

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

## **Теоретические основы электротехники**

Методические указания к практическим занятиям для студентов  
специальности 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»

Витебск  
2020

УДК 7.01 (075.8)

Составители:

Ю. В. Новиков, В. Ф. Куксевич

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 3 от 27.11.2020.

**Теоретические основы электротехники** : методические указания к практическим занятиям / сост. Ю. В. Новиков, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – 43 с.

Методические указания являются руководством к выполнению практических работ по курсу «Теоретические основы электротехники», определяют порядок выполнения и расчета студентом задач, общие требования, предъявляемые к выполнению расчетных заданий, представляют последовательность ее анализа, требования к структуре, содержанию и оформлению решения практической работы.

УДК 7.01 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

1 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	4
2 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	10
3 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	19
4 АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ	25
5 АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАТОРА	31
6 ВЫБОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ИЗВЕСТНОМУ РЕЖИМУ НАГРУЗКИ, РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ЕГО МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ	33
7 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С МАШИНАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	37
ЛИТЕРАТУРА	42

# 1 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Общие сведения

Схема простейшей цепи передачи электрической энергии постоянного тока изображена на рисунке 1.1.

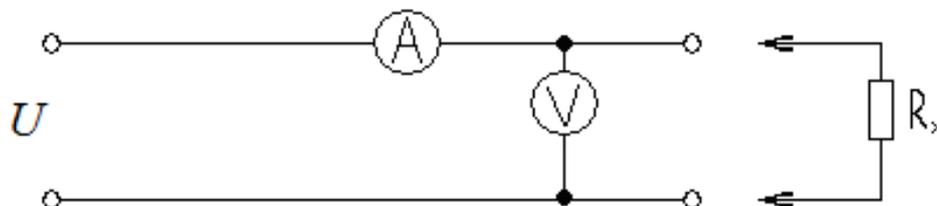


Рисунок 1.1

$U_1$  – напряжение в начале цепи,  $U_2$  – напряжение на нагрузке,  $R_H$  – сопротивление нагрузки,  $R_L$  – сопротивление проводов линии электропередачи.

При известных  $U_1$ ,  $R_H$ ,  $R_L$  ток в цепи равен:

$$I = \frac{U_1}{R_L + R_H}. \quad (1.1)$$

Откуда соотношение между напряжениями в линии определяется выражением

$$U_1 = U_2 + I \cdot R_L = U_2 + \Delta U, \quad (1.2)$$

где  $\Delta U = I \cdot R_L$  – падение напряжений на сопротивлении линии электропередачи.

Умножив уравнение (1.2) на ток  $I$ , получим уравнение баланса мощностей в линии:

$$U_1 \cdot I = U_2 \cdot I + I^2 \cdot R_L,$$

или

$$P = P_H + \Delta P,$$

где  $P = U_1 \cdot I$  – мощность, отдаваемая источником во внешнюю цепь,

$P_H = U_2 \cdot I$  – мощность, потребляемая нагрузкой,

$\Delta P = I^2 \cdot R_L$  – потери мощности в линии электропередачи.

Если напряжение  $U_1$  в начале цепи остаётся неизменным, то при изменении сопротивления нагрузки  $R_H$  будет изменяться ток в цепи и напряжение на нагрузке, т.к. падение напряжения в линии пропорционально величине тока. В предельных режимах холостого хода (х.х.) ( $R_H = \infty$ ) и короткого замыкания (к.з.) ( $R_H = 0$ ) ток в линии и напряжение на нагрузке будут, используя (1.1) и (1.2), равны:

$$1) \text{ режим холостого хода } I = 0; U_2 = U_1;$$

$$2) \text{ режим короткого замыкания } I_{кз} = \frac{U_1}{R_L}; U_2 = 0.$$

Мощность, потребляемая нагрузкой:

$$P_H = U_2 \cdot I = I^2 \cdot R_H = \frac{U_1^2}{(R_L + R_H)^2} \cdot R_H, \quad (1.3)$$

будет изменяться от нуля при холостом ходе до нуля при коротком замыкании.

Максимальная мощность  $P_{H \max}$  нагрузке передаётся в согласованном режиме. Значение  $P_H$  для этого режима можно получить, исследуя выражение (1.3) на максимум ( $(\partial P_H / \partial R_H) = 0$ ). Отсюда следует, что согласованный режим работы электрической цепи наступает, если сопротивления линии и нагрузки будут равны  $R_H = R_L$ .

Величина мощности, потребляемой при этом нагрузкой, определится выражением

$$P_{H \max} = \frac{U_1^2}{4R_H}.$$

Важной характеристикой цепи является её коэффициент полезного действия, который равен отношению мощности, потребляемой нагрузкой, к мощности, отдаваемой источником:

$$\eta = \frac{P_H}{P}.$$

Используя (1.1) и (1.3), имеем:

$$\eta = 1 - \frac{R_L \cdot I}{U_1} = \frac{R_H}{R_L + R_H} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (1.4)$$

Из (1.4) следует, что к.п.д. цепи изменяется от 1 в режиме холостого хода до нуля в режиме короткого замыкания. В согласованном режиме  $\eta = 0,5$ .

## Практическое задание

### Задача №1

Дано:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 5R.$$

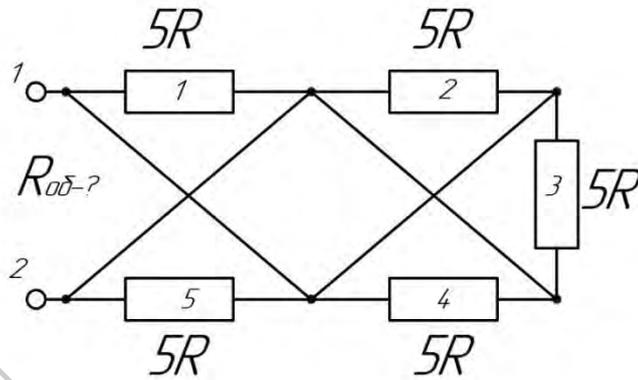


Рисунок 1.2

Найти:

$$R_{\text{общ}} - ?$$

### Задача №2

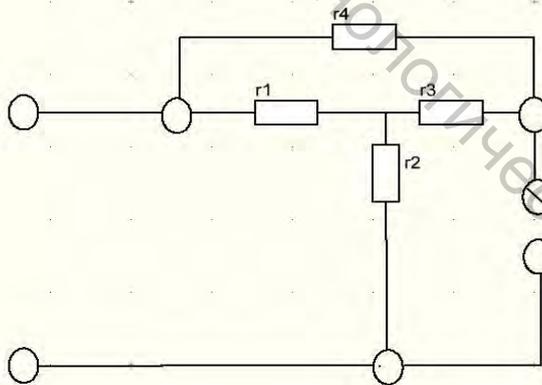


Рисунок 1.3

Определить эквивалентное сопротивление цепи по отношению к зажимам при разомкнутом и замкнутом ключе.  $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 4 \text{ Ом}$ .

### Задача №3

Определить эквивалентное сопротивление и общий ток цепи, если  $E = 128 \text{ В}$ ,  $r_{12} = 30 \text{ (Ом)}$ ,  $r_{23} = r_{31} = 10 \text{ (Ом)}$ ,  $r_{24} = 5 \text{ (Ом)}$ ,  $r_{53} = 4 \text{ (Ом)}$ ,  $r_{45} = r_{65} = r_{46} = 12 \text{ (Ом)}$ .

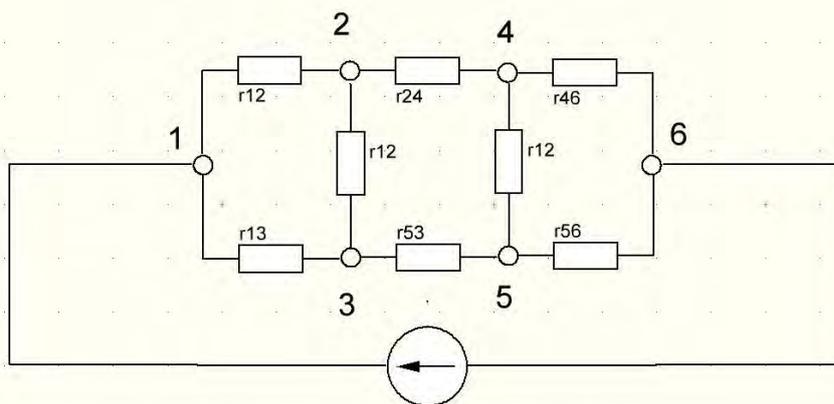


Рисунок 1.4

### Примеры решения задач

#### Задача №4

Сопротивление каждого резистора в цепи (рис. 1.5) равно 100 Ом. Участок подключён к источнику постоянного напряжения выводами *A* и *B*. Напряжение на резисторе 4 равно 12 В. Найти напряжение между выводами схемы на участке *A–B*.

Дано:  $R1 = R2 = R3 = R4 = R5 = 100 \text{ Ом}$ ,

$U_4 = 12 \text{ В}$ .

Найти:  $U$ .

Решение

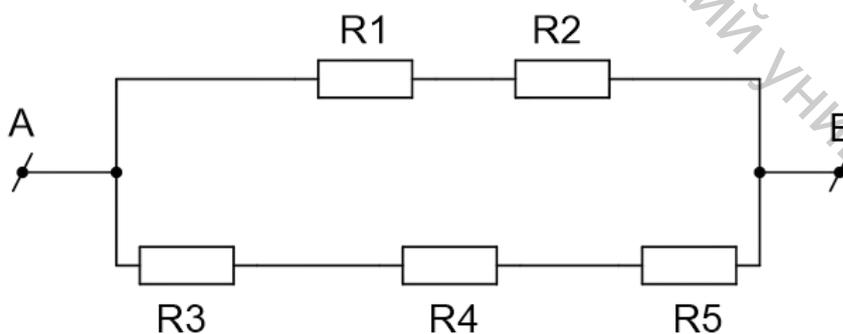


Рисунок 1.5

Резисторы 3–5 расположены последовательно, значит, силы тока на этих резисторах равны:

$$I_3 = I_4 = I_5.$$

По условию, значения 3, 4 и 5 резисторов равны, то и напряжения на этих резисторах будут равны:

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = U_4 = U_5 = 36 \text{ В.}$$

Следовательно, общее напряжение на участке, состоящем из резисторов 3, 4 и 5, будет равно:

$$U_{345} = U_3 + U_4 + U_5 = 12 + 12 + 12 = 36 \text{ В.}$$

Так как участок с резисторами 1 и 2 соединён с участком с резисторами 3, 4 и 5 параллельно, то напряжения на этих участках равны между собой и равны общему напряжению на участке A-B:

$$U_{345} = U_{12} = U = 36 \text{ В.}$$

**Ответ:** 36 В.

### Задача №5

Дано:

$R_1=130 \text{ Ом}, R_2=100 \text{ Ом}, R_3=150 \text{ Ом}, R_4=200 \text{ Ом}, R_5=80 \text{ Ом}, E_1=30 \text{ В},$   
 $E_2=60 \text{ В}, E_3=80 \text{ В}, I_5=0,206 \text{ А.}$

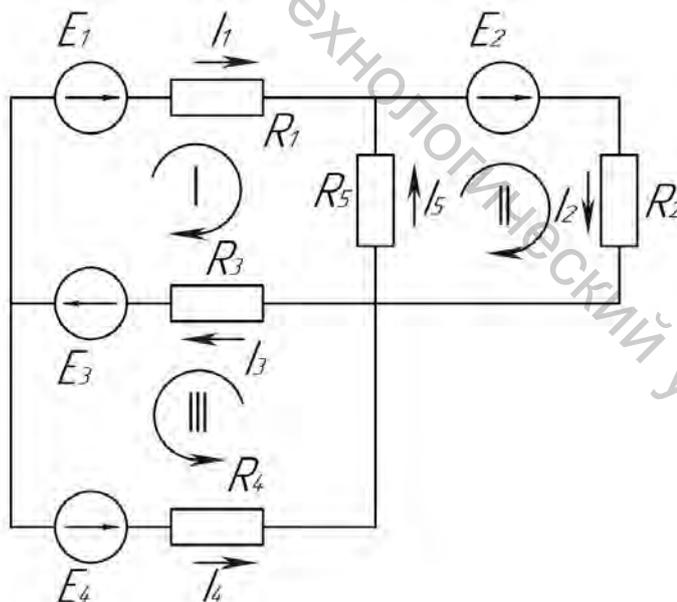


Рисунок 1.6

**Решение:**

По первому закону Кирхгофа количество уравнений  $n-1=2$

$$I_3 - I_1 - I_4 = 0.$$

$$I_5 + I_1 - I_2 = 0.$$

По второму закону для трёх контуров.

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - R_5 I_5 = E_1 + E_3.$$

$$R_2 I_2 + R_5 I_5 = E_2.$$

$$R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_3 + E_4.$$

Система имеет вид

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 - R_5 I_5 = E_1 + E_3.$$

$$R_2 I_2 + R_5 I_5 = E_2.$$

$$R_3 I_3 + R_4 I_4 = E_3 + E_4.$$

$$I_3 - I_1 - I_4 = 0.$$

$$I_5 + I_1 - I_2 = 0.$$

Определим токи

$$I_1 = 0,229 \text{ A.}$$

$$I_2 = 0,435 \text{ A.}$$

$$I_3 = 0,645 \text{ A.}$$

$$I_4 = 0,416 \text{ A.}$$

$$E_4 = 100 \text{ B.}$$

Проверка:

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 = E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3 + E_4 I_4.$$

$$126,2 \approx 126,2.$$

Уравнение баланса сошлось.

### Задача №6

Дано:

$$R_1 = 10 \text{ Ом}, R_2 = 15 \text{ Ом}, R_3 = 20 \text{ Ом}, E_1 = 5 \text{ В}, E_2 = 15 \text{ В.}$$

Определить токи в ветви методом наложения и методом напряжения между двумя узлами.

Решение:

По 1-му закону Кирхгофа количество уравнений равно  $n-1$ , количество узлов  $n=2$ , следовательно, уравнение одно.

Сумма токов сходящихся в узле равна нулю. Входящие токи положительны, выходящие отрицательны.

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

Уравнения для первого и второго контуров по второму закону

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1.$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2.$$

Система имеет вид

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1.$$

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2.$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

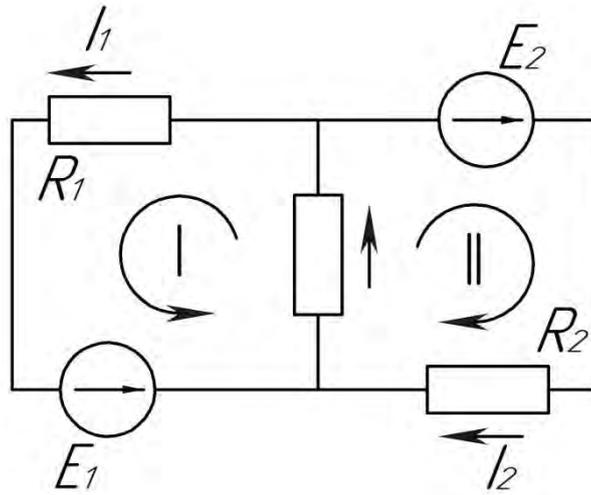


Рисунок 1.7

Определим токи

$$I_1 = 0,143 \text{ A.}$$

$$I_2 = 0,262 \text{ A.}$$

$$I_3 = 0,405 \text{ A.}$$

## 2 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Общие сведения

Рассмотрим цепь, в которой последовательно включены активное сопротивление  $r$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$  (рис. 2.1). Пусть она подключена к источнику синусоидального напряжения, в ней будет протекать синусоидальный ток  $i = I_m \sin \omega t$ .

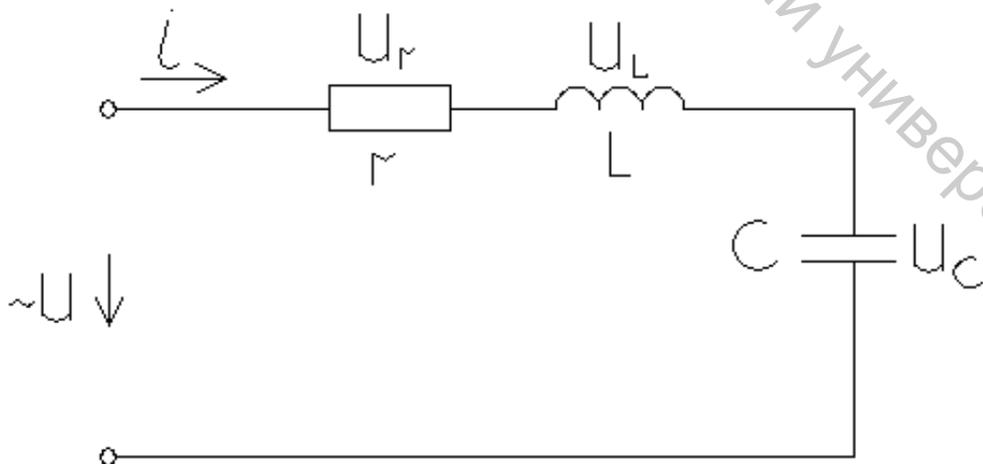


Рисунок 2.1

Мгновенное значение напряжения всей цепи согласно второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 u &= u_r + u_L + u_C = r \cdot i + L \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{1}{C} \int i \cdot \partial t = \\
 &= r \cdot I_m \cdot \sin \omega t + \omega L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) = \\
 &= U_{mr} \cdot \sin \omega t + U_{mL} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) + U_{mC} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ). \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

В соответствии с уравнением (2.1) построим векторную диаграмму. За исходный вектор возьмём вектор амплитуды тока  $I_m$  (рис. 2.2).

Вектор амплитуды напряжения на индуктивном элементе  $U_{mL} = \omega L I_m$  будет опережать вектор тока на  $90^\circ$ , а вектор амплитуды напряжения на ёмкостном элементе  $U_{mC} = I_m / \omega C$  – отстает от вектора тока на  $90^\circ$ , т.е. векторы  $U_{mL}$  и  $U_{mC}$  будут направлены противоположно. Вектор амплитуды напряжения на активном сопротивлении  $U_{mr} = r \cdot I_m$  будет сонаправлен с вектором тока.

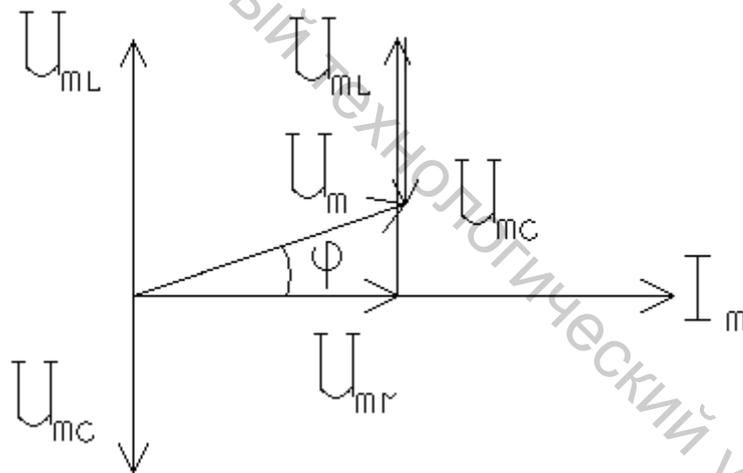


Рисунок 2.2

Из векторной диаграммы следует, что

$$\vec{U}_m = \vec{U}_{mr} + \vec{U}_{mL} + \vec{U}_{mC}.$$

Амплитуда общего напряжения  $U_m$  в соответствии с векторной диаграммой будет равна

$$U_m = \sqrt{U_{mr}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2},$$

откуда

$$U_m = \sqrt{(I_m \cdot r)^2 + (\omega L I_m - \frac{1}{\omega C} \cdot I_m)^2} = I_m \sqrt{r^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}. \quad (2.2)$$

где  $\omega L$  и  $1/\omega C$  – индуктивное  $X_L$  и емкостное  $X_C$  сопротивления, соответственно, действующие значения синусоидального тока  $I$ :

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} = \frac{U}{Z}.$$

Это выражение даёт возможность узнать модуль тока, но не определяет величину сдвига фаз между напряжением и током. Знаменатель  $Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}$  представляет собой модуль полного сопротивления цепи. Угол сдвига фаз между током и напряжением определяется по формулам

$$\varphi = \arccos \frac{r}{Z} = \arcsin \frac{X}{Z} = \operatorname{arctg} \frac{X}{r} = \operatorname{arctg} \frac{U_L - U_C}{U_r}.$$

При равенстве индуктивного сопротивления емкостному ( $X_L = X_C$ ) возникает резкое возрастание амплитуды тока – резонанс напряжений:

$$X_L - X_C = 0,$$

и, следовательно,

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{r},$$

сопротивление цепи минимально, модуль тока достигает максимального значения. При этом  $\cos \varphi = 1$ , ток совпадает по фазе с напряжением, а нагрузка цепи имеет активный характер.

При резонансе на емкостном и индуктивном элементах напряжения равны по величине и противоположны по фазе. Напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности во столько раз больше подведенного напряжения, во сколько раз реактивные сопротивления элементов  $L$  и  $C$  больше активного:

$$U_r = r \cdot I = r \cdot (U/r) = U,$$

$$U_L = X_L \cdot I = X_L \cdot (U/r) = (X_L/r) \cdot U,$$

$$U_C = X_C \cdot I = X_C \cdot (U/r) = (X_C/r) \cdot U.$$

При параллельном соединении активного сопротивления  $r$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  (рис. 2.3) параллельные ветви электрической цепи находятся под одним напряжением  $u = U_m \sin \omega t$ . Мгновенное значение тока всей цепи согласно первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 i &= i(r) + i(L) + i(C) = \frac{u}{r} + \frac{1}{L} \int u \omega dt + C \frac{\partial u}{\partial t} = \\
 &= \frac{U_m}{r} \cdot \sin \omega t + \frac{U_m}{\omega L} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) + \omega C U_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = \\
 &= I_{mr} \cdot \sin \omega t + I_{mL} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) + I_{mC} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ).
 \end{aligned}$$

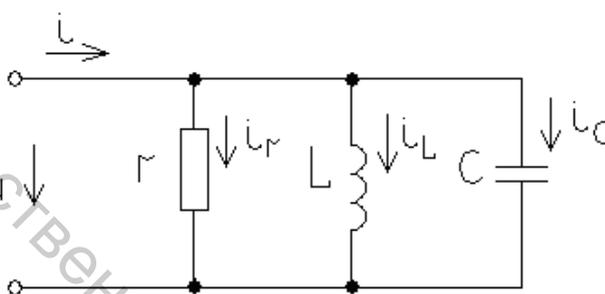


Рисунок 2.3

При построении векторной диаграммы исходный вектор, вектор амплитуды напряжения  $U_m$  (рис. 2.4). Вектор амплитуды тока в индуктивном элементе  $I_{mL} = U_m / \omega L$  отстает от вектора напряжения на  $90^\circ$ , вектор амплитуды тока в емкостном элементе  $I_{mC} = U_m \cdot \omega C$  – опережает вектор напряжения на  $90^\circ$ . Вектор амплитуды тока в активном сопротивлении  $I_{mr} = U_m / r$  направлен как и вектор напряжения.

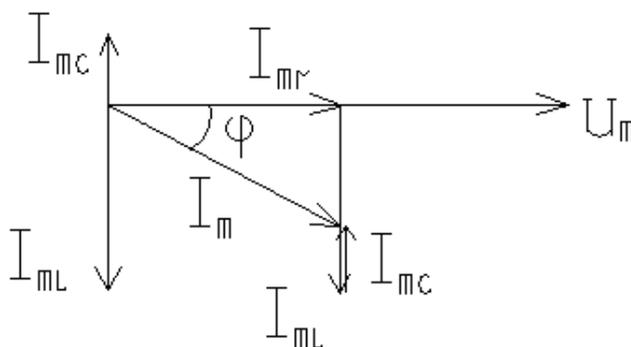


Рисунок 2.4

Из векторной диаграммы следует:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_{mr} + \vec{I}_{mL} + \vec{I}_{mC}.$$

Амплитуда общего тока, как следует из векторной диаграммы, будет равна:

$$I_m = \sqrt{I_{mr}^2 + (I_{mL} - I_{mC})^2}. \quad (2.3)$$

Запишем выражение (2.3) для действующих значений синусоидального тока  $I$  и напряжения  $U$ :

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_r^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{r}\right)^2 + \left(\frac{U}{\omega L} - \frac{U}{1/\omega C}\right)^2} = U \cdot \sqrt{\frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2} = \\ &= U \cdot \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = U \cdot y. \end{aligned}$$

Величины  $g$ ,  $b$ ,  $y$ , имеющие размерность проводимости, называются соответственно активной, реактивной и полной проводимостями,  $b_L = 1/\omega L$  и  $b_C = \omega C$  – индуктивной и емкостной проводимостями соответственно.

Угол сдвига фаз между общим током и напряжением определяется:

$$\varphi = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_r} = \arctg \frac{b}{g} = \arcsin \frac{b}{y} = \arccos \frac{g}{y}.$$

При равенстве индуктивной и емкостной проводимостей ветвей  $b_L = b_C$ , в электрической цепи возникает резонанс токов. Полная проводимость и действующее значение общего тока в цепи имеют минимальные значения:  $y=g$ ,  $I=Ug$ ; ток совпадает по фазе с напряжением,  $\cos \varphi = 1$ .

### Практическое задание

#### Задача №1

Дано:

$R_1=28 \text{ Ом}$ ,  $R_2=50 \text{ Ом}$ ,  $X_C=96 \text{ Ом}$ ,  $U_C=192 \text{ В}$ .

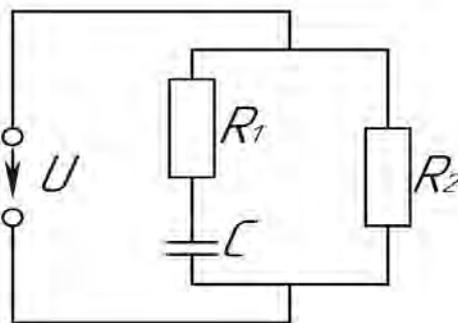


Рисунок 2.5

Найти:  $U - ?$ ,  $Z_{общ} - ?$   
 Построить векторную диаграмму.

**Задача №2**

Дано:

$R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_k = 3 \text{ Ом}$ ,  $L = 25 \text{ мГн}$ ,  $U = 120 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ .

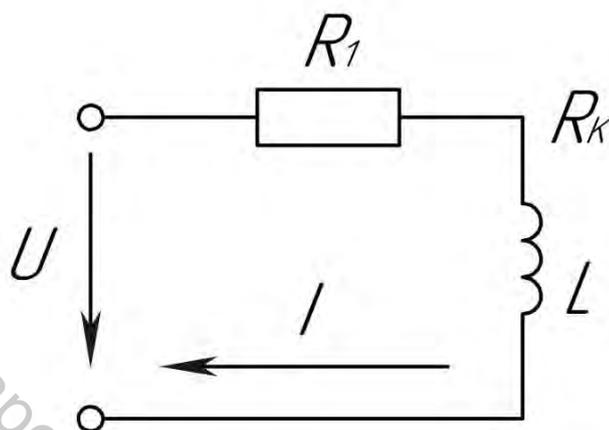


Рисунок 2.6

Найти:  
 Токи и мощности.

**Задача №3**

Дано:

$R = 1 \text{ Ом}$ ,  $R_k = 10 \text{ Ом}$ ,  $X_L = 50 \text{ мГн}$ ,  $U_1 = 127 \text{ В}$ ,  $X_C = 50 \text{ Ом}$ .

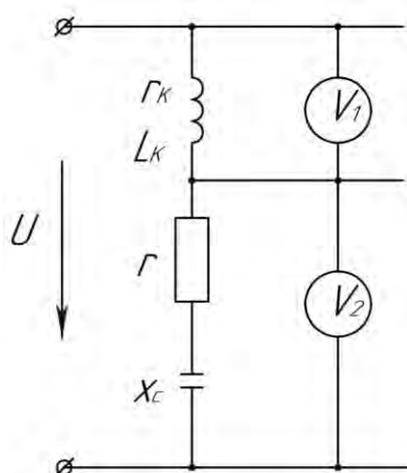


Рисунок 2.7

Найти:  $U_1$  и  $U_2$  и сдвиг фаз между ними.

### Задача №4

Дано:

$$R=30 \text{ Ом}, I=6,5 \text{ А}, I_1=3,5 \text{ А}, I_2=4 \text{ А}.$$

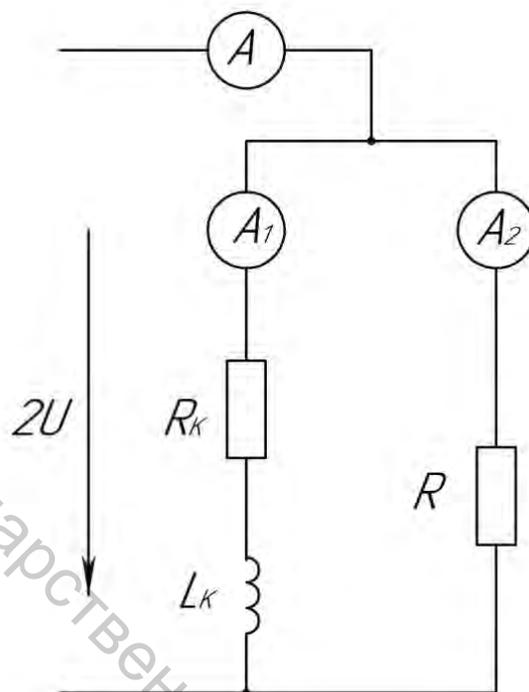


Рисунок 2.8

Определить: мощность катушки.

### Задача №5

Дано:

$$U_1=100 \text{ В}, U_2=80 \text{ В}, I=10 \text{ А}, f=100 \text{ Гц}.$$

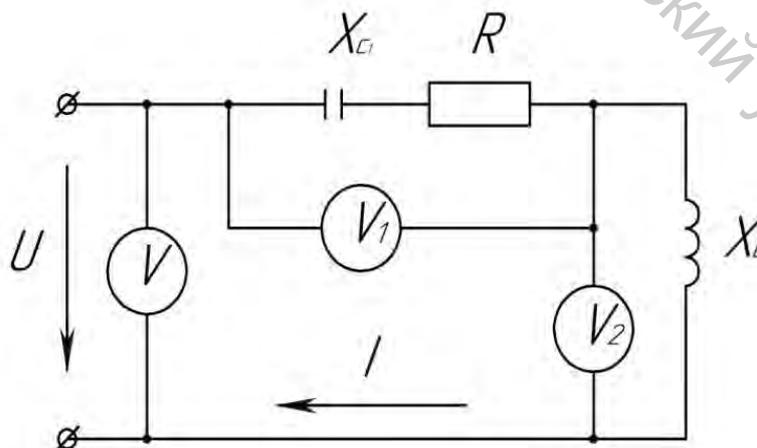


Рисунок 2.9

Определить:  $U_1, R, L, C$  - ?

## Примеры решения задач

### Задача №6

Какое количество теплоты выделится на активном сопротивлении  $R=10 \text{ Ом}$  за 2 периода колебаний, если мгновенное значение переменного напряжения на сопротивлении описывается уравнением  $U = 15 \cos 100\pi t$ , В. Из записи напряжения видим:

$$U_m = 15 \text{ В.}$$

– амплитуда напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{15}{\sqrt{2}},$$

– действующее значение

$$\omega = 100 \cdot \pi.$$

Так как

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 0,02,$$

то

$$t = 2T = 0,04 \text{ с.}$$

Количество теплоты равно:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = \frac{225}{2} \cdot \frac{0,04}{10} = 0,45.$$

Ответ: 0,45 Дж.

### Задача №7

В последовательной цепи переменного тока из резистора сопротивлением  $R = 25 \text{ Ом}$ , конденсатора емкостью  $C = 4,8 \text{ мкФ}$  и катушки индуктивностью  $L = 0,3 \text{ Гн}$  наблюдается электрический резонанс. Во сколько раз амплитуда напряжения на катушке больше амплитуды приложенного напряжения?

Добротность определяет то, во сколько раз напряжение на катушке или конденсаторе больше входного (напряжения питания). Добротность:

$$Q = \frac{\rho}{R},$$

где волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{25} \sqrt{\frac{0,3 \cdot 10^6}{4,8}} = \frac{250}{25} = 10.$$

Ответ: в 10 раз.

### Задача №8

Катушка с ничтожно малым активным сопротивлением включена в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. При напряжении 125 В сила тока равна 3 А. Какова индуктивность катушки?

Определим угловую частоту:

$$\omega = 2\pi\nu = 6,28 \cdot 50 = 314.$$

Индуктивное сопротивление катушки:

$$x_L = \omega L.$$

По закону Ома:

$$U = Ix_L = I\omega L.$$

$$L = \frac{U}{I\omega} = \frac{125}{3 \cdot 314} = 0,13.$$

Ответ:  $L=0,13$  Гн.

### Задача №9

Амплитудные значения напряжения и тока на резисторе соответственно равны

$$U_m = 100 \text{ В}, I_m = 2 \text{ А}.$$

Какая средняя мощность выделится резисторе этой цепи?

Средняя мощность вычисляется по формуле:

$$P = UI \cos \phi,$$

где  $U$  и  $I$  – действующие значения тока и напряжения (они в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных), а  $\phi$  – угол сдвига фаз напряжения и тока. Для резистора  $\phi = 0$ .

Тогда

$$P = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{100 \cdot 2}{2} = 100$$

Ответ: 100 Вт.

### Задача №10

Напряжение на резисторе в цепи переменного тока изменяется по закону  $U = 140 \cos 100\pi t$ , В. Чему равно действующее значение напряжения?

Действующие значения тока и напряжения в  $\sqrt{2}$  раз меньше амплитудных:

$$u(t) = U_m \cos 100\pi t.$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{140}{1,41} = 100 \text{ В}.$$

Ответ: 100 В.

### 3 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Общие сведения

Трехфазная электрическая цепь может быть представлена как совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют э.д.с. одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга на угол  $120^\circ$ .

Схема соединения имеет вид (рис. 3.1):

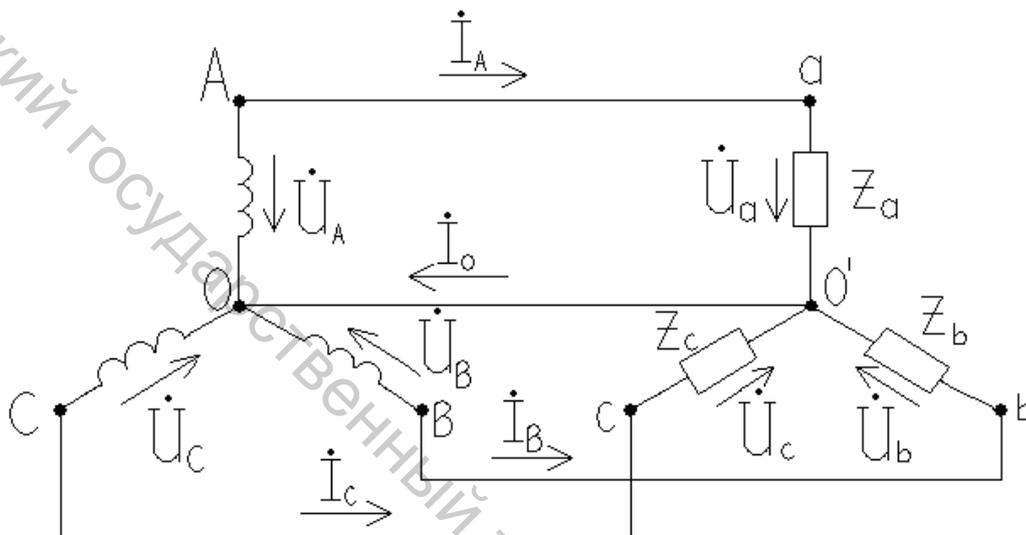


Рисунок 3.1

Напряжение на фазах генератора  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  и нагрузки  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  принято называть фазными. Напряжения между линейными проводами  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и токи в линейных проводах называются линейными.

Из схемы (рис. 3.1) следует, что

$$I_L = I_\Phi.$$

По первому закону Кирхгофа для узла  $O'$  можем записать:

$$\dot{I}_O = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (3.1)$$

Если принять сопротивление проводов равным нулю, то фазные напряжения нагрузки будут равны фазным напряжениям генератора:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_a; \quad \dot{U}_B = \dot{U}_b; \quad \dot{U}_C = \dot{U}_c.$$

Отсюда фазные токи будут определяться фазными напряжениями генератора и, в общем случае, полным сопротивлением фаз приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}, \quad (3.2)$$

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – комплексные действующие значения фазных напряжений;  $Z_a, Z_b, Z_c$  – полные сопротивления фаз в комплексной форме.

Соединение на рисунке 3.1 обеспечивает независимую работу фаз, изменение нагрузки в одной из фаз не оказывает влияния на режим работы других фаз. Векторные диаграммы для различных режимов нагрузки имеют следующий вид:

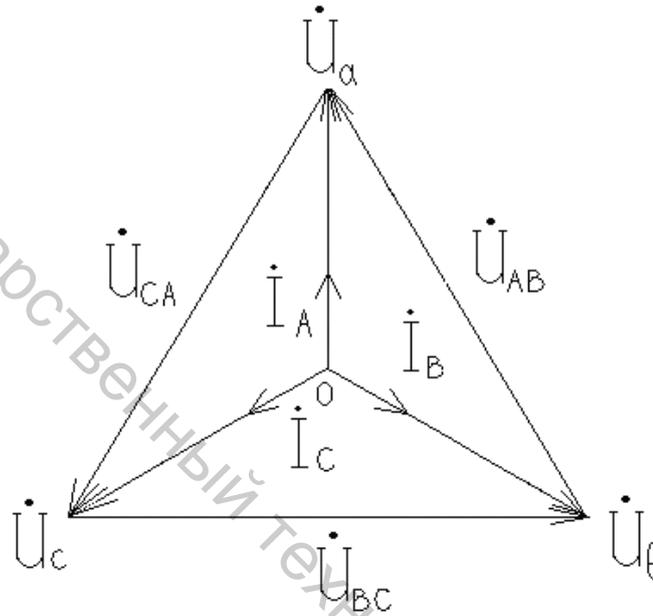


Рисунок 3.2 – Одинаковая нагрузка

Для построения векторных диаграмм использованы выражения (3.1) и (3.2).

Векторы линейных напряжений связаны с векторами фазных напряжений следующими соотношениями:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

Из равнобедренного треугольника, образованного двумя фазными и одним линейным напряжениями, следует, что

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}. \quad (3.3)$$

При изменении нагрузок изменяются токи только тех фаз, где произошло изменение. При этом появляется ток в нулевом проводе.

При равномерной нагрузке ток  $I_0 = 0$ . Следовательно, в этом режиме отпадает необходимость в нулевом проводе и система будет являться трехпроводной.

Эта система может использоваться только при симметричной нагрузке. При изменении сопротивления хотя бы в одной фазе, между точками  $O - O'$  появляется напряжение, определяемое по методу 2 узлов.

$$\dot{U}_{oo'} = \frac{\dot{U}_a \cdot Y_a + \dot{U}_b \cdot Y_b + \dot{U}_c \cdot Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$

где  $Y_a, Y_b, Y_c$  – полные проводимости отдельных фаз в комплексной форме.

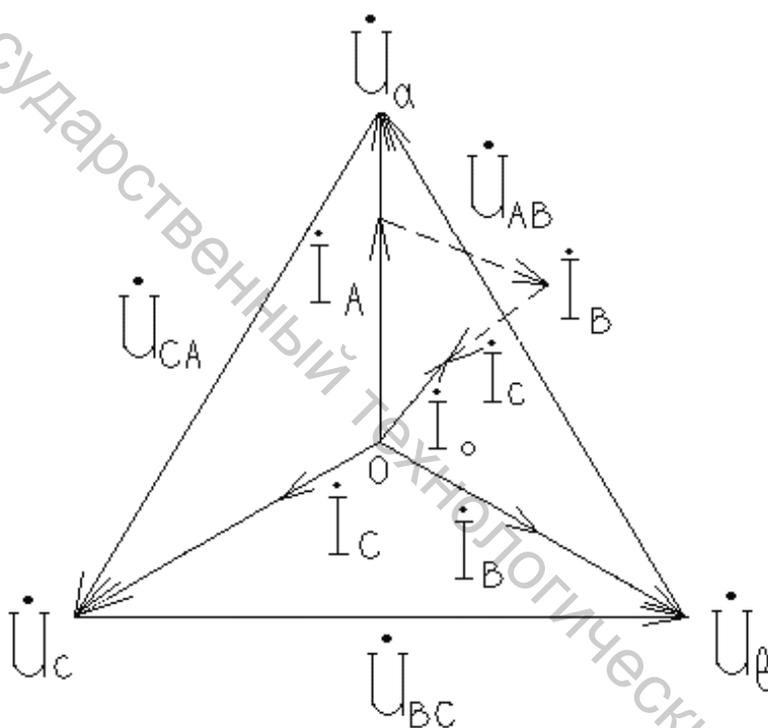


Рисунок 3.3 – Неодинаковая нагрузка

Вследствие этого фазные напряжения нагрузки не будут равны фазным напряжениям генератора. Они будут определяться выражениями:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{oo'}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{oo'}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{oo'}.$$

В случае короткого замыкания одной из фаз (например, фазы C) фазные напряжения  $\dot{U}_a$  и  $\dot{U}_b$  достигают наибольших значений, равных линейным напряжениям.

Векторная диаграмма для трехпроводной системы при неравномерной нагрузке имеет вид:

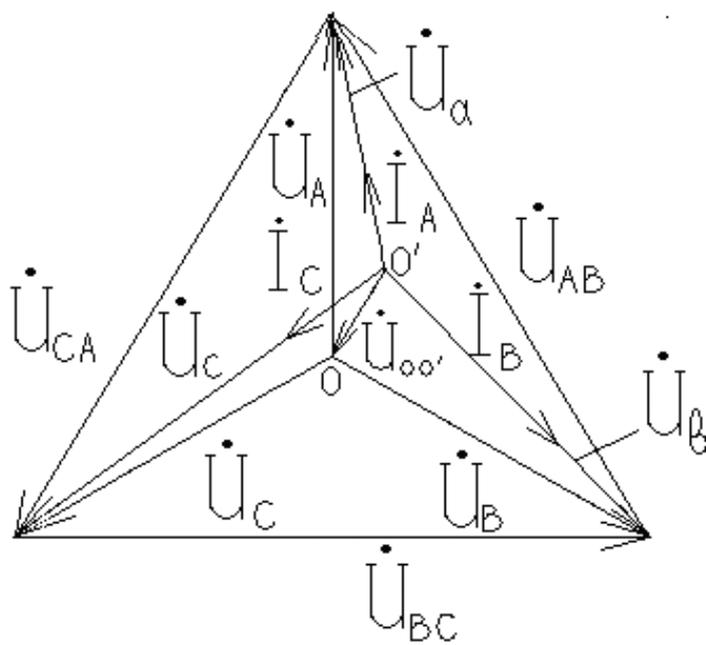


Рисунок 3.4

### Практическое задание

#### Задача №1

Как изменятся токи после замыкания ключа К?

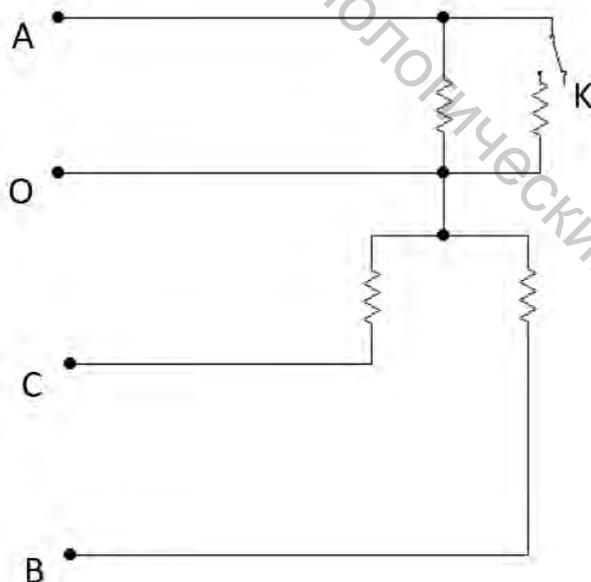


Рисунок 3.5

#### Задача №2

Как изменятся токи и показания ваттметра после замыкания ключа К?

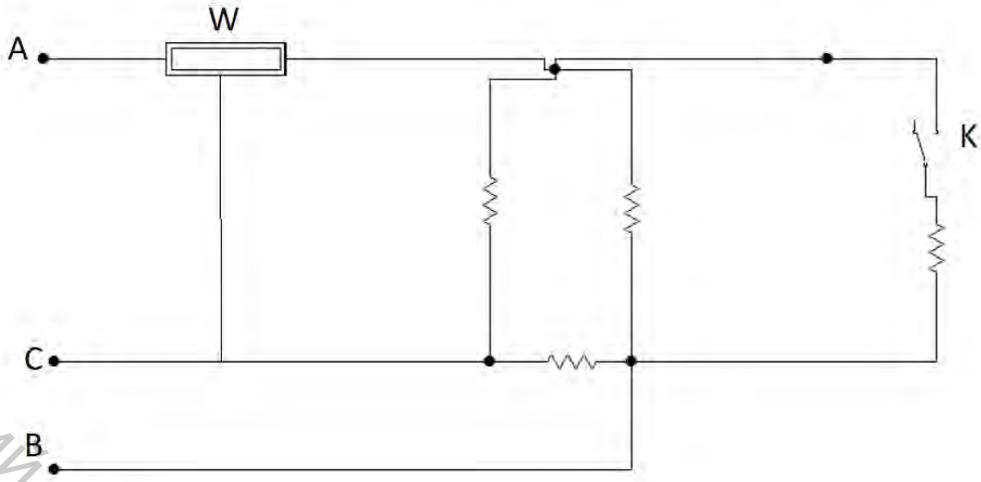


Рисунок 3.6

**Задача №3**

Как изменятся токи после размыкания ключа К?

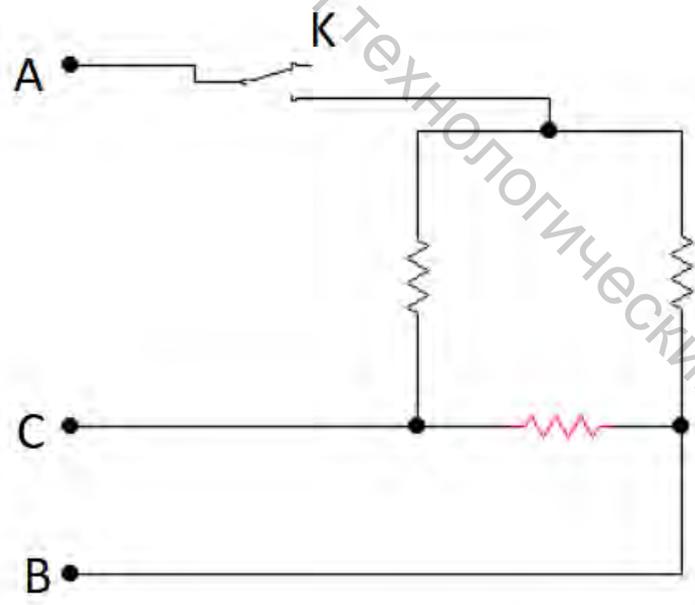


Рисунок 3.7

**Задача №4**

Как изменятся токи после размыкания ключа К?

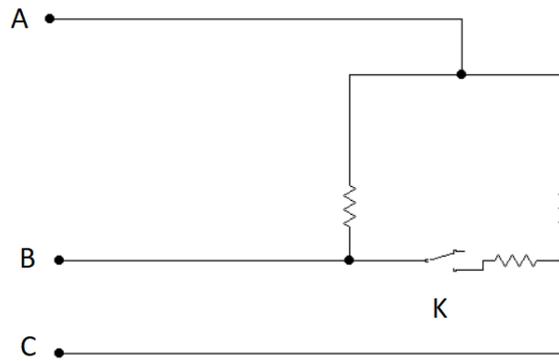


Рисунок 3.8

### Примеры решения задач

#### Задача №5

Дано:  $U_n = 380$ ,  $R = 50$  Ом,  $x_L = 35$  Ом.

Найти токи в ветвях.

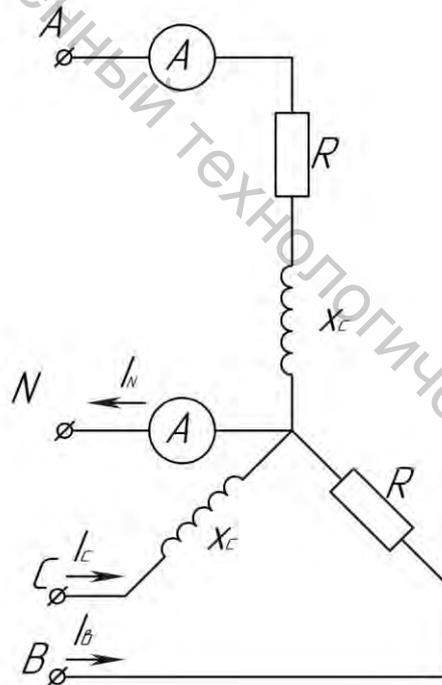


Рисунок 3.9

Решение:

Комплексные значения сопротивления:

$$\underline{Z}_A = R + j x_L = 50 + j35 = 61e^{j35} \text{ Ом.}$$

$$\underline{Z}_B = R = 50 \text{ Ом.}$$

$$\underline{Z}_C = j x_L = 35e^{j90} \text{ Ом.}$$

Напряжение в фазах

$$U_A = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

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

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

Токи в фазах

$$\dot{i}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{220}{61e^{j35}} = 3,61e^{-j35} \text{ А;}$$

$$\dot{i}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{220e^{-j120}}{50} = 4,4e^{-j120} \text{ А;}$$

$$\dot{i}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{220e^{j120}}{35e^{j90}} = 6,29e^{j30} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = (-3,26 + j1,55) + (3,58 - j2,55) + (0,97 - -j6,21) = \\ 1,29 - j7,21 = 7,32e^{-j80} \text{ А.}$$

Ответ

$$I_{A1} = I_A = 3,61 \text{ А, } I_{A2} = I_N = 7,32 \text{ А.}$$

## 4 АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

### Основные понятия теории магнитного поля

Магнитное поле – составляющая электромагнитного поля, появляющаяся при наличии изменяющегося во времени электрического поля. Кроме того, магнитное поле может создаваться током заряженных частиц, либо магнитными моментами электронов в атомах (постоянные магниты). С точки зрения квантовой теории поля электромагнитное взаимодействие переносится безмассовым бозон-фотонем (частицей, которую можно представить как квантовое возбуждение электромагнитного поля). Основной характеристикой магнитного поля является его сила, определяемая вектором магнитной индукции (вектор индукции магнитного поля). В СИ магнитная индукция измеряется в теслах (Тл), в системе СГС в гауссах.

Магнитное поле – это особый вид материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами или телами, обладающими магнитным моментом.

## Магнитное поле и его параметры

Направление магнитных линий и направление создающего их тока связаны между собой известным правилом правоходового винта (буравчика), а так же правилом левой руки (рис. 4.1).

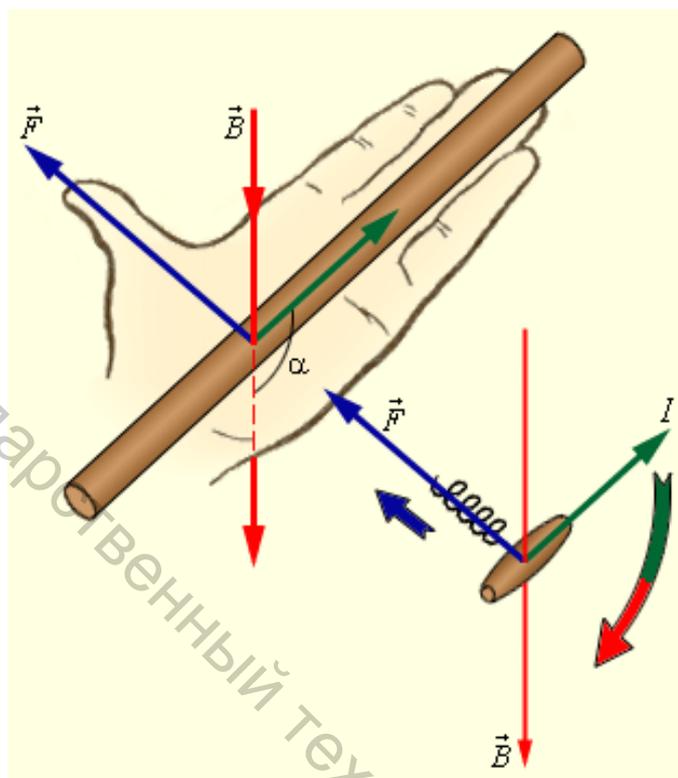


Рисунок 4.1 – Магнитное поле. Правило Буравчика и правило левой руки

Основной величиной, характеризующей интенсивность и направление магнитного поля, является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , которая измеряется в Теслах [Тл].

Вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной к магнитной линии, направление вектора совпадает с осью магнитной стрелки, помещенной в рассматриваемую точку магнитного поля.

Величина  $\vec{B}$  определяется по механической силе, действующей на элемент проводника с током, помещенный в магнитное поле.

Если  $\vec{B}$  во всех точках поля имеет одинаковую величину и направление, то такое поле называется равномерным.

$\vec{B}$  зависит не только от величины  $I$ , но и от магнитных свойств окружающей среды.

Второй важной величиной, характеризующей магнитное поле, является магнитный поток  $\Phi$ , который измеряется в Веберах [Вб]. При исследовании магнитных полей и расчете магнитных устройств пользуются расчетной величиной  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля [А/м].

Элементарным магнитным потоком  $\Phi$  сквозь бесконечно малую площадку называется величина (рис. 4.2).

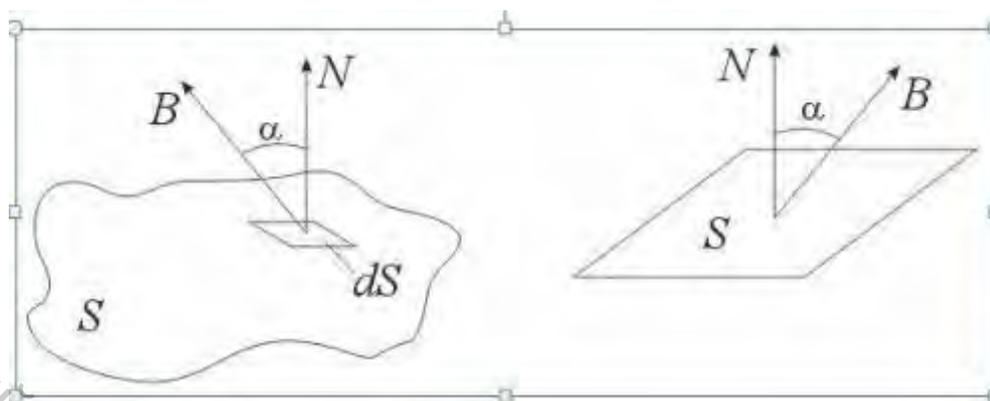


Рисунок 4.2 – Определение магнитного потока, пронизывающего:  
а) произвольную поверхность; б) плоскую поверхность в равномерном магнитном поле

$$d\Phi = B \cos \alpha dS,$$

где  $\alpha$  – угол между направлением и нормалью к площадке  $dS$ .

Сквозь поверхность  $S$  [м<sup>2</sup>]

$$\Phi = \int d\Phi = \int B \cos \alpha dS.$$

Если магнитное поле равномерное, а поверхность  $S$  представляет собой плоскость

$$\Phi = B S.$$

Для неферромагнитных материалов и сред (дерево, бумага, медь, алюминий, воздух)  $m_a$  не отличается от магнитной проницаемости вакуума и равна

$$m_a = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м (Генри/метр)},$$

где  $m_a$  – абсолютная магнитная проницаемость среды. У ферромагнетиков  $m_a$  – переменная величина, которая зависит от магнитной индукции  $B$ .

### Магнитные цепи

Всякий электромагнит состоит из стального сердечника – магнитопровода и намотанной на него катушки с витками изолированной проволоки, по которой проходит электрический ток.

Совокупность нескольких участков: ферромагнитных (сталь) и неферромагнитных (воздух), по которым замыкаются линии магнитного потока, составляют магнитную цепь.

### Закон полного тока

В основе расчета магнитных цепей лежит закон полного тока (рис. 4.3)

$$\oint H dL = \oint H \cos \alpha dL = \sum I,$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля в данной точке пространства;  $dL$  – элемент длины замкнутого контура  $L$ ;  $\alpha$  – угол между направлениями векторов;  $\sum I$  – алгебраическая сумма токов, пронизывающих контур  $L$ .

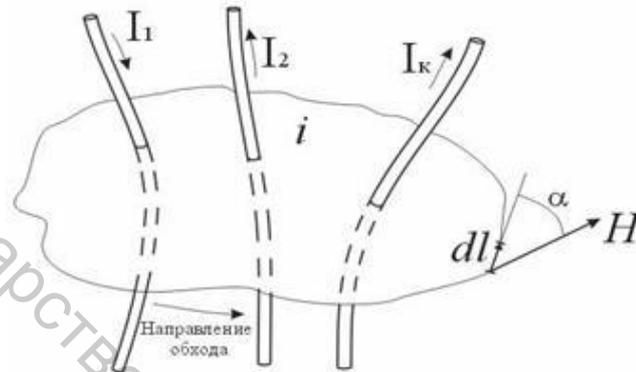


Рисунок 4.3 – Закон полного тока

Ток  $I_k$ , пронизывающий контур  $L$ , считается положительным, если принятое направление обхода контура и направление этого тока связаны правилом правоходового винта (буравчика).

Применение закона полного тока для расчета магнитных цепей.

Рассмотрим простейшую магнитную цепь, выполненную в виде кольца тороида из однородного материала (рис. 4.4).

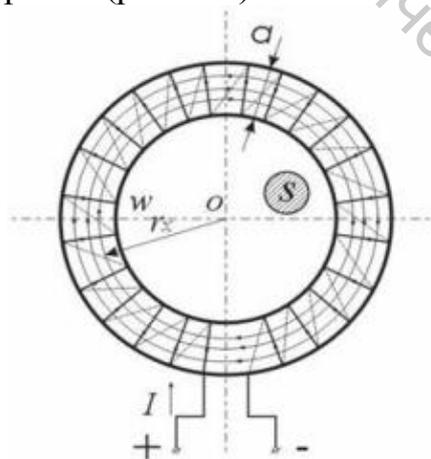


Рисунок 4.4 – Кольцевая магнитная цепь

Обмотка имеет  $W$  витков и обтекается током  $I$ . Магнитные линии внутри кольца представляют собой концентрические окружности с центром в точке  $O$ . Применим к контуру  $C_x$ , совпадающему с одной из магнитных линий,

проходящих в магнитопроводе, закон полного тока. При этом будем считать:  $a=0$ ; величина  $H_x$  во всех точках контура одинакова; сумма токов, пронизывающих контур, равна  $IW$ .

Тогда

$$\oint H_x \cos \alpha dL = H_x \oint dL = H_x L_x = IW.$$

Отсюда

$$H_x = \frac{IW}{L_x} = \frac{IW}{2\pi \cdot r_x},$$

где  $L_x$  – длина контура, вдоль которого велось интегрирование;  $r_x$  – радиус окружности.

Вектор  $\vec{H}$  внутри кольца зависит от расстояния  $r_x$ . Если  $a$  – ширина кольца  $\ll d$ , то эта разница между значениями  $H$  в пределах сердечника не велика. При этом в расчет допустимо принять для всего поперечного сечения магнитопровода одно значение напряженности магнитного поля:

$$H_{cp} = IW / L,$$

где  $L$  – длина средней магнитной линии.

### **Закон Ома для магнитной цепи. Линейные и нелинейные магнитные сопротивления**

В кольцевом магнитопроводе с равномерной обмоткой все поле концентрируется внутри кольца.

Определим в этом случае магнитный поток в магнитопроводе с распределенной обмоткой.

Исходя из соотношений  $\Phi = B_{cp} S$  и  $B_{cp} = m_a H_{cp}$ , получим

$$\Phi = B_{cp} S = m_a H_{cp} S.$$

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a \cdot S}} = \frac{F}{R_m};$$

Магнитный поток  $\Phi$  зависит от произведения  $IW = F$ , которое получило название магнитодвижущей силы (МДС).

Величину  $L / (m_a S) = R_m$  – принято назвать магнитным сопротивлением магнитопровода (по аналогии с электрическим сопротивлением  $r = L / \gamma S$ ).

Магнитное сопротивление воздуха (зазоров) линейное, т.к.  $m_a = m_0 = \text{const}$ . Магнитное сопротивление сердечника нелинейно –  $m_a$  зависит от  $B$ .

Если намагничивающую силу  $F$  уподобить действию ЭДС, будет получено соотношение, похожее на выражение закона Ома для цепи постоянного тока. В связи с этим формулу

$$\Phi = \mu_a S \frac{IW}{L} = \frac{IW}{\frac{L}{\mu_a \cdot S}} = \frac{F}{R_m}$$

принято назвать законом Ома для магнитной цепи. Следует оговориться, что эта аналогия – формальная, а физическая сущность процессов в электрических и магнитных цепях различна.

**Задача №1.** Магнитный поток через катушку, состоящую из  $N=75$  витков,  $\Phi = 4,8 \cdot 10^{-3}$  Вб. За сколько времени должен исчезнуть этот поток, чтобы в катушке возникла средняя ЭДС индукции  $E_i = 0,75$  В?

Решение. 
$$E_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = N \frac{\Phi}{\Delta t} = \frac{F}{R_m}.$$

Отсюда:

$$\Delta t = \frac{N\Phi}{E_i}; \Delta t = 48 \text{ с.}$$

**Задача №2.**

В вертикальном магнитном поле движется под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту со скоростью  $v = 20$  м/с прямолинейный проводник длиной  $l = 8$  м. Угол между продольной осью проводника к горизонтальной составляющей его скорости  $\beta = 60^\circ$ . При этом в проводнике возбуждается ЭДС индукции  $E_{\text{инд}} = 2$  кВ. Найти индукцию магнитного поля, а также работу, которую совершают силы магнитного поля за одну минуту, если сопротивление движущегося проводника  $R = 10$  Ом.

Решение:

а) ЭДС индукции

$$E_i = Bl_o v \cdot \sin \alpha;$$

где  $l_o = lv \cdot \sin \beta$  – проекция проводника на направление магнитного поля

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha; ; \sin \varphi = \cos \alpha.$$

Следовательно,  $E_i = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \beta \cos \alpha$ ; . Отсюда:

$$B = \frac{E_i}{l \cdot v \cdot \sin \beta \cos \alpha};$$

б) работа сил магнитного поля определяется потерей энергии в проводнике:

$$A = \frac{E_i^2 \cdot t}{R};$$

$$A = 24 \text{ МДж.}$$

## 5 АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАТОРА

### Общие сведения

В зависимости от величины сопротивления нагрузки трансформатор может работать в трех режимах:

1. Холостой ход при сопротивлении нагрузки  $z_n = \infty$ .
2. Короткое замыкание при  $z_n = 0$ .
3. Нагрузочный режим при  $0 < z_n < \infty$ .

Имея параметры схемы замещения, можно анализировать любой **режим работы трансформатора**. Сами параметры определяют на основе опытов холостого хода и короткого замыкания. При холостом ходе вторичная обмотка трансформатора является разомкнутой.

**Опыт холостого хода трансформатора** проводят для определения коэффициента трансформации, мощности потерь в стали и параметров намагничивающей ветви схемы замещения, проводят его обычно при номинальном напряжении первичной обмотки.

В некоторых случаях опыт холостого хода проводят для нескольких значений напряжения первичной обмотки: от  $U_1 \approx 0,3U_{1н}$  до  $U_1 \approx 1,1U_{1н}$ . По полученным данным строят характеристики холостого хода, которые представляют собой зависимость  $P_0$ ,  $z_0$ ,  $r_0$  и  $\cos\phi$  в функции от напряжения  $U_1$ . Пользуясь характеристиками холостого хода, можно установить значения определяемых величин при любом значении напряжения  $U_1$ .

Для определения напряжения короткого замыкания, потерь в обмотках и сопротивлений  $r_k$  и  $x_k$  проводят **опыт короткого замыкания**. При этом к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение, чтобы токи обмоток короткозамкнутого трансформатора были равны своим номинальным величинам, т.е.  $I_{1к} = I_{1н}$ ,  $I_{2к} = I_{2н}$ . Напряжение на первичной обмотке, при котором отмеченные условия выполняются, называется номинальным напряжением короткого замыкания  $U_{кн}$ .

Учитывая, что  $U_{кн}$  обычно составляет всего 5–10% от  $U_{1н}$ , поток взаимной индукции сердечника трансформатора при опыте короткого замыкания в десятки раз меньше, чем в номинальном режиме, и сталь трансформатора ненасыщенна. Поэтому потерями в стали пренебрегают и считают, что вся подводимая к первичной обмотке мощность  $P_{кн}$  расходуется на нагрев обмоток и определяет величину активного сопротивления короткого замыкания  $r_k$ .

Во время проведения опыта измеряют напряжение  $U_{кн}$ , ток  $I_{1к} = I_{1н}$  и мощность  $P_{кн}$  первичной обмотки.

В **нагрузочном режиме** очень важно знать, как влияют параметры нагрузки на КПД и изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки.

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение активной мощности, передаваемой нагрузке, к активной мощности, подводимой к трансформатору.

КПД трансформатора имеет высокое значение. У силовых трансформаторов небольшой мощности он составляет примерно 0,95, а у трансформаторов мощностью в несколько десятков тысяч киловольт-ампер доходит до 0,995.

Определение КПД по формуле с использованием непосредственно измеренных мощностей  $P_1$  и  $P_2$  даёт большую погрешность. Удобнее эту формулу представить в другом виде:

$$\eta = \frac{P_2}{(P_2 + \sum \Delta P)},$$

где  $\Delta P$  – сумма потерь в трансформаторе.

В трансформаторе имеются два вида потерь: магнитные потери, вызванные прохождением магнитного потока по магнитопроводу, и электрические потери, возникающие при протекании тока по обмоткам.

Так как магнитный поток трансформатора при  $U_1 = const$  и изменении вторичного тока от нуля до номинального практически остаётся постоянным, то и магнитные потери в этом диапазоне нагрузок также можно принять постоянными и равными потерям холостого хода.

Электрические потери в меди обмоток  $\Delta P_m$  пропорциональны квадрату тока.

### Задача №1

Однофазный автотрансформатор с первичным напряжением  $U_1 = 220 \cdot B$ , вторичным напряжением  $U_2 = 127 \cdot B$  имеет в первичной обмотке  $\omega_1 = 254$  витка. При полной активной нагрузке даёт потребителю ток  $I_2 = 9A$ . Определить число витков вторичной обмотки  $\omega_2$ , пренебрегая током холостого хода. Определить ток в первичной обмотке  $I_1$ , на общем участке обмотки  $I_2$ , сечение проводников  $S_2$ , на общем участке обмотки, сечение проводников  $S_1$ , на участке, где проходит только первичный ток, мощность, передаваемую электрическим путем, и коэффициент выгодности автотрансформатора, если плотность тока  $J = 2 A/mm^2$ .

Решение.

Ввиду незначительного тока холостого хода можно считать, что наведенная ЭДС в первичной обмотке равна подводимому напряжению, напряжение вторичной обмотки равно наведенной ЭДС вторичной обмотки. Тогда коэффициент трансформации

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{127} = 1,73.$$

Число витков вторичной обмотки

$$\omega = \frac{\omega_1}{n} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{254}{1,73} = 147.$$

Пренебрегая потерями, можно считать

$$I_1 U_1 = I_2 \cdot U_2.$$

Отсюда ток в первичной обмотке

$$I_1 = \frac{I_2}{n} = \frac{9}{1,73} = 5,2 \text{ A};$$

на общем участке:

$$I_{\text{общ}} = I_2 - I_1 = 9 - 5,2 = 3,8 \cdot \text{A}.$$

Сечения проводников:

– в первичной цепи

$$S_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{5,2}{2} = 2,6 \cdot \text{мм}^2;$$

– на общем участке

$$S_2 = \frac{I_{\text{общ}}}{J} = \frac{3,8}{2} = 1,9 \cdot \text{мм}^2.$$

Проходная мощность

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{э}} + S_{\text{эм}} = \frac{U_2}{I_2} = 127 \cdot 9 = 1143 \cdot \text{Вт}.$$

Мощности:

– передаваемая во вторичную цепь магнитной связью

$$S_{\text{эм}} = S_{\text{пр}} \left(1 - \frac{1}{n}\right) = 1143 \left(1 - \frac{1}{1,73}\right) = 483 \cdot \text{Вт};$$

– передаваемая электрическим путем

$$S_{\text{э}} = S_{\text{пр}} - S_{\text{эм}} = 1143 - 483 = 660 \cdot \text{Вт}.$$

## **6 ВЫБОР АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ИЗВЕСТНОМУ РЕЖИМУ НАГРУЗКИ, РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ЕГО МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

### **Общие требования**

Перед выполнением задания необходимо повторить следующие разделы дисциплины «Трёхфазные электрические цепи» и «Трёхфазные асинхронные электрические двигатели»:

– устройство, принцип действия, режимы работы, электромагнитный вращающий момент, активная и реактивная мощности, к.п.д. и коэффициент мощности, механическая характеристика асинхронного двигателя;

– нагрузочная диаграмма, расчет мощности и выбор двигателя.

При повторении рекомендуется использовать лекционный материал и литературу [2, 3, 4].

#### Содержание задания

Для заданного в таблице 6.1 режима нагрузки производственного механизма выполнить следующее:

- построить нагрузочную диаграмму  $P = f(t)$ ;
- определить мощность асинхронного двигателя, приводящего в действие заданный механизм;
- произвести выбор мощности и типа двигателя;
- произвести расчет и построить естественную механическую характеристику выбранного двигателя, используя каталожные данные для заданного двигателя;
- по полученным расчетным данным проанализировать возможность работы выбранного двигателя для заданного режима нагрузки.

Одним из режимов работы асинхронного двигателя является повторно-кратковременный, при котором нагрузка двигателя изменяется во времени с некоторым периодом  $t_u$  – периодом цикла. Пример такого режима показан на рисунке 6.1.

Если двигатель работает в повторно-кратковременном режиме, то его выбирают с номинальной мощностью, равной или большей эквивалентной мощности, определяемой по формуле:

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}},$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – мощности нагрузки за соответствующие рабочие интервалы времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $P_э$  – эквивалентная мощность двигателя.

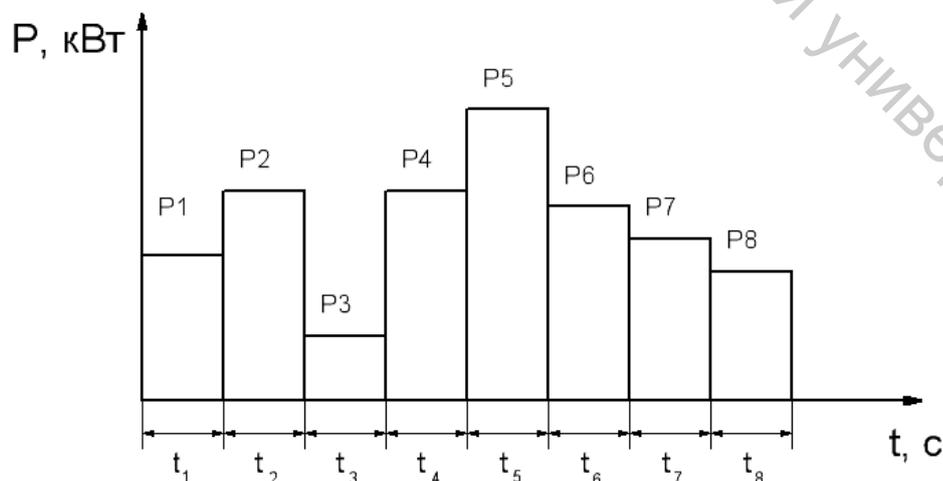


Рисунок 6.1 – Схема режима работы асинхронного двигателя

Основной характеристикой повторно-кратковременного режима является относительная продолжительность включения ( $ПВ$ )

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{T_u} \cdot 100\%.$$

Для двигателей повторно-кратковременного режима приняты стандартные значения  $ПВ_{см} = 15, 25, 40$  и  $60\%$ . Если расчетное значение  $ПВ$ , определенное по нагрузочной диаграмме, отличается от  $ПВ_{см}$ , то эквивалентная мощность  $P'_э$  двигателя определяется следующим выражением:

$$P'_э = P_э \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{см}}}.$$

По полученному значению  $P'_э$  выбираем двигатель с номинальной мощностью  $P_{ном} \geq P'_э$  [4].

Таблица 6.1 – Таблица нагрузок

№ варианта	t, с								P, кВт							
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>	P <sub>7</sub>	P <sub>8</sub>
1	5	25	20	15	20	30	8	16	4	6	5	0	8	10	6	12
2	15	10	14	25	40	5	15	10	12	8	4	10	0	15	12	8
3	12	6	18	25	15	10	30	20	8	4	3	10	25	12	6	14
4	10	12	18	20	16	24	30	25	6	12	0	10	15	0	8	16
5	8	12	15	6	25	20	10	35	3	2	1.5	3	0	5	4	8
6	15	5	10	16	20	12	8	15	10	8	14	0	16	9	7	10
7	10	15	10	8	20	25	10	25	15	0	20	16	12	18	22	20
8	12	18	9	10	15	20	15	5	5	10	8	7	4	10	12	20
9	18	12	6	15	25	16	8	15	7	12	0	16	15	20	8	16
10	14	26	16	20	30	12	25	14	12	8	14	16	6	10	9	12
11	6	10	8	4	12	18	20	15	14	10	15	0	15	25	18	12
12	5	15	20	15	25	10	15	20	8	10	16	12	15	0	14	6
13	20	10	15	20	15	8	14	16	4	8	6	0	10	12	15	5
14	15	18	12	22	25	16	8	14	10	8	12	25	4	6	0	12
15	25	15	8	12	16	18	10	20	6	3	1	0	8	4	0	7
16	3	6	8	5	4	3	7	10	2	1	3	1	4	6	2	5
17	18	14	8	15	10	14	20	25	5	12	14	15	8	0	17	9
18	10	25	14	16	20	12	30	18	20	10	15	14	18	0	12	8
19	25	10	15	18	30	35	15	5	12	16	8	0	10	20	15	16
20	18	22	14	16	32	16	20	25	7	12	14	0	8	10	0	5
21	20	18	10	15	25	30	12	20	5	8	10	12	18	14	9	5
22	8	12	14	10	18	22	6	7	3	6	0	4	0	9	2	8
23	16	25	30	30	18	35	22	14	6	12	0	8	9	16	6	4
24	20	12	25	17	25	10	15	18	10	4	12	8	0	16	0	14
25	25	10	15	20	25	5	15	20	8	10	6	4	12	10	16	20
26	10	8	5	12	16	20	20	15	4	6	10	0	12	8	2	9
27	15	20	10	25	12	22	30	15	12	10	0	18	20	14	16	12
28	20	15	10	25	15	20	15	30	16	20	12	8	14	0	15	16

Для выбранного двигателя выписывают каталожные данные, необходимые для расчета механической характеристики  $P_{ном}$ ,  $n_{ном}$ ,  $\lambda$ ,  $\delta$

$$\lambda = \frac{M_k}{M_{ном}};$$
$$\delta = \frac{M_n}{M_{ном}},$$

где  $M_{ном}$  – номинальный вращающий момент двигателя;  $M_k$  – критический (максимальный) вращающий момент;  $M_n$  – пусковой момент.

Номинальный момент определяется

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}} (Н \cdot м),$$

где  $P_{ном}$  – номинальная мощность двигателя (кВт);  $n_{ном}$  – номинальная частота вращения ротора (об/мин), соответствует каталожным данным выбранного двигателя.

Для расчета механической характеристики можно воспользоваться формулой Клосса

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_k + S}{S} + \frac{S}{S_k}},$$

где  $S_k$  – критическое скольжение, соответствующее критическому моменту;  $S$  – скольжение.

Подставляя в вышеприведенное выражение значение  $S = S_{ном}$ , получаем выражение для определения

$$S_k = S_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

где  $S_{ном}$  – номинальное скольжение, определяемое соотношением.

$$S_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0},$$

где  $n_0$  – частота вращения магнитного поля статора, выбирается из таблицы 6.2 как ближайшее к  $n_{ном}$  стандартное значение.

Таблица 6.2 – Синхронные частоты вращения двигателя

$n_0$ , об/мин	3000	1500	1000	750
----------------	------	------	------	-----

Определив  $M_k$  и  $S_k$  и задаваясь значениями  $S$  в пределах от 0 до 1, получаем расчетные данные для построения механической характеристики, которые заносят в таблицу.

Если в каталожных данных приведена величина  $S_{ном}$ , то

$$n_{ном} = n_0(1 - S_{ном}).$$

По полученным расчетным данным сделать вывод о возможности работы выбранного двигателя в указанном режиме нагрузки.

## 7 АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С МАШИНАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Общие требования

Перед выполнением задания необходимо повторить следующие вопросы из раздела «Машины постоянного тока»:

- устройство, принцип действия, режимы работы, электромагнитный момент, способы возбуждения, пуск, механические характеристики двигателя постоянного тока;
- назначение пускового реостата;
- схемы включения двигателя постоянного тока.

При повторении рекомендуется использовать лекционный материал и литературу [1, 2, 3].

При включении двигателя в сеть с напряжением  $U$  ток якоря  $I_я$  в момент пуска, определяемый выражением  $I_я = U/R_я$ , во много раз превышает номинальный ток  $I_{я ном}$ .

Чтобы предохранить двигатель от чрезмерно большого пускового тока, опасного для целостности обмотки якоря и коллектора, последовательно с якорем включают пусковой реостат сопротивлением  $R_n$  (рис. 7.1).

Благодаря этому ток якоря в момент пуска равен

$$I_{ян} = \frac{U}{R_я + R_n}.$$

При расчете величину пускового тока принимают равной  $2I_{я ном}$ . По мере разгона двигателя надобность в пусковом реостате отпадает и пусковой реостат постепенно выводится из цепи якоря. При достижении двигателем номинальной частоты вращения пусковой реостат целиком выключается. Для

определения сопротивления пускового реостата и его ступеней используем каталожные данные двигателя  $P_n, U_n, I_{я ном}, n_n, m, R_я$ .

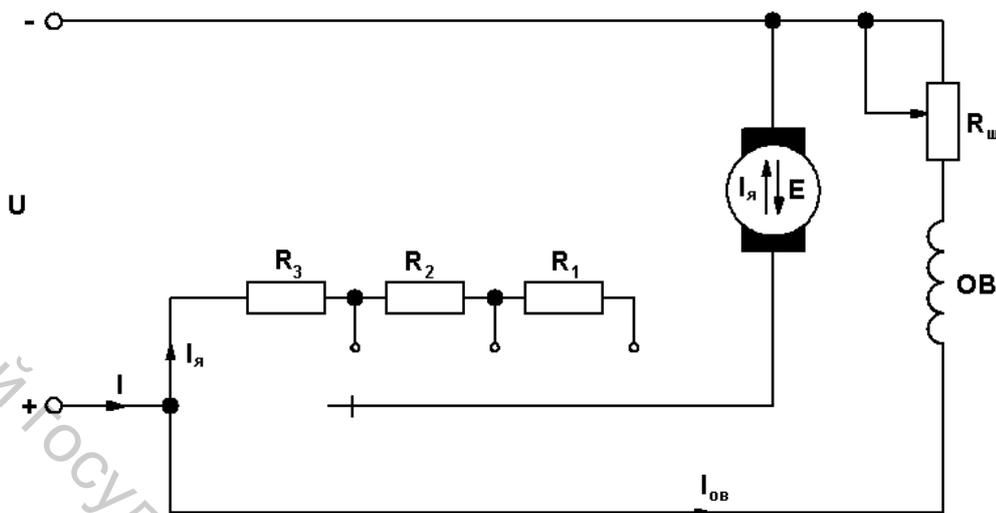


Рисунок 7.1 – Схема пуска двигателя постоянного тока

Так как

$$\frac{n_0}{n_n} = \frac{U_n}{U_n - I_{я ном} R_я},$$

то

$$n_0 = n_n \frac{U_n}{U_n - I_{я ном} R_я}$$

и естественная механическая характеристика может быть построена по двум точкам  $[I = I_n; n = n_n]$  и  $[I = 0; n = n_0]$ .

На рисунке 7.2 естественная механическая характеристика представлена прямой «рк».

Пределы изменения пускового тока  $I_{max}$  и  $I_{min}$  обычно принимают равными

$$I_{max} = (1,8 \div 2,5) I_n;$$

$$I_{min} = I_{max} \sqrt[3]{\frac{R_я}{R_я + R_n}}.$$

Первая механическая пусковая характеристика «рқ», соответствующая полному сопротивлению  $R_я + R_n$ , строится по точкам  $[n = n_0; I = 0]$  и  $[n = 0; I = I_{max}]$ .

Для построения следующих механических пусковых характеристик из точек «f» и «q», соответствующих  $I_{min}$  и  $I_{max}$ , проводим прямые «fa» и «qh», параллельные оси ординат.

Вторую механическую пусковую характеристику «рп» строим по точкам  $[n = n_0; I = 0]$  и  $[n = n_1; I = I_{max}]$ .

Точка  $n = n_1$  находится перенесением отрезка «eh» и «qm».

Аналогично находят третью механическую пусковую характеристику «рл». Отрезок «рк» определяет точку к естественной механической характеристики, на которую электродвигатель выходит после выведения последней ступени пускового реостата.

Если в результате построений точка к окажется правее или левее прямой «qh», то графическое построение необходимо провести повторно, изменив выбранное значение  $I_{min}$

$$I_{min} = (1,1 \div 1,25)I_n.$$

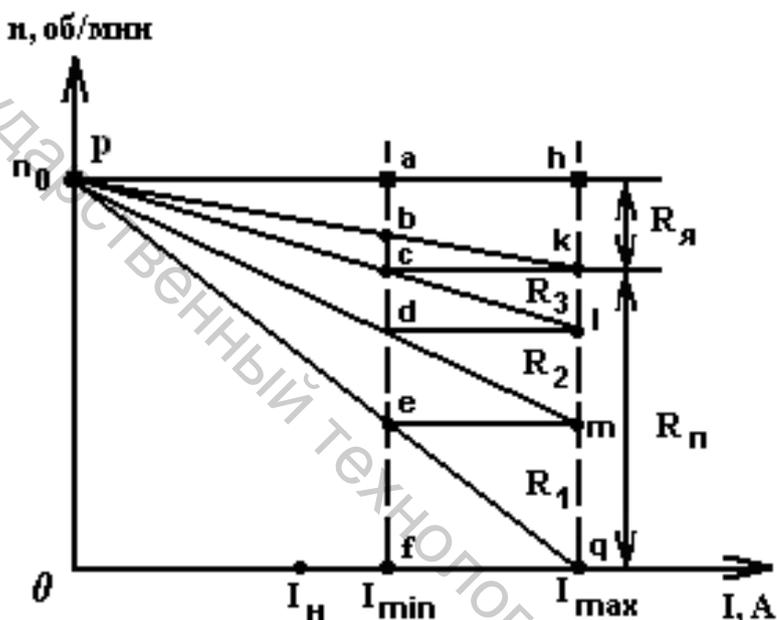


Рисунок 7.2 – Расчет пускового реостата

### Пример расчета

Пуск двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением осуществляется при помощи пускового реостата (число ступеней  $m = 3$ ). Рассчитать сопротивление пускового реостата и его ступеней при условии, что  $I_{max} = 2I_n$ .

Данные двигателя:  $P_n = 15$  кВт;  $U_n = 220$  В;  $I_{я ном} = 83$  А;  $n_n = 770$  об/мин;  $m = 3$ ;  $R_я = 0,238$  Ом.

Частота вращения якоря двигателя при холостом ходе

$$n_0 = n_n \frac{U_n}{U_n - I_{я ном} R_я} = 770 \frac{220}{220 - 83 \cdot 0,238} = 847 \text{ об / мин.}$$

Наибольшее значение пускового тока

$$I_{\max} = 2I_n = 2 \cdot 83 = 166 \text{ A}.$$

Полное сопротивление якорной цепи

$$R_y + R_n = \frac{U_n}{I_{\max}} = \frac{220}{166} = 1,325 \text{ Ом}.$$

Наименьшее значение пускового тока

$$I_{\min} = I_{\max} \sqrt[3]{\frac{R_y}{R_y + R_n}} = 166 \sqrt[3]{\frac{0,238}{1,325}} = 94 \text{ A}.$$

Используя изложенный способ построения механических пусковых характеристик, определяем сопротивление пускового реостата и его ступеней.

Масштаб сопротивлений

$$M_y = \frac{R_y}{ab} = \frac{0,238}{6} = 0,0264 \text{ Ом/мм}.$$

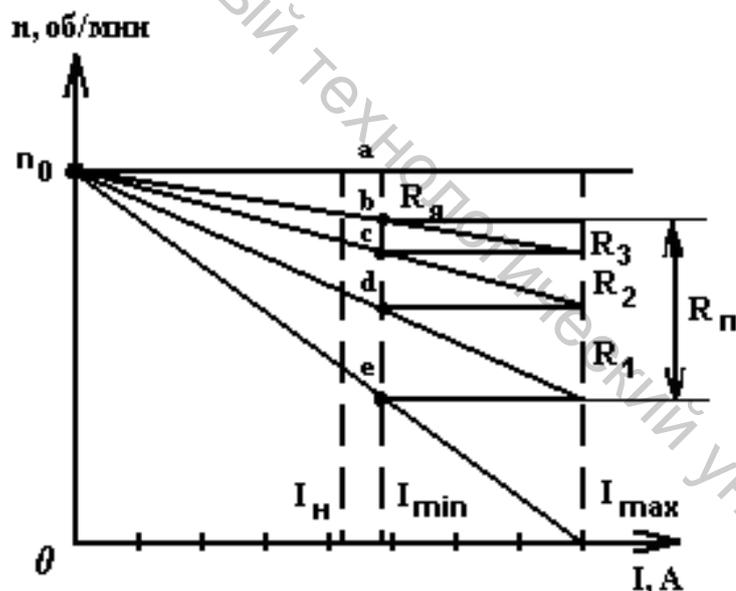


Рисунок 7.3 – Механические пусковые характеристики, определяемые сопротивлением пускового реостата и его ступеней

Сопротивления отдельных ступеней реостата (рис. 7.3) равны

$$R_1 = 0,0264 \cdot de = 0,0264 \cdot 21 = 0,55 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 0,0264 \cdot cd = 0,0264 \cdot 12 = 0,32 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 0,0264 \cdot bc = 0,0264 \cdot 6 = 0,16 \text{ Ом}.$$

## Общее сопротивление реостата

$$R_n = R_1 + R_2 + R_3 = 0,0264 \cdot be = 0,55 + 0,32 + 0,16 = 0,0264 \cdot 39 = 1,03 \text{ Ом} .$$

Таблица 7.1 – Данные для выполнения работы

№ варианта	Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное число оборотов, об/мин	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	КПД	Число ступеней пускового реостата	Примечания
1	П-11	0,7	3000	220	4,3	3,5	3	$R_{\text{я}} = 0,005(100 - \eta_{\text{я}}) \frac{U_{\text{я}}}{I_{\text{я ном}}}$ <p>Для определения сопротивления якорной цепи <math>R_{\text{я}}</math> воспользоваться выражением:</p>
2	П-12	1,0	3000	220	5,9	7,0	3	
3	П-21	1,5	3000	220	9,0	6,0	3	
4	П-22	2,2	3000	220	12,5	0,0	4	
5	П-31	3,2	3000	220	17,5	3,0	4	
6	П-32	4,5	3000	110	48,5	4,0	3	
7	П-41	6,0	3000	110	68,5	2,0	3	
8	П-42	8,0	3000	110	87,0	3,5	4	
9	П-51	11,0	3000	220	59,0	4,5	3	
10	П-52	14,0	3000	220	74,0	6,0	4	
11	П-11	0,3	1500	110	4,3	3,5	3	
12	П-12	0,45	1500	110	5,8	0,0	4	
13	П-21	0,7	1500	110	8,5	5,0	3	
14	П-22	1,0	1500	110	12,0	6,0	4	
15	П-31	1,5	1500	110	17,4	8,5	3	
16	П-32	2,2	1500	220	12,0	3,5	4	
17	П-41	3,2	1500	220	18,4	9,0	3	
18	П-42	4,5	1500	220	24,5	0,5	4	
19	П-51	6	1500	220	33	2,5	3	
20	П-52	8	1500	220	43	4,5	4	
21	П-11	0,13	1000	110	2,0	9	3	
22	П-12	0,2	1000	110	2,75	6	4	
23	П-21	0,3	1000	110	3,8	1,5	3	
24	П-22	0,45	1000	110	5,5	3,5	4	
25	П-31	0,7	1000	110	8,6	4	3	
26	П-32	1,0	1000	110	11,5	9,5	4	
27	П-41	0,2	750	220	1,35	7,5	3	
28	П-42	0,3	750	220	1,95	9,5	4	
29	П-51	0,45	750	220	2,9	1	3	
30	П-52	0,7	750	220	4,2	6	4	

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбков, И. С. Электротехника / И. С. Рыбков. – М.: РИОР, 2013. – 160 с. – 1 экз.
2. Кононенко, В. В. Электротехника и электроника: учебное пособие для вузов / В. В. Кононенко [и др.]; под ред. В. В. Кононенко. – 4-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. – 778 с. – 1 экз.
3. Касаткин, А. С. Курс электротехники: учебник для студентов неэлектротехнических спец. вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 9-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2007. – 542 с. – 14 экз.
4. Рыжков, Г. П. Электрические цепи постоянного тока: методические указания к лабораторным работам по электротехнике / Г. П. Рыжков [и др.]. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – 47 с. – 33 экз.
5. Кітуновіч, Ф. Р. Электратэхніка: падручнік / Ф. Р. Кітуновіч. – Мн.: Выш. шк., 1997. – 391 с.: іл. – 2 экз.
6. Электротехника / под ред. В. С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1976. – 150 экз.
7. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М.: Высшая школа, 2000, 2005, 2003, 2007. – 542 с. – 7 экз.
8. Морозов, А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. – М.: Высшая школа, 1987. – 130 экз.
9. Рекус, Г. Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус, А. И. Белоусов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2001. – 416 с.: ил. – 3 экз.
10. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 117 экз.
10. Кононенко, В. В. Электротехника и электроника: учебное пособие для вузов / В. В. Кононенко [и др.]; под ред. В. В. Кононенко. – 3-е изд., испр. и доп. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 784 с. – 1 экз.
11. Немцов, М. В. Электротехника и электроника: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки и спец. в области техники и технологии / М. В. Немцов. – Москва: Высшая школа, 2007. – 560 с. – 4 экз.
12. Ильющенко, А. В. Электрические цепи: методические указания к лабораторным работам по электротехнике / А. В. Ильющенко, В. Ф. Куксевич. – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 35 с. – 100 экз.
13. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2007. – 701 с.
14. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1990. – 528 с.
15. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Учебное издание

## Теоретические основы электротехники

Методические указания к практическим занятиям

Составители:

Новиков Юрий Васильевич  
Куксевич Виталий Федорович

Редактор *Т.А. Осипова*

Корректор *Т.А. Осипова*

Компьютерная верстка *Ю.В. Новиков*

---

Подписано к печати 14.12.2020. Формат 60x90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. листов 2,8.

Уч.-изд. листов 3,4. Тираж 35 экз. Заказ № 341.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»  
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.