\eta_{\text{ном}}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$ . При нагрузке  $P_2 = 0,85 P_{\text{ном}}$  КПД двигателя имеет наибольшее значение  $\eta_{\text{max}} = 1,03 \eta_{\text{ном}}$ . Необходимо определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$ , кВт	—	12	—	15	22	—
$P_{1\text{ном}}$ , кВт	—	14,6	—	—	27,8	35
$\eta_{\text{ном}}$ , %	82	—	85	89	—	90
$\cos \varphi_1$	0,80	0,78	0,80	—	0,78	—
$I_{1\text{ном}}$ , А	—	—	18	30	—	62
$M_c$ , Н·м	180	—	105	—	145	—
$s_{\text{ном}}$ , %	4	3,5	—	3	—	3
$2p$	6	4	—	4	4	6

### Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задание
4. Вывод.

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №20 «Расчет синхронной машины»

Цель: Рассчитать основные параметры синхронных машин

Фактически вся промышленная электрическая энергия в стране вырабатывается на тепловых (ТЭС), гидравлических (ГЭС) и атомных (АЭС) электростанциях. В разных странах доля электроэнергии, производимой на различного вида электростанциях, неодинакова. В России в настоящее время тепловые электростанции дают примерно (69—70) %, атомные и гидравлические — по 15 % общего количества электроэнергии. Стоимость единицы вырабатываемой электроэнергии на каждом из этих трех видах станций может резко различаться. Различны капитальные затраты при их сооружении, расходы на эксплуатацию, уровень автоматизации, степень надежности, зависимость от сезона и особенностей их климатического и географического расположения и многих других обстоятельств. Объединяет их только одно. Они обязаны вырабатывать ток стандартной частоты 50 периодов в секунду, или 50 Гц, необходимого уровня напряжения для той сети, к которой присоединяются **электрические машины**, работающие в режиме генераторов переменного тока, установленных на каждой из станций.

Абсолютное равенство частот напряжения сотен одновременно работающих генераторов может быть обеспечено только одним — специальным типом этих электрических машин — **синхронными генераторами**, т.е. работающими одновременно, в ритме единого времени, со строго определенными частотами вращения своих подвижных частей, называемых **роторами**.

**Синхронными называются машины**, частота вращения которых связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена.

*Синхронные машины служат генераторами* переменного тока на электрических станциях, а синхронные двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения.

Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются либо гидравлические, либо паровые турбины, либо двигатели внутреннего сгорания.

*Синхронные двигатели* используют в установках средней и большой мощности. Основным **достоинством** синхронных двигателей является их высокий коэффициент мощности  $\cos \varphi$ . У этих двигателей  $\cos \varphi$  может быть равным единице и, более того, они могут работать с потреблением опережающего тока из сети, подобно емкости. Это свойство синхронных двигателей широко используется на практике.

*Синхронный двигатель*, потребляющий опережающий ток из сети, компенсирует реактивную мощность других индуктивных приемников энергии, включенных в эту сеть, и повышает коэффициент мощности всего предприятия. Магнитное поле в машине создается постоянным током, протекающим по обмотке возбуждения. Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения является очень существенным недостатком синхронных машин.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока. Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной и мощность его составляет малую величину, порядка 1 - 5% мощности синхронной машины, возбуждаемой им. При небольшой мощности широко используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин из сети переменного тока через полупроводниковые и механические выпрямители. При вращении ротора магнитные линии потока остаточного магнетизма пересекают проводники статора и индуцируют в них переменную э. д. с. Вызванный этой э. д. с. переменный ток посредством трансформатора и полупроводниковых вентилей преобразуется в постоянный и протекает через обмотку возбуждения. Вследствие этого происходит усиление магнитного поля генератора и его возбуждение до номинального напряжения.

В синхронных двигателях питание обмотки возбуждения часто осуществляется через полупроводниковые вентили.

В синхронных машинах число оборотов ротора равно числу оборотов вращающегося магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети  $f$  и числом пар полюсов  $p$ , т. е.

$$n = \frac{60f}{p} \quad \text{и} \quad f = \frac{pn}{60}.$$

В генераторах обмотка состоит из большого числа проводов, которые, соединяясь между собой, образуют витки и катушки. Простейшим генератором может быть виток из провода 1 и 2, вращающийся в магнитном поле (рис. 126). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора N — S.

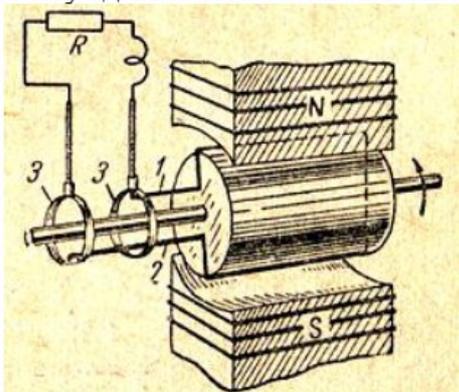


Рис. 126. Схема простейшего генератора переменного тока:

1, 2 — проводники, 3 — щетки

Концы витка соединены с кольцами, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки 3 и соединить их с приемником электрической энергии R, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, потечет электрический ток под действием ЭДС, созданной в витке.

Если в начальный момент при вращении витка проводник 1 перемещался в магнитном поле слева направо, а проводник 2 — справа налево, то при повороте на угол, больший  $90^\circ$ , перемещение проводников будет обратным, а следовательно, изменится и направление ЭДС, индуцируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами N и S распределяется равномерно, то ЭДС будет меняться во времени синусоидально (рис. 127). За один оборот витка в пространстве ЭДС, индуцируемая в нем, претерпевает один период изменения.

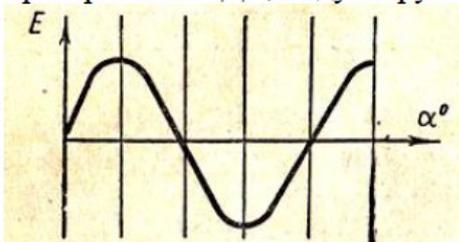


Рис. 127. Кривая изменения э. д. с. витка во времени

Если *виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянным числом оборотов n в минуту*, то в этом витке индуцируется переменная ЭДС с частотой, равной:

$$f = \frac{n}{60}.$$

### Генераторный режим

Обычно синхронные генераторы выполняют с якорем, расположенным на статоре, для удобства отвода электрической энергии. Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3...2%), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух контактных колец не вызывает особых затруднений.

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции; при вращении ротора магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, сцепляется поочередно с каждой из фаз обмотки статора, индуцируя в них ЭДС. В наиболее распространенном случае применения трехфазной распределенной обмотки якоря в каждой из фаз, смещенных друг относительно друга на  $120^\circ$  градусов, индуцируется синусоидальная ЭДС. Соединяя фазы по стандартным схемам «треугольник» или «звезда», на выходе генератора получают трехфазное напряжение, являющееся общепринятым стандартом для магистральных электросетей.

Частота индуцируемой ЭДС  $f$  [Гц] связана с частотой вращения ротора  $n$  [об/мин] соотношением:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}, \text{ где } p \text{ — число пар полюсов ротора.}$$

### ***Двигательный режим***

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля якоря и магнитного поля полюсов индуктора. Обычно якорь расположен на статоре, а индуктор — на роторе. В мощных двигателях в качестве полюсов используются электромагниты (ток на ротор подаётся через скользящий контакт щётка - кольцо), в маломощных — постоянные магниты.

#### ***Запуск двигателя***

Двигатель требует разгона до частоты, близкой к частоте вращения магнитного поля в зазоре, прежде чем сможет работать в синхронном режиме. При такой скорости вращающееся магнитное поле якоря сцепляется с магнитными полями полюсов индуктора (если индуктор расположен на статоре, то получается, что вращающееся магнитное поле вращающегося якоря (ротора) неподвижно относительно постоянного поля индуктора (статора), если индуктор на роторе, то магнитное поле вращающихся полюсов индуктора (ротора) неподвижно относительно вращающегося магнитного поля якоря (статора)) — это называется «вошёл в синхронизм».

Для *разгона* обычно используется асинхронный режим, при котором обмотки индуктора замыкаются через реостат или накоротко, как в асинхронной машине, для такого режима запуска в машинах *на роторе делается короткозамкнутая обмотка, которая также выполняет роль успокоительной обмотки, устраняющей "раскачивание" ротора при синхронизации.* После выхода на скорость близкую к номинальной (>95%) индуктор запитывают постоянным током.

Часто на валу ставят *небольшой генератор постоянного тока*, который питает электромагниты.

Также используется частотный пуск, когда частоту тока якоря постепенно увеличивают от 0 до номинальной величины. Или наоборот, когда частоту индуктора понижают от номинальной до 0, т.е. до постоянного тока.

Частота вращения ротора  $n$  [об/мин] остаётся неизменной, жёстко связанной с частотой сети [Гц] соотношением:

$$n_1 = \frac{60 f}{p},$$

где  $p$  — число пар полюсов ротора.

Синхронные двигатели в промышленности обычно применяют при единичных мощностях свыше 300 кВт, при меньших мощностях обычно применяется более простой (и надёжный) асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

#### **Задание**

**Задача 4.1.** Параметры трехфазного синхронного генератора (табл. 4.1): номинальное (линейное) напряжение на выходе  $U_{\text{ном}}$  при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», номинальный ток статора  $I_{\text{ном}}$ , КПД генератора при номинальной нагрузке  $\eta_{\text{ном}}$ , число полюсов  $2p$ , мощность на входе генератора  $P_{\text{ном}}$ , полезная мощность на выходе генератора  $P_{\text{ном}}$ , суммарные потери в режиме номинальной нагрузки  $\sum P_{\text{ном}}$ , полная номинальная мощность на выходе  $S_{2\text{ном}}$ , коэффициент мощности нагрузки, подключенной к генератору,  $\cos \varphi_{\text{ном}}$ , вращающий момент первичного двигателя при номинальной нагрузке генератора  $M_{\text{ном}}$ . Требуется определить параметры, значения которых в табл. 4.1 не указаны.

Таблица 4.1

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	330	—	270	470	—	600	780	450	700	500
$U_{\text{ном}}$ , кВ	6,3	3,2	0,4	—	0,7	3,2	6,3	0,4	—	3,2
$\eta_{\text{ном}}$ , %	92	—	—	91	90	93	—	—	93	92
$2p$	6	8	—	6	10	12	6	—	6	10
$P_{\text{ном}}$ , кВт	—	—	206	—	—	—	667,4	369,5	—	—
$\sum P_{\text{ном}}$ , кВт	—	27	18	—	—	—	—	—	—	—
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0,9	—	0,85	0,9	—	0,92	—	0,9	0,92	0,85
$I_{\text{ном}}$ , А	—	72,2	—	43,1	190	—	—	—	64,2	—
$P_{\text{ном}}$ , кВт	—	340	—	—	190	—	717,6	—	—	—
$M_{\text{ном}}$ , Н·м	—	—	—	—	—	—	—	7735	—	—

Решение варианта 1.

1. Полезная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} = 330 \cdot 0,9 = 297 \text{ кВт.}$$

2. Мощность на входе генератора

$$P_{\text{1ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 297 / 0,92 = 322,8 \text{ кВт.}$$

3. Суммарные потери

$$\sum P_{\text{ном}} = P_{\text{1ном}} - P_{\text{ном}} = 322,8 - 297 = 25,8 \text{ кВт.}$$

4. Ток статора в номинальном режиме

$$I_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{\text{ном}}) = 330 / (1,73 \cdot 6,3) = 30,2 \text{ А.}$$

5. Синхронная частота вращения при  $2p = 6$  и частоте тока  $f_1 = 50$  Гц:

$$n_1 = f_1 \cdot 60 / p = 50 \cdot 60 / 3 = 1000 \text{ об/мин.}$$

6. Момент приводного двигателя, необходимый для вращения ротора генератора с синхронной частотой вращения в режиме номинальной нагрузки,

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{\text{1ном}} / n_1 = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 322,8 / 1000 = 3083 \text{ Н·м.}$$

Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Задание
4. Вывод.