

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«КОЛЛЕДЖ КУЛЬТУРЫ И СПОРТА»

ПРАКТИКУМ

ОП.03 Электротехника

Специальность: 08.02.02 Строительство и эксплуатация
инженерных сооружений

Москва, 2024

Содержание

№	Название практического занятия или лабораторной работы	стр.
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ		4
Тема 1.1. Электрические цепи постоянного тока		4
1	Лабораторная работа №1. Определение сопротивления провода.	4
Тема 1.2. Однофазные электрические цепи переменного тока		6
1	Лабораторная работа №2. Параметры разветвленной или неразветвленной цепи переменного тока.	6
Тема 1.3. Трехфазные электрические цепи		15
1	Лабораторная работа №3. Мощности в трехфазной цепи при соединении приемников «звездой» или «треугольником».	15
Тема 1.4. Электрические измерения		24
1	Лабораторная работа №4. Измерение мощности и энергии в цепях переменного тока	24
РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ		27
Тема 2.1. Трансформаторы		27
1	Лабораторная работа №5. Выбор типа трансформатора на строительной площадке.	27
Тема 2.2. Электрические машины постоянного тока		36
1	Лабораторная работа №6. Рабочие характеристики двигателей постоянного тока.	36
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ		39
Тема 3.1. Электрические сети и освещение строительных площадок		39
1	Лабораторная работа №7. Расчет освещенности строительных площадок.	39
Тема 3.3. Электрооборудование строительных кранов и подъемников		43
1	Лабораторная работа №8. Определение электробезопасной зоны крана. Защитное заземление.	43
Тема 3.4. Электропрогрев бетона и грунта		46
1	Лабораторная работа №9. Выбор метода прогрева бетона (грунта, трубопровода и т.д.) определенного объема.	46
РАЗДЕЛ 4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ		50
Тема 4.1. Полупроводниковые приборы		50
1	Лабораторная работа №10. Снятие входных и выходных характеристик транзистора	50

РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
ТЕМА 1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.
ТЕМА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДА

Оборудование: источник постоянного тока, соединительные провода, проволока из материала с большим удельным сопротивлением, амперметр, вольтметр, штангенциркуль.

Цель работы: Опытным путем определить удельное сопротивление проводника.

Теоретическая часть.

Основная электрическая характеристика проводника – сопротивление. От этой величины зависит сила тока в проводнике при заданном напряжении. Сопротивление проводника представляет собой меру противодействия проводника установлению в нем электрического тока. С помощью закона Ома можно определить сопротивление проводника:

$$R = U/I$$

Для этого нужно измерить напряжение и силу тока.

Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрических размеров.

Сопротивление проводника длиной ℓ с постоянной площадью S равно: $R = \rho \ell / S$

Где ρ – величина, зависящая от рода вещества и его состояния (например, от температуры).

Величину ρ называют удельным сопротивлением проводника. Удельное сопротивление численно равно сопротивлению проводника, имеющего форму куба с ребром 1м, если ток направлен вдоль нормали к двум противоположным граням куба. Единицу сопротивления проводника устанавливают на основе закона Ома и называют его Ом. Проводник имеет сопротивление 1Ом, если при разности потенциалов 1В сила тока равна в нем 1А.

Единицей удельного сопротивления является 1Ом · м. Удельное сопротивление металлов мало. Диэлектрики обладают очень большим удельным сопротивлением. В таблице приведены примеры значений удельных сопротивлений некоторых проводников.

Вещество	Удельное сопротивление при температуре 20°C, 10 ⁻⁸ Ом·м
Серебро	1,6
Медь	1,7
Никелин	42
Нихромин	110
Свинец	21

Для выполнения работы необходима проволока из материала с большим удельным сопротивлением.

Удельное сопротивление проводника можно вычислить, используя формулы

$$R = \rho \ell / S, \quad S = \pi \cdot d^2 / 4,$$

Где d – диаметр проводника.

Сопротивление проводника можно измерить, используя закон Ома. В этом случае формула расчета удельного сопротивления будет иметь вид:

$$\rho = \pi \cdot R \cdot d^2 / 4 \cdot \ell \quad \text{или} \quad \rho = \pi \cdot U \cdot d^2 / 4 \cdot \ell$$

Практическая часть:

1. Подготовьте бланк отчета с таблицей для записи результатов измерений и вычислений.

U, В	I, А	ℓ , мм	d, мм	ρ , Ом · м

Таблица для записи абсолютных погрешностей:

$\Delta_u U$, В	$\Delta_o U$, В	ΔU , В	$\Delta_u I$, А	$\Delta_o I$, А	ΔI , А	$\Delta_u \ell$, мм	$\Delta_o \ell$, мм	$\Delta \ell$, мм	$\Delta_u d$, мм	$\Delta_o d$, мм	Δd , мм

Таблица для записи абсолютных погрешностей:

$\varepsilon_u, \%$	$\varepsilon_l, \%$	$\varepsilon_\rho, \%$	$\Delta\rho, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$

2. Соберите необходимую цепь, проверьте надежность контактов и правильность подключения измерительных приборов.
3. Измерьте длину проводника, его диаметр, силу тока в проводнике, напряжение на его концах. Результаты занесите в таблицу.
4. Вычислите приблизительное значение удельного сопротивления проводника и занесите в таблицу.
5. Определите инструментальные погрешности измерительных приборов и погрешности отсчета. Вычислите максимальные абсолютные и относительные погрешности измерений величин U, d, I, ℓ

$$\Delta A = \Delta_u A + \Delta_o A, \quad \begin{array}{l} \Delta_u A - \text{абсолютная инструментальная погрешность;} \\ \Delta_o A - \text{абсолютная погрешность отсчета;} \\ \Delta A - \text{максимальная абсолютная погрешность прямых измерений} \\ \varepsilon = \Delta A / A \end{array}$$

6. Вычислите максимальные относительную и абсолютную погрешности измерения удельного сопротивления проводника.

$$\begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \Delta U / U + 2\Delta d / d + \Delta I / I + \Delta \ell / \ell \\ \Delta\rho &= \rho \cdot \varepsilon_\rho \\ \rho &= \rho + \Delta\rho \end{aligned}$$

7. Определите по таблице материал проводника.
Запишите вывод.

Контрольные вопросы:

1. Определите площадь поперечного сечения, если длина медного проводника 1м, его сопротивление 0,4 Ом.
2. Определите площадь поперечного сечения и длину медного проводника, если его сопротивление 0,2 Ом, а масса 0,2 кг. Плотность меди 8900 кг/м³.

**ТЕМА 1.2. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.**

**ТЕМА: ПАРАМЕТРЫ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ИЛИ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Цель работы: Экспериментальное исследование соотношений для токов и напряжений простейших электрических цепей синусоидального тока с катушкой индуктивностью и конденсатором.

Краткие теоретические сведения

В цепи переменного тока при подаче напряжения $u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \psi_u)$ возникает ток $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \psi_i)$. В неразветвленной электрической цепи переменного тока, содержащей элементы с параметрами: активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C (рис. 1), напряжение питающей сети равно векторной сумме напряжений, действующих на участках цепи.

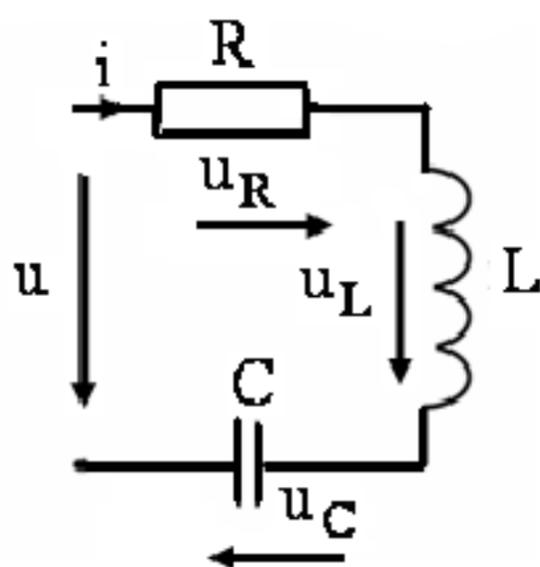


Рис. 1.

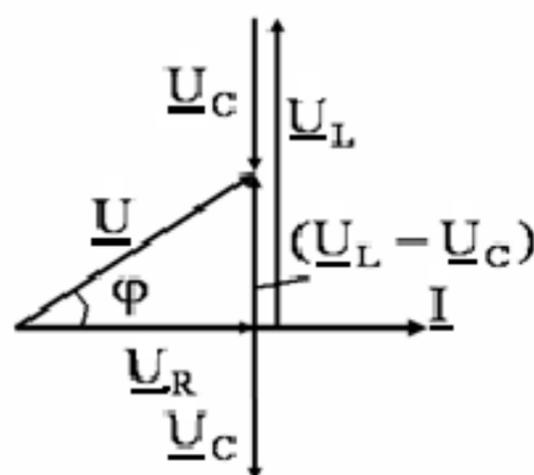


Рис. 2.

В соответствии с этим выражение для напряжения, подводимого к такой электрической цепи, может быть записано по второму закону Кирхгофа в комплексной форме

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C,$$

где $\underline{U}_R = RI$, $\underline{U}_L = jX_L I$, $\underline{U}_C = -jX_C I$ – комплексные напряжения на участках цепи, определяемые как произведения комплексного тока на соответствующие сопротивления; R , $X_L = \omega L$, $X_C = 1/\omega C$ – активное и реактивные индуктивное и емкостное сопротивления; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота напряжения.

По уравнению для комплексного напряжения на входе цепи можно построить векторную диаграмму тока и напряжений электрической цепи. Для этого следует помнить, что умножение вектора напряжения на множитель $(+j)$ соответствует повороту его относительно вектора тока на угол $\pi/2$ в направлении отсчета положительных углов (против часовой стрелки), а умножение на множитель $(-j)$ – соответственно повороту вектора напряжения на угол $\pi/2$ по часовой стрелке. Вектор напряжения \underline{U}_R на активном сопротивлении при этом совпадает с вектором тока \underline{I} . Угол φ – угол между векторами тока и напряжения, подводимого к цепи (откладывается от вектора тока к вектору напряжения). Векторная диаграмма для электрической цепи (рис. 1) представлена на рисунке 2.

Уравнение для подводимого к электрической цепи комплексного напряжения с учетом его составляющих преобразуется к виду

$$\underline{U} = R\underline{I} + jX_L\underline{I} - jX_C\underline{I} = [R + j(X_L - X_C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}$$

или к виду уравнения, записанного в комплексной форме по закону Ома для всей цепи:

$$\underline{I} = \underline{U}/\underline{Z},$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ – комплексное сопротивление электрической цепи переменного тока.

Модуль комплексного сопротивления (полное сопротивление) цепи переменного тока определяется уравнением

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

Из этого выражения следует, что полное сопротивление электрической цепи переменного тока зависит не только от параметров цепи, но и от частоты питающего напряжения, причем для линейной электрической цепи значения как полного сопротивления, так и его составляющих не зависят от подводимого напряжения.

Взаимосвязь между действующими значениями напряжения и полным сопротивлением цепи определяется соотношениями $U = ZI$ или $I = U/Z$.

Из треугольника напряжений (рис. 2) можно получить треугольник сопротивлений, разделив стороны этого треугольника на комплексный ток \underline{I} . Из треугольника сопротивлений следует, что

$$\cos \varphi = R/Z, \quad \sin \varphi = X/Z = (X_L - X_C)/Z.$$

Полученные выражения показывают, что угол сдвига фаз φ между током \underline{I} и напряжением \underline{U} питающей цепи зависит от характера сопротивлений, включенных в цепь переменного тока.

Умножив стороны треугольника сопротивлений на квадрат тока в цепи I^2 , получим треугольник мощностей. Из треугольника мощностей можно установить взаимосвязь между активной P , полной S и реактивной Q мощностями электрической цепи. Активная мощность цепи переменного тока $P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi$, откуда $\cos \varphi = P/S$. Реактивная составляющая полной мощности цепи находится как разность реактивной индуктивной $Q_L = I^2 X_L$ и реактивной емкостной $Q_C = I^2 X_C$ ее составляющих $Q = Q_L - Q_C$.

Выражение для полной мощности цепи переменного тока в комплексной форме записывают в следующем виде:

$$\tilde{S} = P + j(Q_L - Q_C) = P + jQ \quad \text{или} \quad \tilde{S} = S(\cos \varphi + j \sin \varphi),$$

где $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI$ – модуль полной мощности цепи переменного тока.

В электрических цепях переменного тока имеются также цепи с параллельным соединением потребителей электроэнергии, при котором все потребители находятся под одним и тем же напряжением. При этом на ток в цепи каждого из потребителей не влияет их количество. Значение тока в каждом из них определяется только значениями соответствующих сопротивлений и значением подводимого напряжения. Сопротивления в цепях переменного тока обычно носят комплексный характер. Пример электрической цепи переменного тока с параллельным соединением сопротивлений приведен на рисунке 3.

Рассматривая отдельные параллельные ветви этой цепи как независимые электрические цепи, для каждой из них можно построить векторную диаграмму (рис. 4). При этом вектор тока \underline{I}_1 отстает по фазе от вектора напряжения \underline{U} на угол φ_1 (активно – индуктивный

характер сопротивления ветви), а вектор тока \underline{I}_2 совпадает по фазе вектором напряжения \underline{U} (активный характер сопротивления ветви).

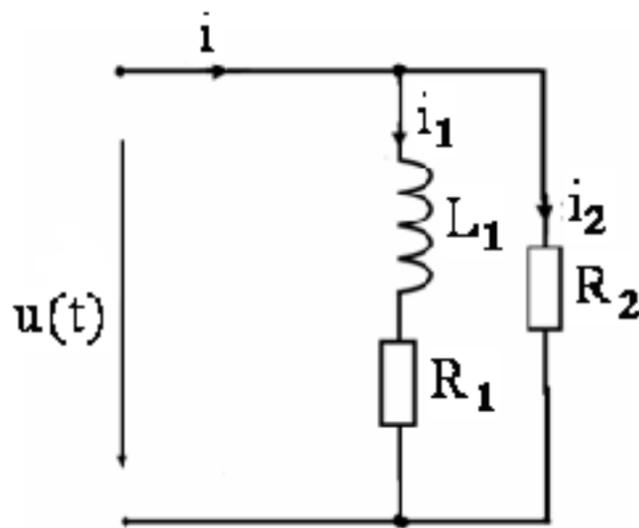


Рис. 3.

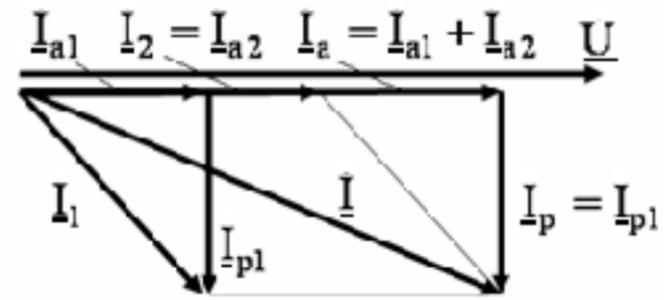


Рис. 4.

Ток \underline{I}_1 можно разложить на активную \underline{I}_{a1} и реактивную \underline{I}_{p1} составляющие. Учитывая, что $\cos \varphi_1 = R_1/Z_1$, $\sin \varphi_1 = X_{L1}/Z_1$ и $I_1 = U/Z_1$, из векторной диаграммы находим:

$$I_{a1} = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = UG_1,$$

где $G_1 = R_1/Z_1^2$ – активная проводимость первой ветви электрической цепи.

Реактивная составляющая тока \underline{I}_1 определяется из соотношения

$$I_{p1} = \frac{U}{Z_1} \frac{X_{L1}}{Z_1} = UB_1,$$

где $B_1 = \frac{X_1}{Z_1^2}$ – реактивная проводимость; $X_1 = X_{L1}$ – реактивное сопротивление

первой ветви.

По аналогичным соотношениям определяются активная и реактивная составляющие тока \underline{I}_2 ветви, а именно:

$$I_{a2} = \frac{U}{Z_2} \frac{R_2}{Z_2} = U \frac{R_2}{Z_2^2} = UG_2, \quad I_{p2} = \frac{U}{Z_2} \frac{X_2}{Z_2} = UB_2 = 0,$$

где $G_2 = R_2/Z_2^2$ и $B_2 = X_2/Z_2^2$ – соответственно активная и реактивная проводимость второй ветви (так как реактивное сопротивление второй ветви $X_2 = 0$, то реактивная проводимость $B_2 = 0$).

При этом токи в параллельных ветвях \underline{I}_1 и \underline{I}_2 будут:

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \frac{U}{Z_1} = U Y_1; \quad I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2} = \frac{U}{Z_2} = U Y_2,$$

где Y_1, Y_2 – модули полных проводимостей соответствующих параллельных ветвей.

Согласно первому закону Кирхгофа для точки разветвления (узла) электрической цепи с параллельным соединением сопротивлений, общий ток может быть представлен в виде векторной суммы:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2,$$

где \underline{I}_1 и \underline{I}_2 – комплексные токи в соответствующих параллельных ветвях электрической цепи.

Для рассматриваемой электрической цепи (рис. 3) можно получить выражение для общего тока \underline{I} . Определяя комплексные проводимости \underline{Y}_1 и \underline{Y}_2 параллельных ветвей через комплексные сопротивления

$$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1 = 1/(R_1 + jX_1) \text{ и } \underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = 1/R_2,$$

получим

$$\underline{I} = \underline{U} (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) = \underline{U} [(G_1 + G_2) + jB_1] = \underline{U}(G + jB).$$

Для произвольного числа параллельных ветвей активная проводимость электрической цепи G оказывается равной сумме активных проводимостей всех параллельных ветвей $G = \sum G_k$, а реактивная проводимость цепи равна алгебраической сумме реактивных проводимостей всех параллельных ветвей $B = \sum B_k$. Модуль полной проводимости цепи определяется из выражения

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

При этом полная проводимость цепи является также и величиной обратной ее полному сопротивлению $Y = 1/Z$. Разделив каждый вектор тока на векторной диаграмме (рис. 4) на вектор напряжения \underline{U} , можно получить треугольник проводимостей для данной цепи. В качестве примера на рис. 5 представлен треугольник проводимостей для первой ветви схемы (рис. 3). Из треугольника проводимостей следует, что $\cos \varphi_1 = G_1/Y_1$, а $\sin \varphi_1 = B_1/Y_1$. С учетом этого полная S_1 , активная P_1 и реактивная Q_1 мощности первой ветви электрической цепи могут быть определены через соответствующие проводимости

$$S_1 = U I_1 = U^2 Y_1, \quad P_1 = U I_1 \cos \varphi_1 = U^2 G_1, \quad Q_1 = U I_1 \sin \varphi_1 = U^2 B_1.$$

Полная S_2 , активная P_2 и реактивная Q_2 мощности второй ветви электрической цепи определяются выражениями

$$S_2 = U I_2 = U^2 Y_2 = P_2 = I_2^2 R_2, \quad Q_2 = 0.$$

Модуль полной мощности всей цепи при этом будет

$$S = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + Q_1^2} = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Описание лабораторного стенда и рабочее задание

1. Собрать схему, приведенную на рисунке 5. При сборке схемы использовать обмотку с индуктивностью $L_K = 1,1 \text{ Гн}$ сопротивлением обмоточного провода $R_K = 160 \text{ Ом}$, резистор с сопротивлением $R = 430 \text{ Ом}$. С зажимов вторичной

обмотки однофазного трансформатора подать на схему переменное синусоидальное напряжение промышленной частоты $f = 50 \text{ Гц}$.

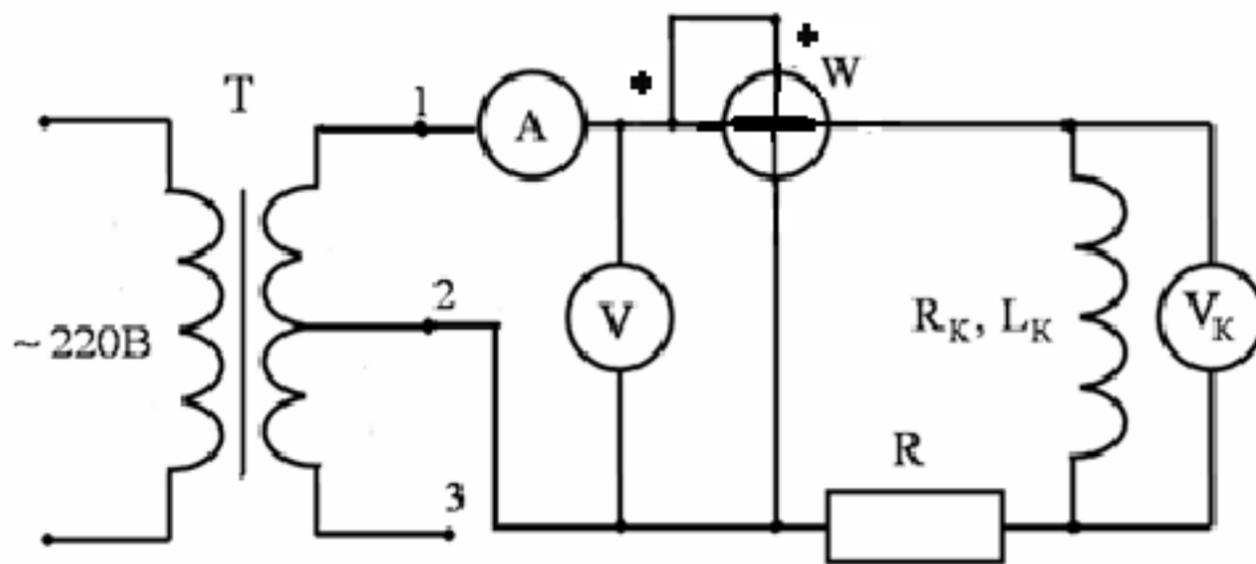


Рис. 5

2. В электрической цепи (рис. 5) произвести измерения электрических величин:

- действующие значения тока I , входного напряжения U и напряжения на катушке индуктивности U_K . Для измерения силы тока воспользоваться цифровым амперметром, а напряжения – цифровым вольтметром;
- активную мощность P , потребляемую цепью, то есть среднее значение мгновенной мощности за период входного напряжения с помощью цифрового ваттметра;
- угол сдвига фаз $\varphi' = \psi_{u_R} - \psi_u$ между напряжением на резисторе и входным напряжением, переключив ваттметр на фазометр. Угол φ' совпадает с углом сдвига фаз между током и напряжением источника питания $\varphi' = \psi_i - \psi_u$. Поскольку аргумент φ комплексного сопротивления Z собранной на стенде цепи определяется как сдвиг фаз между входным напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$, то угол сдвига фаз $\varphi = -\varphi'$.

Результаты измерений занести в графу «Опыт» таблицы 1.

3. Заполнить таблицу 1 пункта 2 рабочего задания, используя расчетные соотношения

$$Z_{\text{Э}} = \frac{U}{I}, \quad Z_K = \frac{P}{I^2}, \quad R_{\text{Э}} = R + R_K, \quad X_{\text{Э}} = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

$$U_{R_K} = I \cdot R_K, \quad U_{L_K} = I \cdot X_K, \quad Z_{\text{Э}} = \sqrt{R_{\text{Э}}^2 + X_{\text{Э}}^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{X_{\text{Э}}}{R_{\text{Э}}}\right)$$

$$S = U \cdot I, \quad Q = I^2 X_{\text{Э}}, \quad L_{\hat{e}} = \frac{X_{\hat{e}}}{\omega}, \quad \omega = 2\pi \cdot f.$$

Таблица 1

Опыт					Расчет			
U , В	I , мА	P , Вт	U_K , В	φ' , град.	U_{R_K} , В	U_{L_K} , В	Z_K , Ом	R_K , Ом

--	--	--	--	--	--	--	--	--

Окончание табл. 1

Расчет								
$X_K,$ <i>Ом</i>	$R_{\Sigma},$ <i>Ом</i>	$X_{\Sigma},$ <i>Ом</i>	$Z_{\Sigma},$ <i>Ом</i>	$\varphi,$ <i>град.</i>	$\cos \varphi$	$S,$ <i>ВА</i>	$Q,$ <i>вар</i>	$L_K,$ <i>Гн</i>

- По данным таблицы 1 пункта 3 рабочего задания построить в масштабе векторную диаграмму для электрической цепи (рис. 5).
- Собрать схему, приведенную на рисунке 6. При сборке схемы использовать конденсатор емкостью $C = 4 \text{ мкФ}$ и резистор с сопротивлением $R = 430 \text{ Ом}$.

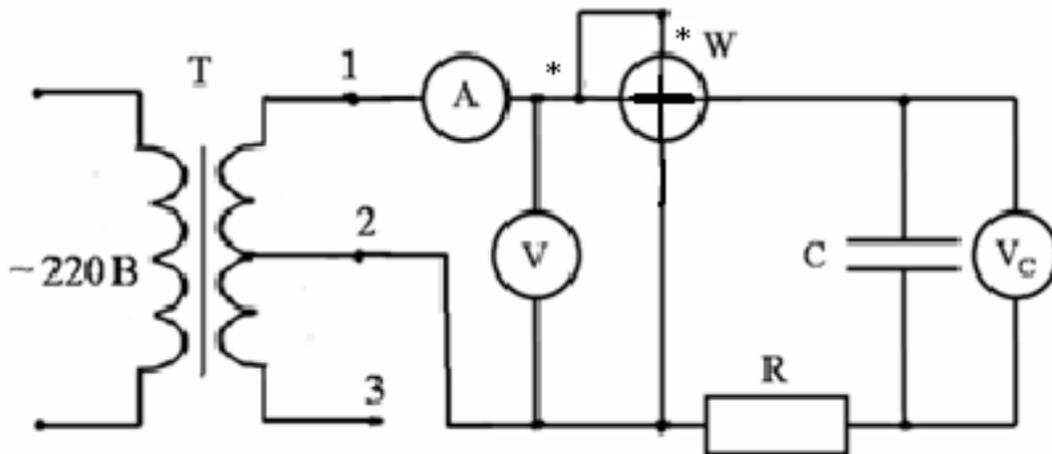


Рис. 6.

- В цепи, находящейся под напряжением, произвести измерения электрических величин, аналогично пункту 2 рабочего задания.

Таблица 2

Опыт					Расчет			
$U,$ <i>В</i>	$I,$ <i>мА</i>	$P,$ <i>Вт</i>	$U_{\Sigma},$ <i>В</i>	$\varphi',$ <i>град.</i>	$Z,$ <i>Ом</i>	$R,$ <i>Ом</i>	$\varphi,$ <i>град.</i>	$\cos \varphi$

Окончание табл. 2

Расчет								
$I_a,$ <i>мА</i>	$I_p,$ <i>мА</i>	$U_a,$ <i>В</i>	$U_p,$ <i>В</i>	$G,$ <i>Сим</i>	$B,$ <i>Сим</i>	$S,$ <i>ВА</i>	$Q,$ <i>вар</i>	$C,$ <i>мкФ</i>

- Результаты эксперимента занести в таблицу 2.
- Дополнить таблицу 2 расчетными данными, используя для определения активных и реактивных составляющих напряжений и токов соответственно в последовательной

(рис. 7) и параллельной (рис. 8) эквивалентных схемах замещения цепи (рис. 6) следующие соотношения:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad C = \frac{1}{X \cdot \omega},$$

$$I_a = U \cdot G, \quad I_p = U \cdot B, \quad G = \frac{R}{Z^2},$$

$$B = \frac{X}{Z^2}, \quad U_a = I \cdot R, \quad U_p = I \cdot X.$$

9. По данным таблицы 2 пункта 7 рабочего задания построить в масштабе векторную диаграмму для электрической цепи (рис. 6).

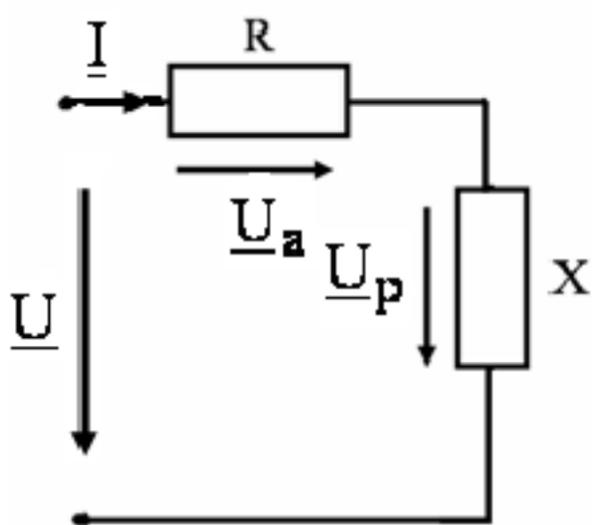


Рис. 7

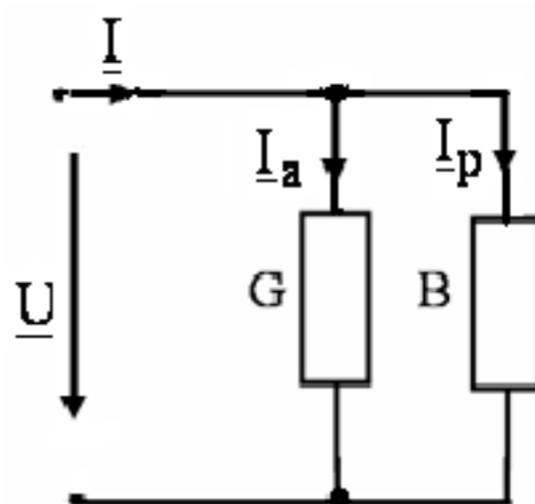


Рис. 8.

Вопросы к защите

1. Что такое емкостное, индуктивное и комплексное сопротивления?
2. Как зависят реактивные сопротивления конденсатора и катушки индуктивности от частоты? Нарисуйте графики этих зависимостей.
3. Нарисуйте треугольники сопротивлений для последовательных RL и RC электрических цепей.
4. Чему равны активная, реактивная, полная и комплексная мощности в идеальных индуктивных и емкостных элементах?
5. Для электрической цепи (рис. 9) записать комплексы тока \underline{I} , напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}_2 , если $X_C > X_L$ и $\underline{U}_3 = U_3 e^{j0^\circ}$.
6. Определить по заданному входному напряжению U напряжение U_{ab} в электрической цепи (рис. 10), если сопротивления участков $R = X_L = X_C$.

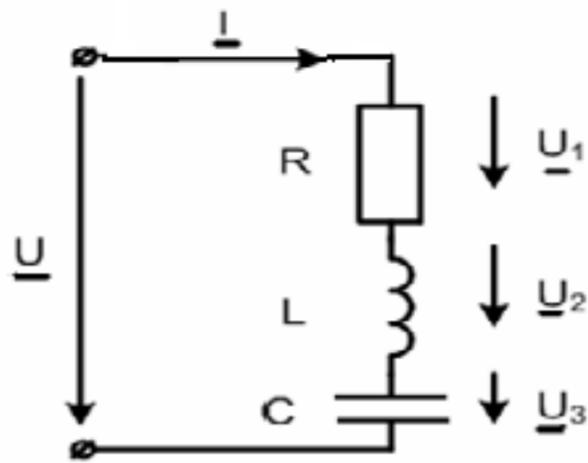


Рис. 9

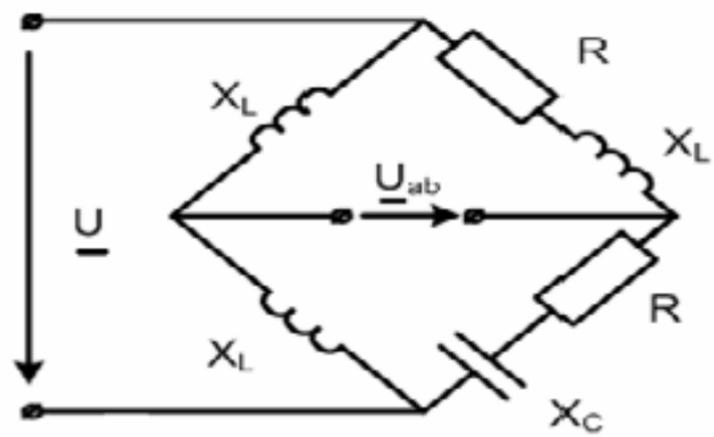


Рис. 10

7. По качественной временной диаграмме тока (рис. 11), проходящего через конденсатор, постройте качественные временные зависимости напряжения, мощности и энергии, запасенной в конденсаторе.

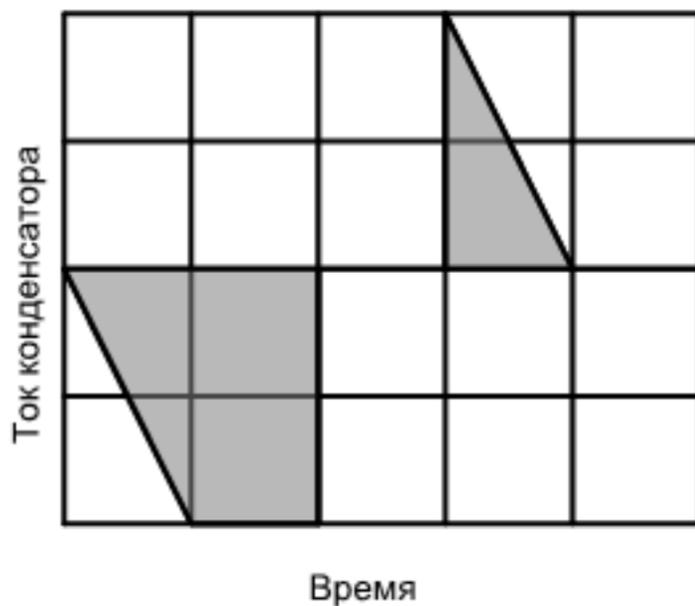


Рис. 11

Содержание отчета

1. Выполнение домашнего задания.
2. Электрические схемы испытаний RL и RC цепей, а также результаты измерений (тока, напряжений на участках цепи, угла сдвига фаз между напряжением и током на входе цепи).
3. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных в таблицах 1 и 2, используя расчеты RL и RC цепей по действующим значениям токов и напряжений. Построение в масштабе векторных диаграмм для RL и RC цепей.
4. Выводы.

Домашнее задание

1. Каковы основные характеристики синусоидального тока, напряжения и ЭДС?
2. Укажите угол сдвига фаз между мгновенными значениями напряжения и тока на участках цепи, содержащих резистор, катушку индуктивности и конденсатор. Какие соотношения связывают между собой мгновенные значения напряжения и тока на резистивном, индуктивном и емкостном элементах?
3. Как будет комплексное сопротивление катушки индуктивности и конденсатора в алгебраической и показательной формах записи?
4. Что такое активное, реактивное и полное сопротивления электрической цепи переменного тока? Почему при прохождении тока идеальная катушка индуктивности и конденсатор не нагреваются?

5. Поясните понятие треугольников сопротивлений, напряжений и мощностей. Укажите коэффициенты подобия этих треугольников.

ТЕМА 1.3. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.

ТЕМА: МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ «ЗВЕЗДОЙ» ИЛИ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

Цель работы: Исследование симметричных и несимметричных режимов работы трехфазной цепи при соединении приемников электрической энергии «звездой» и «треугольником».

Краткие теоретические сведения

В современных условиях электрическая энергия вырабатывается преимущественно источниками энергии с трехфазной системой напряжений. Такие источники широко применяют в технике. Объясняется это тем, что трехфазная система переменного тока является наиболее экономичной. К источникам трехфазного напряжения относятся промышленная трехфазная сеть частотой 50 Гц , вторичные обмотки трехфазных трансформаторов, синхронные генераторы.

Принцип действия синхронного генератора основан на явлении электромагнитной индукции. На неподвижной части синхронного генератора (статоре), в пазах тела статора, размещаются проводники трех фазных обмоток таким образом, чтобы положительные оси обмоток были смещены в пространстве относительно друг друга на угол 120 электрических градусов. При вращении ротора (индуктора) синхронного генератора, изготовленного в виде электромагнита постоянного тока, в обмотках будут индуцироваться три фазных ЭДС, сдвинутые относительно друг друга на угол 120 электрических градусов, то есть угол $(2\pi/3)$:

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

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

В трехфазной цепи нагрузку соединяют по схемам звезда или треугольник. При соединении нагрузки «звездой» концы всех трех фаз нагрузки объединяют в общую точку n' , называемую *нулевой точкой нагрузки*, а начала фаз подсоединяют к трехфазному источнику питания посредством линейных проводов (рис. 1). Токи, протекающие в линейных проводах, называются *линейными токами*, а протекающие по фазам нагрузки соответственно – *фазными*.

В четырехпроводной трехфазной цепи используется четвертый – нейтральный провод, соединяющий общие точки фаз генератора N и нагрузки n' .

При рассмотрении трехфазной цепи будем исходить из предположения, что трехфазный источник является симметричным, то есть фазные и соответственно линейные напряжения равны между собой и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

Тогда, трехфазную цепь можно считать симметричной, когда комплексные сопротивления фаз нагрузки будут между собой равны, то есть выполняется условие:

$$Z_a = Z_b = Z_c,$$

что равносильно выполнению равенств активных $R_a = R_b = R_c$ и реактивных $X_a = X_b = X_c$ сопротивлений нагрузки. Если условие не выполняется, то нагрузка является несимметричной и трехфазная цепь также является несимметричной.

При соединении трехфазной цепи «звездой» линейный ток равен фазному току, а линейное напряжение равно разности фазных напряжений, например, $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B$.

В частном случае, когда трехфазная цепь симметрична, соотношение между линейными напряжениями $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L$ и фазными напряжениями $U_A = U_B = U_C = U_{\phi}$ принимает вид:

$$U_L = \sqrt{3} U_{\phi}.$$

При соединении трехфазной цепи «треугольником» линейное напряжение равно фазному напряжению, а линейный ток равен разности фазных токов, например, $I_{AB} = I_A - I_B$. В частном случае, когда трехфазная цепь симметрична, соотношение между токами в линейных проводах $I_A = I_B = I_C = I_L$ и фазными токами $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\phi}$ принимает вид:

$$I_L = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

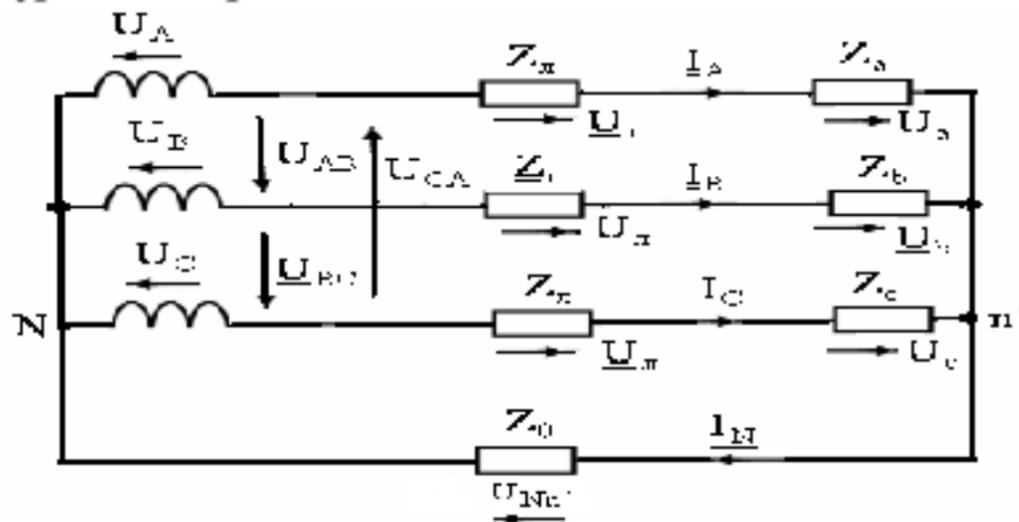


Рис. 1

В большинстве практических случаев трехфазные приемники электрической энергии представляют собой симметричную нагрузку, подключенную к симметричному трехфазному источнику питания. Векторная диаграмма симметричной трехфазной цепи при активном характере нагрузки, соединенной «звездой», приведена на рисунке 2.

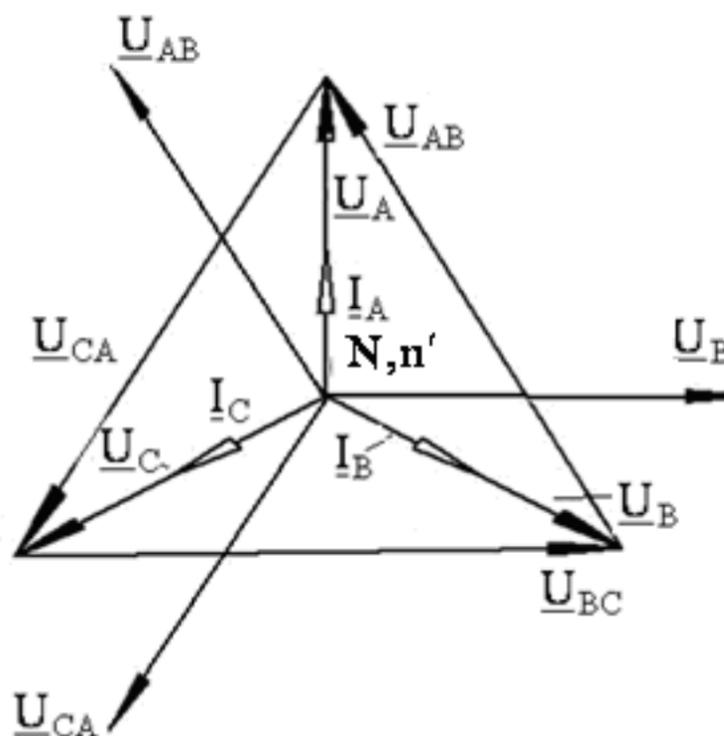


Рис. 2

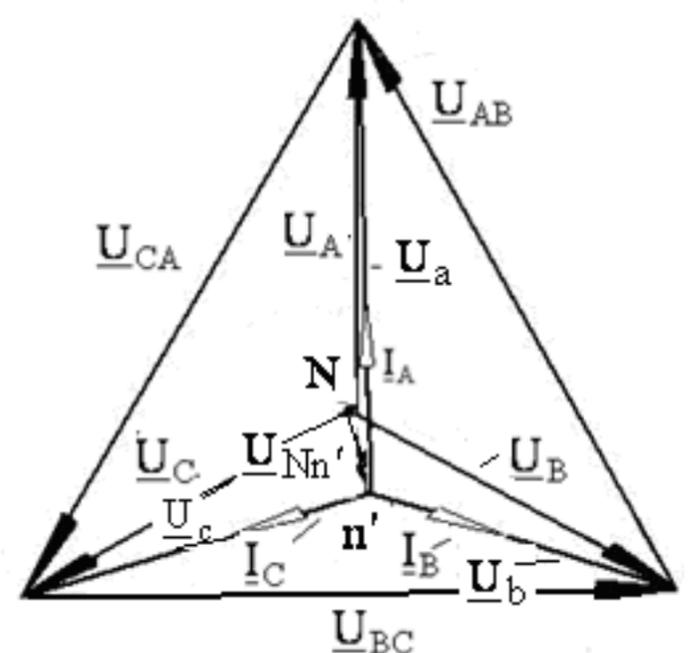


Рис. 3

В трехфазных цепях с нулевым проводом при несимметричной нагрузке протекает ток в нулевом проводе:

$$I_A + I_B + I_C = I_N \neq 0.$$

При этом напряжения фаз нагрузки остаются практически симметричными и напряжение между нулевыми точками генератора и нагрузки, называемое *напряжением смещения нейтрали*, ($\underline{U}_{Nn'} = 0$).

При отсутствии или обрыве нейтрального провода токи и напряжения в нагрузке образуют несимметричные системы векторов. При этом напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{Nn'} \neq 0$. Фазные напряжения нагрузки оказываются не равными друг другу: на одних фазах может быть пониженное напряжение по сравнению с фазными напряжениями генератора, а на других – повышенное. Векторная диаграмма трехфазной цепи при отсутствии нулевого провода и несимметричной активной нагрузки, соединенной звездой, приведена на рисунке 3.

Короткое замыкание одной фазы нагрузки, соединенной «звездой» без нулевого провода, следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при котором напряжение на короткозамкнутой фазе нагрузки становится равным нулю, а напряжение на двух других фазах увеличивается до значений, равных линейным напряжениям генератора.

При обрыве линейного провода трехфазный потребитель находится под линейным напряжением, так как при этом ни одна из точек нагрузки не будет под потенциалом оборванного линейного провода.

Соединение, при котором конец первой фазы x соединяется с началом второй фазы b , конец второй y – с началом третьей c , а конец третьей – z с началом первой a называется соединением трехфазного потребителя электрической энергии «треугольником». При этом начала всех фаз потребителя присоединяют к трехфазному источнику с помощью линейных проводов (рис. 4).

При соединении трехфазной цепи треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению $\underline{U}_\phi = \underline{U}_\Delta$, а линейный ток равен разности фазных токов, например, на основании первого закона Кирхгофа для узла a :

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}.$$

Углы сдвига по фазе между векторами фазных напряжений $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ и соответствующих фазных токов $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ определяются фазными сопротивлениями потребителя:

$$\varphi_{ab} = \frac{X_{ab}}{R_{ab}}, \quad \varphi_{bc} = \frac{X_{bc}}{R_{bc}}, \quad \varphi_{ca} = \frac{X_{ca}}{R_{ca}}.$$

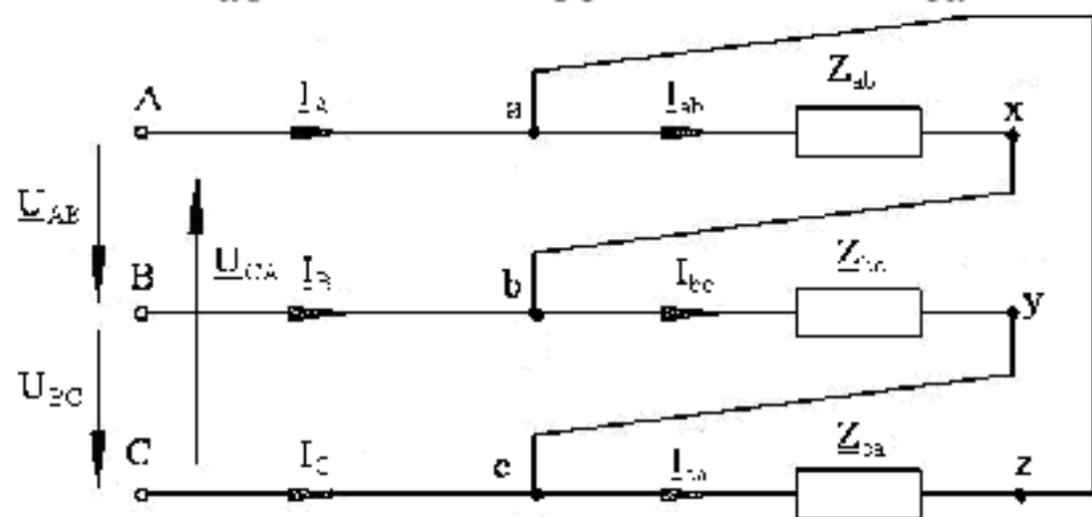


Рис. 4

При симметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы, то есть $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$. При этом как активные, так и реактивные сопротивления фаз потребителя равны

$$R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}, \quad X_{ab} = X_{bc} = X_{ca},$$

причем реактивные сопротивления имеют одинаковый (индуктивный или емкостный) характер. В этом случае фазные токи и соответствующие углы сдвига по фазе между фазными напряжениями и фазными токами будут равны между собой:

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}, \quad \varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca}.$$

Таким образом, при соединении трехфазного потребителя электроэнергии «треугольником» при симметричной нагрузке токи всех трех фаз равны между собой и сдвинуты относительно соответствующих линейных напряжений на одинаковые углы. Из векторной диаграммы для симметричной нагрузки при соединении потребителя «треугольником», представленной на рисунке 5, видно, что линейные токи оказываются равными и сдвинутыми относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом между фазными и линейными токами существует соотношение

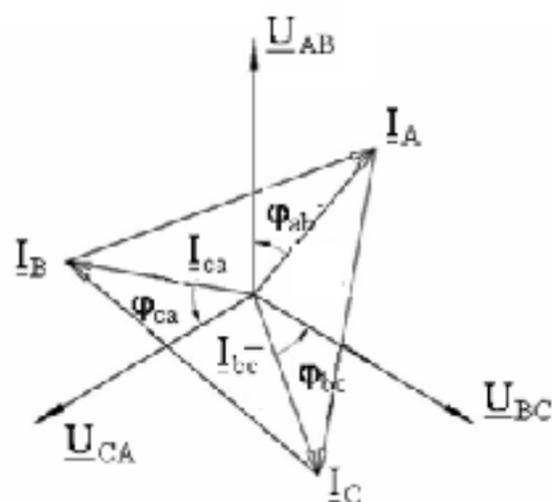


Рис. 5

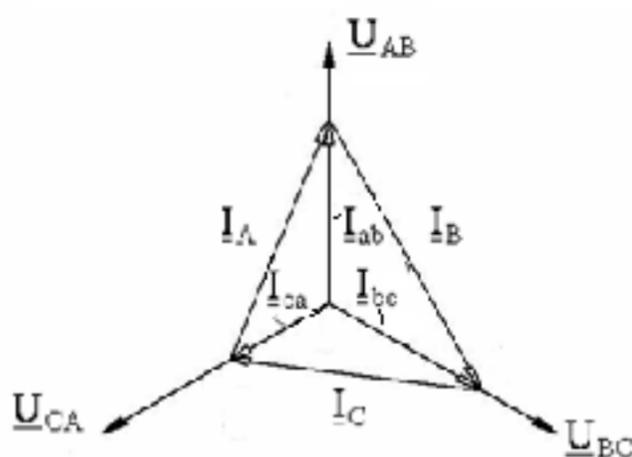


Рис. 6

При несимметричной нагрузке фазные токи и углы сдвига по фазе между фазными токами и фазными напряжениями в общем случае не одинаковы. Так же, как и при симметричной нагрузке, они могут быть определены по соответствующим формулам. Линейные токи и в этом случае определяются через соответствующие фазные токи. Векторная диаграмма, построенная для случая несимметричной активной нагрузки трехфазного потребителя при соединении «треугольником», представлена на рисунке 6.

Отключение нагрузки одной из фаз следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, когда сопротивление отключенной фазы равно бесконечности, например, $Z_{ab} = \infty$. В этом случае векторная диаграмма приобретает вид, представленный на рисунке 7.

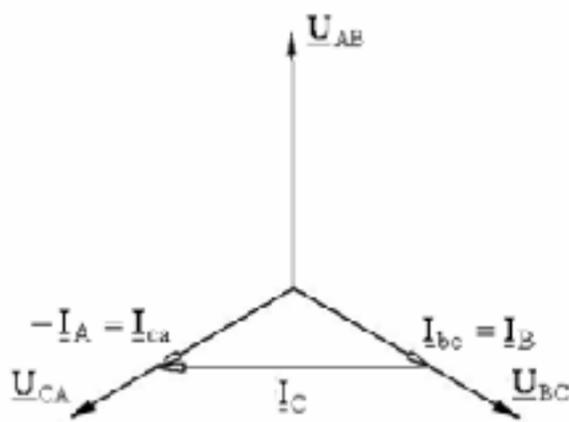


Рис. 7

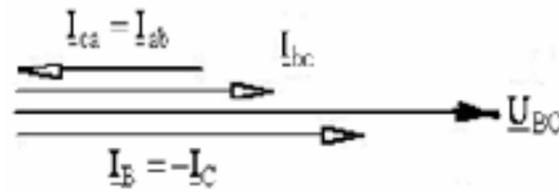


Рис. 8

При обрыве линейного провода в цепи трехфазного потребителя, соединенного «треугольником», следует рассматривать его как потребителя, подключенного к однофазному источнику \underline{U}_{BC} . Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рисунке 8.

Активная мощность трехфазного потребителя определяется в виде суммы активных мощностей его фаз:

при соединении «звездой»:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_a I_A \cos \varphi_a + U_b I_B \cos \varphi_b + U_c I_C \cos \varphi_c$$

при соединении «треугольником»:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{AB} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{BC} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{CA} I_{ca} \cos \varphi_{ca}.$$

При симметричной нагрузке фазные напряжения, токи и углы сдвига фаз оказываются равными. Вследствие этого равны также и активные мощности всех трех фаз потребителя электроэнергии.

Активная мощность трехфазного потребителя независимо от схемы его соединения может быть найдена через линейные токи и напряжения:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi \quad \text{или} \quad P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi_\phi.$$

Аналогично можно получить формулу для реактивной мощности трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$Q = 3Q_\phi = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi \quad \text{или} \quad Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi_\phi.$$

Полная мощность трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_\phi I_\phi \quad \text{или} \quad S = \sqrt{3}U_L I_L.$$

Описание лабораторного стенда и рабочее задание

1. Ознакомиться с составом съемной панели (рис. 9) лабораторного стенда для исследования трехфазной трехпроводной и четырехпроводной электрической цепи при соединении нагрузки «звездой» и «треугольником».

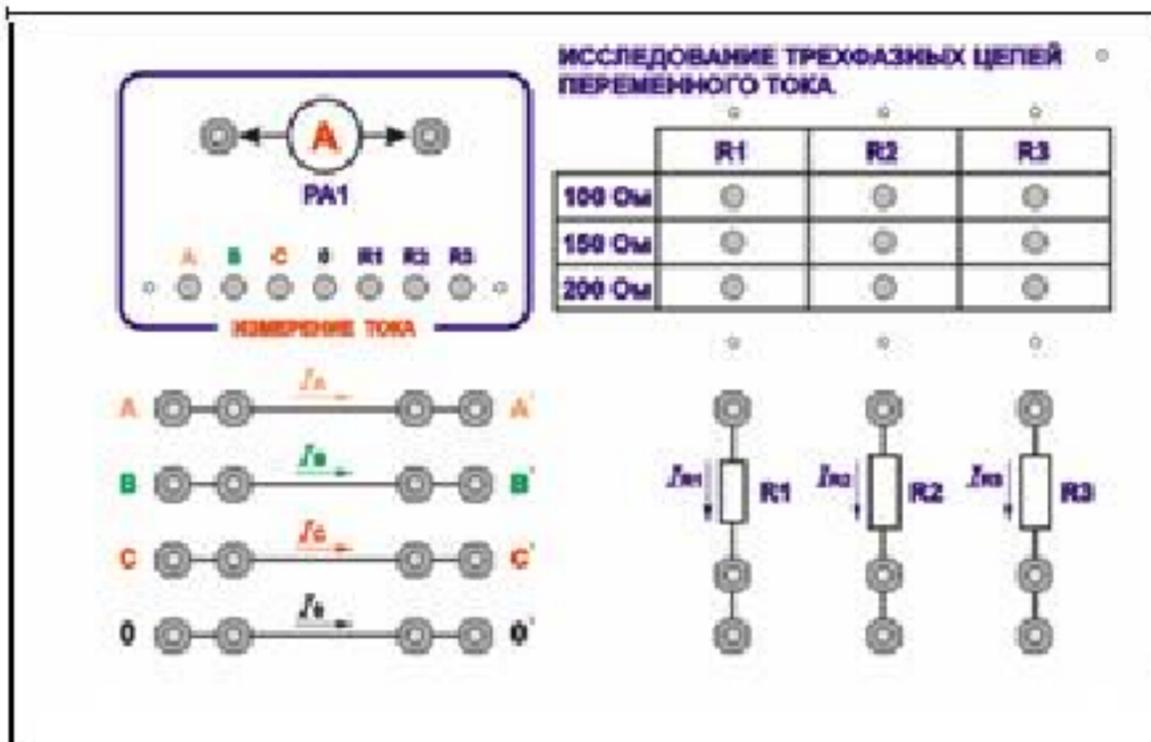


Рис. 9

В состав съемной панели входят:

- три резистора, каждый из которых с помощью кнопочного переключателя может принимать значения сопротивления $100\ \text{Ом}$, $150\ \text{Ом}$ и $200\ \text{Ом}$;
- четыре группы гнезд, имитирующих подводящие линейные провода $A - A'$, $B - B'$, $C - C'$ и нейтральный провод $0 - 0'$;
- кнопочный переключатель, включающий миллиамперметр $PA1$ в разрыв исследуемой цепи.

2. Собрать электрическую цепь звездой (рис. 1) по монтажной схеме, приведенной на рис. 10. Изменяя сопротивление переменных резисторов в фазах электрической цепи, измерить амперметром $PA1$ значения линейных токов I_L , а также вольтметром $PV1$ значения фазных U_ϕ и линейных U_L напряжений, записав полученные значения в таблицу 1 для различных режимов работы цепи:

- симметричная нагрузка фаз;
- несимметричная нагрузка с нейтральным проводом и без него;
- обрыв линейного провода с нейтральным проводом и без него;
- короткое замыкание фазы без нейтрального провода.

Исходные данные для выбора сопротивлений отдельных фаз и аварийная фаза в эксперименте определяются по указанию преподавателя.

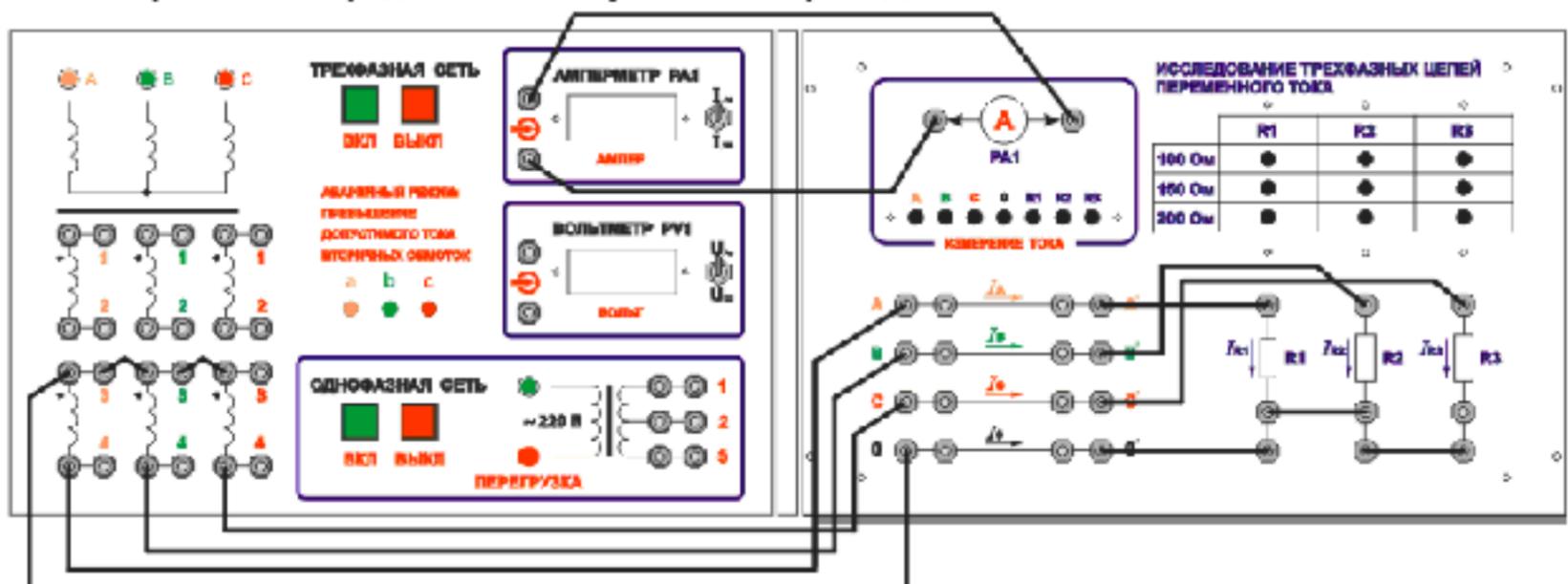


Рис. 10

- По данным измерений пункта 2 рабочего задания построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы цепи по указанию преподавателя.
- Обработать результаты измерений пункта 2 рабочего задания, определив соотношения между фазными U_{ϕ} и линейными U_{ℓ} значениями напряжений для симметричных и несимметричных режимов работы цепи по указанию преподавателя и подсчитав мощности отдельных фаз $P_{\phi} = I_{\phi}U_{\phi}$ и общую мощность $P = \sum P_{\phi}$.
- Собрать электрическую цепь «треугольником» (рис. 4) по монтажной схеме (рис. 11). Изменяя сопротивление переменных резисторов в фазах, измерить амперметром $PA1$ значения линейных I_{ℓ} и фазных I_{ϕ} токов, а вольтметром PVI значения линейных U_{ℓ} напряжений для различных режимов работы цепи:
 - симметричная нагрузка фаз;
 - несимметричная нагрузка;
 - обрыв фазы;
 - обрыв линейного провода.

Результаты измерений занести в таблицу 2. Исходные данные для выбора сопротивлений отдельных фаз, обрыв фазного и линейного проводов в эксперименте определяются по указанию преподавателя.

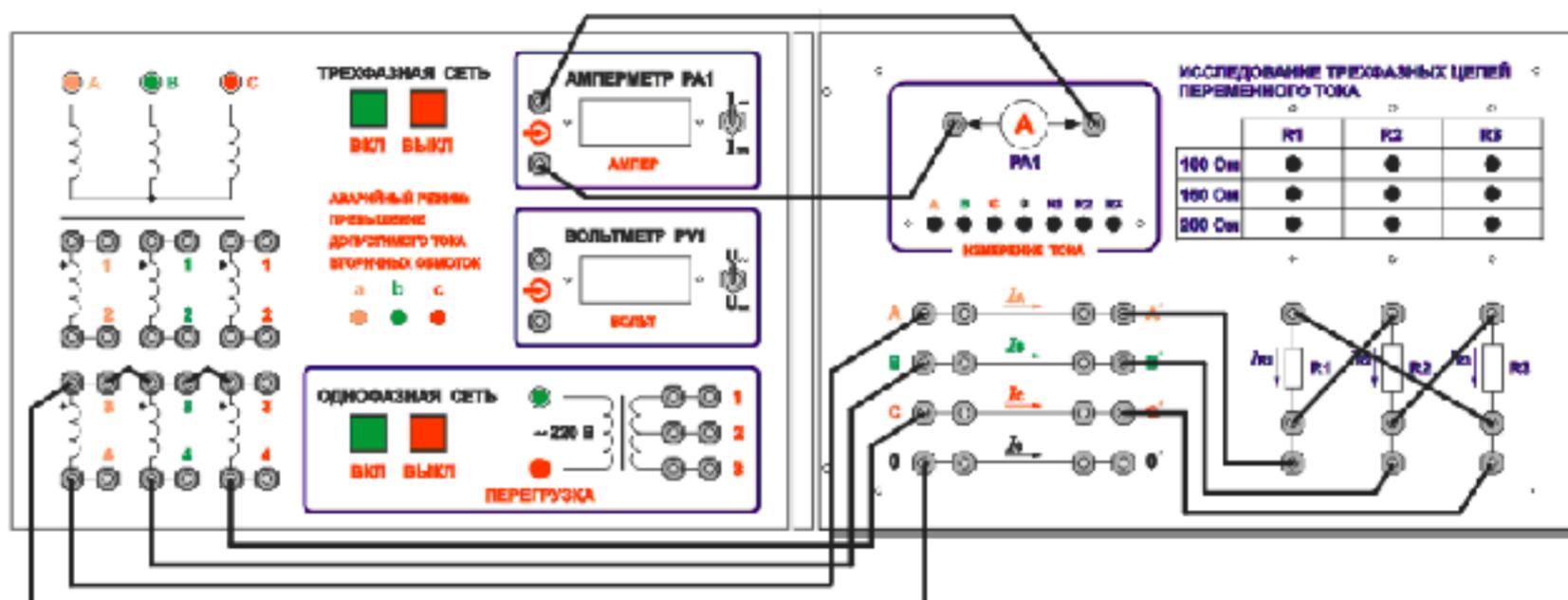


Рис. 11

- По данным измерений пункта 5 рабочего задания построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы цепи по указанию преподавателя.
- Обработать результаты измерений пункта 5 рабочего задания, определив соотношения между фазными U_{ϕ} и линейными U_{ℓ} значениями напряжений для симметричных и несимметричных режимов работы цепи (по указанию преподавателя) и подсчитав мощности отдельных фаз $P_{\phi} = I_{\phi}U_{\phi}$ и общую мощность $P = \sum P_{\phi}$ электрической цепи.

8. По данным измерений пункта 5 рабочего задания построить векторные диаграммы токов I и напряжений U при симметричном и несимметричном режимах работы цепи (по указанию преподавателя).
9. Обработать результаты измерений пункта 5 рабочего задания, определив соотношения между фазными U_{ϕ} и линейными U_L значениями напряжений для симметричных и несимметричных режимов работы цепи (по указанию преподавателя) и подсчитав мощности отдельных фаз $P_{\phi} = I_{\phi}U_{\phi}$ и общую мощность $P = \sum P_{\phi}$ электрической цепи.

Вопросы к защите

1. Объясните, почему опасно короткое замыкание потребителя электроэнергии в четырехпроводной системе трехфазной цепи.
2. Укажите условия симметрии трехфазного потребителя электроэнергии.
3. Как изменятся напряжения и токи потребителя электроэнергии в четырехпроводной трехфазной симметричной системе при отключении нейтрального провода?
4. Укажите способы включения ваттметров для измерения активной мощности в четырехпроводных и трехпроводных трехфазных электрических цепях.
5. Поясните, в каком случае нельзя использовать метод двух ваттметров при измерении активной мощности трехфазного потребителя электроэнергии.

Содержание отчета

1. Выполнение домашнего задания.
2. Привести электрические схемы трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой» и «треугольником».
3. Построить по результатам измерений в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для симметричных и несимметричных трехфазных цепей.
4. Выполнить расчет мощности отдельных фаз и общей мощности трехфазной цепи при соединении нагрузки «звездой» и «треугольником».
5. Выводы.

Таблица 1

№№ изм.	Режимы работы цепи	Измерения											Данные			
		I_A мА	I_B мА	I_C мА	I_N мА	U_a В	U_b В	U_c В	$U_{M'}$ В	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	R_a Ом	R_b Ом	R_c Ом	R_0 Ом
Соединение потребителей электроэнергии «звездой» без нейтрального провода																
1.	Симметричный															
2.	Несимметричный															
3.	Обрыв фазы															
4.	Обрыв линейного провода															
5.	Короткое замыкание фазы															
Соединение потребителей электроэнергии «звездой» с нейтральным проводом																
1.	Симметричный															
2.	Несимметричный															

Таблица 2

№№ изм.	Режимы работы цепи	Измерения														
		U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	U_{ab} В	U_{bc} В	U_{ca} В	I_A мА	I_B мА	I_C мА	I_{ab} мА	I_{bc} мА	I_{ca} мА	R_{ab} Ом	R_{bc} Ом	R_{ca} Ом
1.	Симметричный															
2.	Несимметричный															
3.	Обрыв фазы															
4.	Обрыв линейного провода															

**ТЕМА 1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.**

ТЕМА: ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: Изучение методов измерения активной, реактивной и полной мощностей в цепи переменного тока. Ознакомление с принципом действия и применением электродинамических ваттметра и фазометра.

Краткие теоретические сведения

Потребляемая в цепи мощность равна произведению напряжения на зажимах этой цепи на силу тока. При переменном токе это справедливо только для мгновенной мощности p :

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Периодически изменяющаяся мощность p мало удобна для оценки энергетического состояния цепи переменного тока. Поэтому основной энергетической характеристикой цепи переменного тока является средняя (активная) мощность, которая равна:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi \quad (2)$$

Мощность P принято измерять в ваттах (**Вт**).

Множитель $\cos \varphi$ в выражении (2) называется коэффициентом мощности, так как при неизменных напряжении и токе в цепи активная мощность в зависимости от $\cos \varphi$ меняется от нуля до максимального значения. Наибольшее значение активной мощности называется полной (или кажущейся) мощностью, которая в отличие от активной мощности измеряется в вольт-амперах (**ВА**).

$$P_{\text{max}} = S = UI \quad (3)$$

Мерой реактивной энергии является реактивная мощность.

$$Q = UI \sin \varphi \quad (4)$$

Единицей реактивной мощности является **ВАр** (Вольт-Ампер реактивный).

Из (2), (3) и (4) следует, что

$$P = S \cos \varphi ; Q = S \sin \varphi ; P^2 + Q^2 = S^2.$$

Полная мощность легко рассчитывается по показаниям вольтметра и амперметра, а активная и реактивная мощности могут быть измерены непосредственно с помощью специальных приборов. Можно фазометром измерить величину фазового сдвига φ , а затем вычислить P и Q .

Рассмотрим подробно работу электродинамического ваттметра, предназначенного для непосредственного измерения активной мощности (принцип действия ферродинамического ваттметра аналогичен).

Измерительный механизм ваттметра электродинамической системы состоит из неподвижной катушки, содержащей малое число витков толстого провода (токовая катушка), и подвижной катушки, имеющей большое число витков тонкого провода (катушка напряжения). Из теории работы электродинамических приборов известно, что мгновенный вращающий момент, действующий на подвижную систему, прямо пропорционален произведению токов в катушках: $m = k i_1 i_2$

Через первую катушку, включенную последовательно с нагрузкой, проходит ток цепи:

$$i_1 = i = I_m \sin \omega t$$

Катушка напряжения через безреактивное добавочное сопротивление включается параллельно нагрузке, поэтому

$$i_2 = \frac{U}{r_{\text{катушки}} + r_3} = \frac{U}{r} = \frac{U_m}{r} \sin(\omega t + \varphi)$$

Среднее за период значение вращающего момента равно

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{k}{r} UI \cos \varphi = \frac{k}{r} P$$

Равновесие подвижной части наступает при $M_{\text{ср}} = M_{\text{тор}} = D\alpha$ (D – коэффициент, определяемый упругостью пружин). Следовательно, угол поворота подвижной системы

$$\alpha = \frac{k}{Dr} P = k_1 P$$

прямо пропорционален активной мощности.

Коэффициент пропорциональности k_1 зависит от величины добавочного сопротивления r_d , которое различно при разных пределах измерения ваттметра по напряжению. Кроме того, этот коэффициент окажется другим, если ток i_1 будет в несколько раз отличаться от тока i цепи (например, при использовании трансформатора тока для расширения пределов измерения ваттметра по току). Величина коэффициента пропорциональности учитывается при определении цены деления ваттметра.

Мощность, приходящаяся на одно деление шкалы ваттметра, называется ценой деления при заданных пределах измерения по напряжению $U_{\text{н}}$ и току $I_{\text{н}}$. Цена

деления C_w определяется по формуле: $C_w = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{n}$, здесь n – число делений на шкале ваттметра.

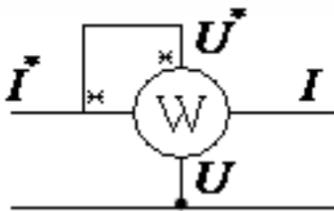


Рис 1.

Ваттметр включается по четырехзажимной схеме рис.1. Два токовых зажима обозначаются I^* и I . При помощи этих зажимов токовая катушка ваттметра включается в схему последовательно с нагрузкой (положительным считается направление тока от I^* к I). Параллельно нагрузке ваттметр подключается при помощи второй пары зажимов U^* и U (положительным считается направление тока в параллельной цепи ваттметра от U^* к U).

Зажим U^* можно подключать как к клемме I^* , так и к клемме I , стрелка ваттметра все равно будет отклоняться вправо. В первом случае ваттметр измеряет суммарную мощность, потребляемую нагрузкой и токовой катушкой ваттметра $P + P_I$, во втором – нагрузкой и параллельной ветвью ваттметра $P + P_U$. Так как $P_I < P_U$, ошибка при измерении мощности, потребляемой нагрузкой, будет меньше в первом случае, когда соединены клеммы помеченные звездочками U^* и I^* (так называемые генераторные зажимы ваттметра).

В цепи трехфазного переменного тока при симметричной системе напряжений электродинамическим ваттметром можно непосредственно измерить не только активную, но и реактивную мощности. В самом деле, линейное напряжение $U_{\text{вс}}$ отстает от фазного $U_{\text{Ана}}$ на угол 90° . Если через токовую обмотку ваттметра пропустить фазный ток $I_{\text{А}}$, параллельную цепь его подключить к линейному напряжению $U_{\text{вс}}$ ($U^* - \text{в}$, $U - \text{с}$), то показания прибора будут определяться соотношением:

$$I_{\text{А}} U_{\text{вс}} \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} U_{\text{А}} I_{\text{А}} \sin \varphi = \sqrt{3} Q_{\text{А}}$$

то есть ваттметр будет показывать мощность в $\sqrt{3}$ раз большую реактивной мощности фазы А .

Электродинамический фазометр представляет собой логометр той же системы, то есть имеет две подвижные катушки. Неподвижная (токовая) катушка включается последовательно в цепь с приемником энергии. Последовательно с одной из подвижных катушек включается безреактивное добавочное сопротивление r_d , последовательно с другой – реактивная катушка с сопротивлением $x_{\text{Лд}}$. Подвижные катушки вместе с добавочными сопротивлениями образуют две параллельные ветви, которые включены

также параллельно сопротивлению нагрузки. В первой из подвижных катушек ток I_1 совпадает по фазе с напряжением U , а в другой – ток I_2 отстает от напряжения на 90° . Известно, что угол поворота подвижной системы электродинамического логометра определяется соотношением:

$$\alpha = F \left(\frac{I_2 \cos \varphi_2}{I_1 \cos \varphi_1} \right)$$

$$\alpha = F \left[\frac{I_2 \cos(90^\circ - \varphi)}{I_1 \cos \varphi} \right] = F \left(\frac{I_2}{I_1} \operatorname{tg} \varphi \right)$$

В нашем случае

Параллельные цепи прибора обладают постоянным сопротивлением при неизменной частоте тока, следовательно,

$$\alpha = F(k \operatorname{tg} \varphi)$$

то есть угол поворота подвижной системы фазометра зависит от величины сдвига фаз между напряжением на нагрузке и током в ней. Поэтому на шкале фазометра могут быть нанесены значения угла φ (или $\cos \varphi$).

Фазометр включается в цепь по 4-х зажимной схеме аналогично ваттметру.

Задание для самостоятельной работы.

1. Схему включения ваттметра в цепь (рис.1) перечертите в тетрадь. Укажите на схеме в тетради зажимы I^* , I , U^* и U . Как определить цену деления ваттметра?
2. Начертите схему включения ваттметра при измерении мощности в цепи постоянного тока. Укажите полярность подключения источника тока, последовательной и параллельной цепей ваттметра, приемника тока.
3. Как изменятся показания ваттметра, если изменить полярность включения одной из его катушек?
4. Определите показания всех приборов в схеме (рис.2).

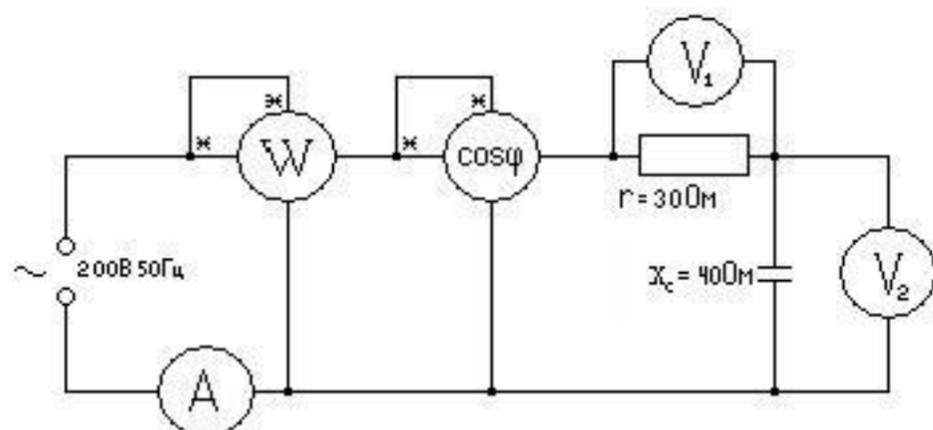


рис.2

Чему равны полная и реактивная мощности цепи? Постройте векторную диаграмму для иллюстрации работы этой цепи. Укажите знак угла сдвига фаз между напряжением и током.

5. В цепи переменного тока напряжение и ток изменяются по законам:

$$u = 141 \sin(314t + 80^\circ)$$

$$i = 1,41 \sin(314t + 20^\circ)$$

Рассчитайте полную, активную и реактивную мощности цепи.

6. Напряжение на катушке 200В , частота тока 50Гц . Активная мощность, потребляемая катушкой 640Вт , а ток в ней 4А . Определите активное сопротивление катушки и ее индуктивность.

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ТЕМА 2.1. ТРАНСФОРМАТОРЫ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5.

ТЕМА: ВЫБОР ТИПА ТРАНСФОРМАТОРА НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Цель работы: Ознакомление с принципом работы, характеристиками и методами исследования однофазных трансформаторов.

Краткие теоретические сведения

Трансформатор - статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Трансформатор состоит из стального сердечника, собранного из тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью снижения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи.

На сердечнике однофазного трансформатора (рис. 1) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного провода, содержащие различное число витков: первичная обмотка содержит W_1 витков, а вторичная обмотка – W_2 витков.

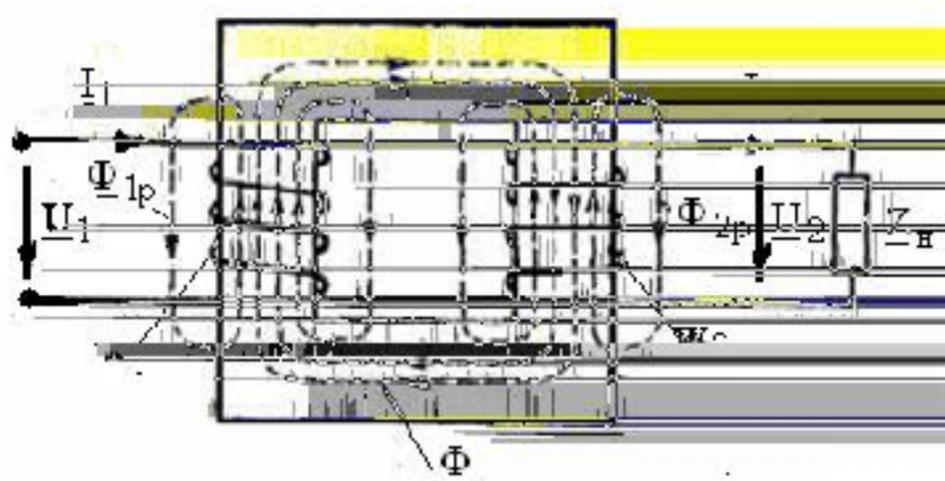


Рис. 1

К первичной обмотке подводится питающее напряжение \underline{U}_1 . С вторичной его обмотки снимается напряжение \underline{U}_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии.

Отношение напряжения U_2 вторичной обмотки к напряжению U_1 первичной обмотки называют *коэффициентом трансформации по напряжению*:

$$n_{напр} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Отношение тока I_2 вторичной обмотки к току I_1 первичной обмотки называют *коэффициентом трансформации по току*:

$$n_{ток} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Коэффициент передачи есть обратная величина коэффициента трансформации, то есть коэффициент передачи по напряжению равен $K_U = \frac{U_1}{U_2}$, а коэффициент передачи по току

$$K_I = \frac{I_1}{I_2}.$$

Во многих случаях трансформатор имеет не одну, а две или несколько вторичных обмоток, к каждой из которых подключается свой потребитель электроэнергии. Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный

магнитный поток Φ . Изменяясь во времени по синусоидальному закону $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, этот поток пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках будет наводиться ЭДС, мгновенные значения которой будут изменяться по синусоидальному закону:

$$e_1 = w_1 \frac{d\hat{\Phi}}{dt} = E_{1m} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad , \quad e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{2m} \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где E_{1m} и E_{2m} – амплитудные значения ЭДС соответственно в первичной и вторичной обмотках.

Действующие значения ЭДС, наводимых соответственно в первичной и вторичной обмотке трансформатора, определяются по формулам:

$$E_1 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot w_1,$$

$$E_2 = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot w_2.$$

Напряжение, подводимое в режиме холостого хода к трансформатору, в соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной обмотки, может быть представлено как сумма:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_0 \underline{Z}_1,$$

где \underline{I}_0 – ток холостого хода трансформатора, $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – комплексное сопротивление первичной обмотки, R_1 – ее активное сопротивление; X_1 – ее индуктивное сопротивление, обусловленное потоками рассеяния.

Ток во вторичной обмотке нагруженного трансформатора, согласно закону Ома, определяется выражением

$$\underline{I}_2 = \underline{U}_2 / \underline{Z}_n.$$

В нагрузочном режиме трансформатора можно выделить три магнитных потока (рис. 1): основной поток Φ , сцепленный с витками первичной и вторичной обмоток, поток Φ_{1p} рассеяния первичной обмотки и поток Φ_{2p} рассеяния вторичной обмотки. ЭДС, индуцируемые в обмотках потоками Φ_{1p} и Φ_{2p} рассеяния, учитываются обычно при помощи соответственно индуктивных сопротивлений X_1 и X_2 рассеяния первичной и вторичной обмоток. Потоки Φ_{1p} и Φ_{2p} рассеяния обмоток пропорциональны соответствующим токам в обмотках и совпадают с ними в фазе. Эти потоки рассеяния индуцируют в обмотках ЭДС \underline{E}_{1p} и \underline{E}_{2p} , отстающие по фазе от магнитных потоков, а следовательно, и токов \underline{I}_1 и \underline{I}_2 на угол $\frac{\pi}{2}$.

ЭДС от магнитных потоков рассеяния уравниваются составляющими напряжения:

$$j \cdot X_1 \cdot \underline{I}_1 = -\underline{E}_{1p} \quad \text{и} \quad j \cdot X_2 \cdot \underline{I}_2 = -\underline{E}_{2p},$$

где $jX_1 = j\omega L_{1p}$ и $j \cdot X_2 = j\omega L_{2p}$ – комплексные сопротивления рассеяния обмоток; $L_{1p} = \psi_{1p} / I_1$ и $L_{2p} = \psi_{2p} / I_2$ – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток; ψ_{1p} , ψ_{2p} – потокосцепления рассеяния первичной и вторичной обмоток; ω – угловая частота переменного тока.

Составляющие напряжения $X_1 I_1$ и $X_2 I_2$ опережают токи I_1 и I_2 на угол $\frac{\pi}{2}$. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток нагруженного

трансформатора можно записать уравнения электрического состояния

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_1, \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_2,\end{aligned}$$

где \underline{I}_1 – ток первичной обмотки нагруженного трансформатора; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ – комплексное полное сопротивление вторичной обмотки, R_2 – ее активное сопротивление; X_2 – ее индуктивное сопротивление, обусловленное потоками рассеяния $\hat{O}_2 \delta$.

Падения напряжений $\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1$ и $\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2$ в обмотках трансформатора обычно не превышают 4–10 % от напряжений \underline{U}_1 и \underline{U}_2 , поэтому можно считать, что в режиме нагрузки трансформатора сохраняются равенства $\underline{U}_1 \approx \underline{E}_1$ и $\underline{U}_2 \approx \underline{E}_2$. Если напряжение на первичной обмотке $\underline{U}_1 = const$, то амплитуда магнитного потока будет постоянной пределах от холостого хода до номинальной нагрузки в трансформаторе, то есть $\Phi_m = const$.

В режиме нагрузки выполняется уравнение равновесия намагничивающих сил обмоток трансформатора:

$$\underline{I}_1 w_1 - \underline{I}_2 w_2 = \underline{I}_0 w_1.$$

Исследование работы трансформатора при нагрузке удобно проводить на основе векторных диаграмм, построенных для приведенного трансформатора, заменяющего реальный трансформатор, у которого параметры вторичной обмотки приведены к числу витков первичной обмотки. В соответствии с этим приведенный трансформатор должен иметь коэффициент трансформации, равный единице ($n = 1$). В процессе определения параметров вторичной обмотки приведенного трансформатора все параметры первичной обмотки остаются неизменными. При замене реального трансформатора приведенным трансформатором активные, реактивные и полные мощности, а также коэффициент мощности вторичной обмотки трансформатора должны оставаться постоянными. Исходя из этого, расчетные соотношения для приведенного трансформатора имеют вид:

- вторичная приведенная ЭДС $\underline{E}'_2 = n \underline{E}_2 = \underline{E}_1$,
- приведенное вторичное напряжение $\underline{U}'_2 = n \underline{U}_2 = \underline{U}_1$,
- приведенный вторичный ток $\underline{I}'_2 = \underline{I}_2 / n$,
- приведенное активное сопротивление вторичной обмотки $R'_2 = n^2 R_2$,
- приведенное реактивное индуктивное сопротивление вторичной обмотки $X'_2 = n^2 X_2$,
- приведенное полное сопротивление вторичной обмотки $\underline{Z}'_2 = n^2 \underline{Z}_2$,
- приведенное полное сопротивление нагрузки $\underline{Z}'_n = n^2 \underline{Z}_n$.

Через приведенные параметры трансформатора уравнение электрического равновесия вторичной обмотки имеет вид:

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 (R'_2 + jX'_2).$$

Из уравнения намагничивающих сил обмоток для приведенного трансформатора можно записать $\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_2$.

Так же, как для катушки со стальным сердечником ЭДС \underline{E}_1 , равную \underline{E}'_2 , можно заменить

векторной суммой активного и реактивного индуктивных падений напряжения

$$\underline{E}_1 = \underline{I}_0(R_0 + jX_0),$$

где R_0 – активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями мощности в магнитопроводе трансформатора; X_0 – индуктивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком Φ трансформатора.

По уравнениям приведенного трансформатора можно составить схему замещения трансформатора (рис. 2) и построить векторную диаграмму. Векторная диаграмма трансформатора для случая активно-индуктивной нагрузки приведена на рисунке 3.

При опыте холостого хода к первичной обмотке трансформатора подводится напряжение, равное номинальному его значению $\underline{U}_1 = \underline{U}_{1ном}$. Вторичная обмотка трансформатора при этом разомкнута, так как в цепи ее отсутствует нагрузка. В результате этого ток во вторичной обмотке оказывается равным нулю, в то время как в цепи первичной обмотки трансформатора будет ток холостого хода $\underline{I}_1 = \underline{I}_0$, значение которого невелико и составляет 4–10 % от номинального значения тока в первичной обмотке. При таком токе потерями в обмотках можно пренебречь и считать, что все потери в трансформаторе являются магнитными потерями $P_0 = I_0^2 R_0$ в магнитопроводе, обусловленные действием вихревых токов и гистерезиса (перемагничивание стали).

Качественные рабочие характеристики трансформатора в нагрузочном режиме приведены на рисунке 4.

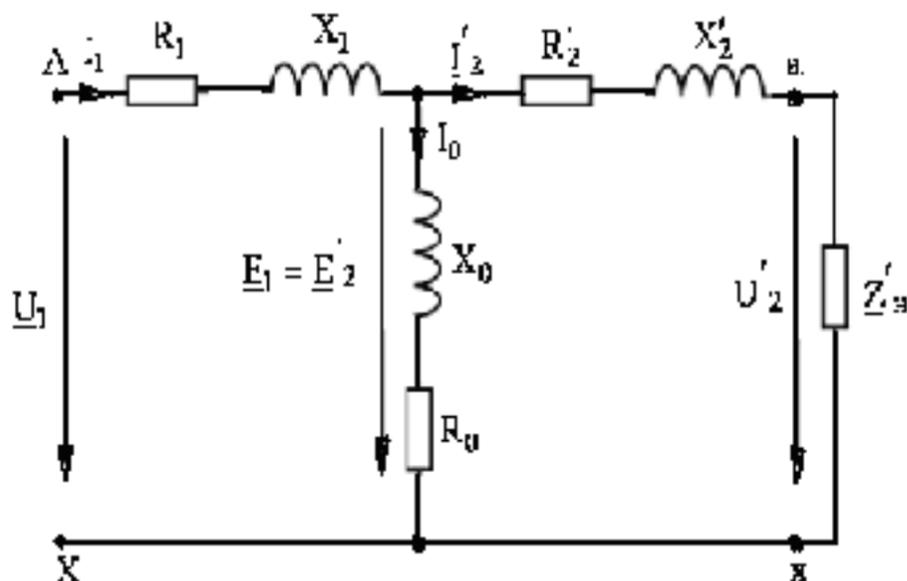


Рис. 2

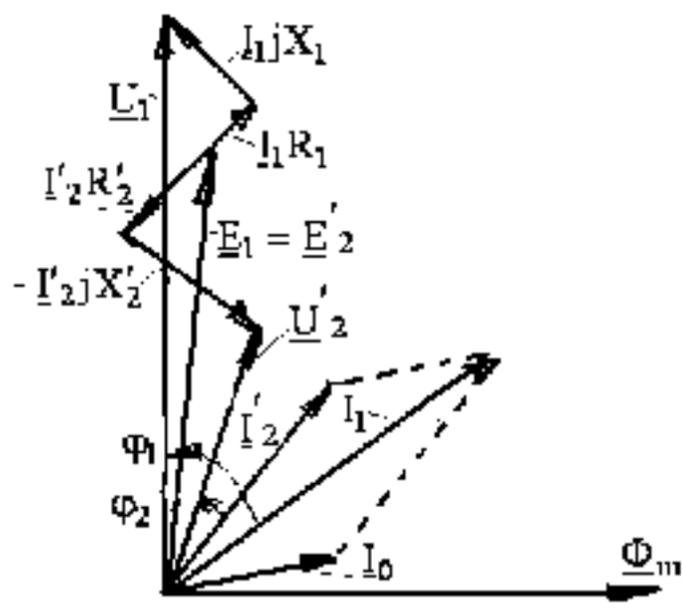


Рис. 3

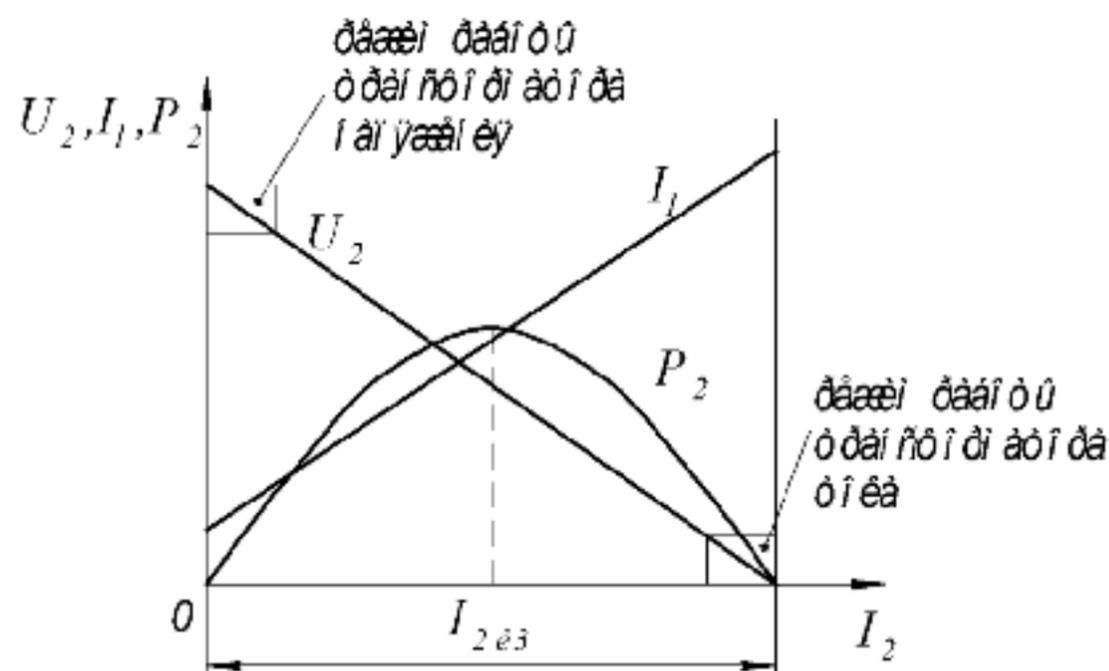


Рис. 4

Опыт короткого замыкания трансформатора проводится в процессе исследований

трансформатора для определения электрических потерь мощности в проводах обмоток и параметров упрощенной схемы замещения трансформатора. Этот опыт проводится при пониженном напряжении на первичной обмотке так, чтобы при замкнутой накоротко вторичной обмотке токи в обмотках соответствовали номинальным значениям $I_1 = I_{1ном}$, $I_2 = I_{2ном}$. При опыте короткого

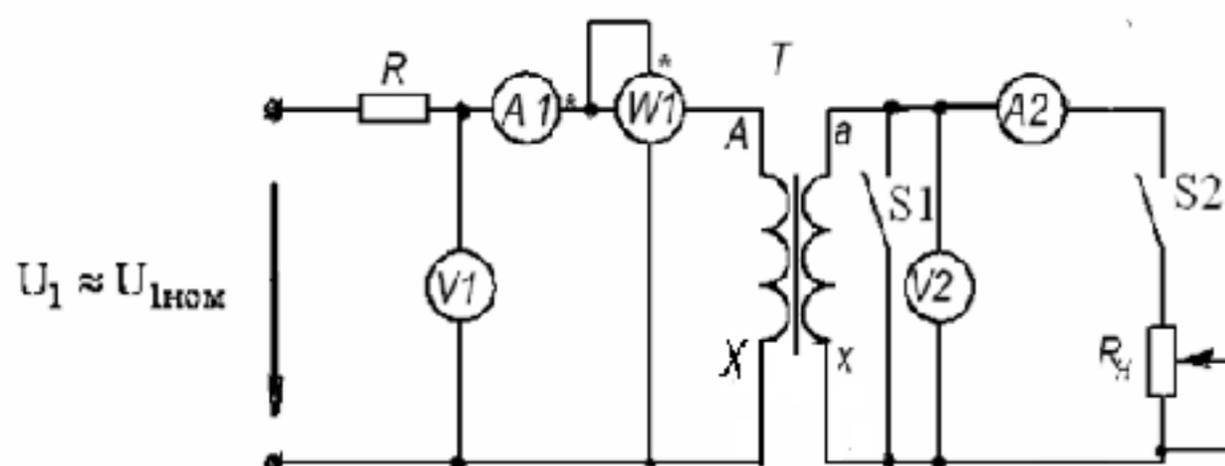
Номинальная мощность, ВА	Частота, Гц	Номинальное напряжение, В		Номинальный ток, А		Потери, Вт		%
		$U_{1ном}$	$U_{2ном}$	$I_{1ном}$	$I_{2ном}$	P_0	P_k	
$S_{1ном}$	f							

замыкания напряжение, подводимое к первичной обмотке, мало и равно $U_1 \approx U_{1к} = 4,44 f w_1 \Phi_m$.

Отсюда следует, что магнитный поток Φ_m и магнитная индукция B_m трансформатора будут также малы. Как известно, магнитные потери в магнитопроводе пропорциональны квадрату магнитной индукции, поэтому в опыте короткого замыкания трансформатора ими можно пренебречь.

Описание лабораторного стенда и рабочее задание

1. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием съемной панели (рис. 5) лабораторного стенда, используемого для испытания однофазного трансформатора. Занести в таблицу 1 номинальные технические данные опытного трансформатора, имеющего следующие паспортные данные: тип ТПП251-127/220-50, номинальная мощность $22 В \cdot А$, номинальное напряжение на вторичной обмотке $30 В$, номинальный ток в первичной обмотке $0,145 А$, а во вторичной обмотке соответственно $0,73 А$.



2. Провести опыт холостого хода трансформатора. В соответствии с принципиальной схемой (рис. 5) собрать электрическую цепь для проведения опыта холостого хода трансформатора. Питание электрической цепи осуществить от регулируемого источника синусоидального напряжения (с помощью автотрансформатора). Установить напряжение на первичной обмотке трансформатора равным номинальному напряжению $U_{1ном}$. Измерить напряжения $U_{1ном}$ и $U_{2ном}$, ток I_0 , мощность P_0 в первичной обмотке с помощью амперметра $PA1$, вольтметра $PV1$ и ваттметра $PW1$, установленными на стенде. Показания приборов занести в таблицу 2 в строку «опыт х.х.».

Таблица 2

Режим работы	Опыт					Расчет				
	$U_1 В$	$I_1 А$	$P_1 ВТ$	$U_2 В$	$I_2 А$	$P_2 ВТ$	n	$\cos \varphi_1$	η	β
Опыт х.х.										0
Работа под нагрузкой $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$	1									0,25
	2									0,5
	3									0,75
	4									1
	5									1,25

5. П

о данным опыта холостого хода определить параметры схемы замещения трансформатора, представленной на рисунке 2, используя следующие соотношения:

$$Z_0 = \frac{U_{1ном}}{I_0} = \sqrt{(R_1 + R_0)^2 + (X_1 + X_0)^2},$$

$$6. R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$$

4. Используя паспортные данные трансформатора пункта 1 рабочего задания, рассчитать номинальные токи в первичной и вторичной обмотках трансформатора и занести их в таблицу 1:

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{U_{1ном}}, \quad I_{2ном} = \frac{S_{ном}}{U_{2ном}}$$

7. Испытать однофазный трансформатор в режиме нагрузки. В режиме нагрузки трансформатора вторичная цепь замкнута на нагрузочное сопротивление Z_H и по ней проходит ток I_2 . После того, как ключи $S1$ и $S2$ установлены в нужное положение (ключ $S2$ замкнут, ключ $S1$ разомкнут на рисунке 5) при помощи нагрузочного реостата R_f , изменяя сопротивление нагрузки, установить значения коэффициента нагрузки β в диапазоне, согласно данным таблицы 2. Заполнить строки таблицы 2 «Работа под нагрузкой» трансформатора, используя полученные опытные данные и расчетные соотношения:

- мощность нагрузки $P_2 = U_2 I_2$,

- коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_{12}}$,

- КПД трансформатора $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

8. Определить снижение напряжения на вторичной обмотке при различных значениях коэффициента нагрузки β :

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2и\ddot{u}} - U_2}{U_{2и\ddot{u}}} \cdot 100\%,$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке при заданной нагрузке.

По данным таблицы 2 построить в масштабе рабочие характеристики трансформатора в нагрузочном режиме, а именно: расчетные зависимости $U_2 = U_2(\beta)$, $I_1 = I_1(\beta)$, $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_1(\beta)$ и $\eta = \eta(\beta)$.

9. Испытать однофазный трансформатор в режиме короткого замыкания. В опыте короткого замыкания на первичную обмотку подать пониженное напряжение $U_{1К} = (3-15)\% \cdot U_{1ном}$, при котором токи в обмотках равны номинальным значениям $I_{1ном}$, $I_{2ном}$. Ключ $S1$ замкнут (рис. 5). Показания приборов занести в таблицу 2 в строку «Опыт к.з.».

По данным таблицы 2 определить значение напряжения короткого замыкания в процентах от номинального:

$$u_K = \frac{U_{1k}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$$

а также активную

$$u_a = \frac{P_K}{S_H} \cdot 100\% = \frac{R_K \cdot I_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$$

и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания.

$$u_P = \sqrt{u_K^2 - u_a^2}, (\%)$$

10. Из опыта короткого замыкания определить параметры схемы замещения трансформатора

$$Z_K = \frac{U_{1k}}{I_{1ном}} = \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} = \sqrt{R_K^2 + X_K^2},$$

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1ном}^2}, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

$$X_1 \approx X'_2 = \frac{X_K}{2}, \quad R_1 \approx R'_2 = \frac{R_K}{2}$$

Параметры схемы замещения трансформатора записать в таблицу 3.

Таблица 3

$R_1,$ <i>Ом</i>	$X_1,$ <i>Ом</i>	$Z_1,$ <i>Ом</i>	$R_0,$ <i>Ом</i>	$X_0,$ <i>Ом</i>	$Z_0,$ <i>Ом</i>	$R'_2,$ <i>Ом</i>	$X'_2,$ <i>Ом</i>	$Z'_2,$ <i>Ом</i>

Вопросы к защите

1. Что называют внешней характеристикой трансформатора?
2. Какое влияние оказывает характер нагрузки на вид внешней характеристики трансформатора?
3. Каким экспериментом можно определить отношение чисел витков первичной и вторичной обмоток трансформатора?
4. Почему в режиме х.х. трансформатора его магнитопровод нагревается, а обе обмотки остаются холодными?
5. Почему в режиме опыта к.з. трансформатора обе его обмотки нагреты, а магнитопровод остается холодным?
6. Почему ток х.х. трансформатора значительно меньше номинального?
7. Что называется трансформатором?
8. Объяснить, для чего и каким образом проводится опыт холостого хода трансформатора.
9. Объяснить, для чего и каким образом проводится опыт короткого замыкания трансформатора.
10. В чем состоит отличие аварийного короткого замыкания?
11. Найти число витков обмотки трансформатора для получения в режиме холостого хода напряжения на вторичной обмотке $U_2 = 12 \text{ В}$ при напряжении первичной обмотки $U_1 = 220 \text{ В}$, если частота сети равна 50 Гц , а максимальное значение главного магнитного потока в сердечнике трансформатора $\Phi_m = 0,0036 \text{ Вб}$.
12. Трансформатор включен в сеть с напряжением $U_1 = 220 \text{ В}$. Напряжение на вторичных зажимах $U_2 = 24 \text{ В}$. Ток нагрузки $I_2 = 5 \text{ А}$. Обмотка имеет $w_1 = 500$ витков. Определить число витков вторичной обмотки w_2 и площадь поперечного сечения

проводов, из которых сделаны обмотки, если максимально допустимая плотность тока равна $2,5 \text{ A/мм}^2$.

13. Однофазный трансформатор работает в режиме холостого хода. Напряжение сети $U_1 = 5500 \text{ В}$, мощность потерь $P_0 = 1450 \text{ Вт}$ при токе $I_0 = 3 \text{ А}$. Определить коэффициент мощности в режиме холостого хода, полное сопротивление первичной обмотки и его активную и индуктивную составляющие.
14. Два трансформатора одинаковой мощности рассчитаны на одно и то же номинальное напряжение. У первого число витков первичной и вторичной обмоток больше, чем у второго. У какого трансформатора сечение сердечника будет меньшим?

Содержание отчета

1. Выполнение домашнего задания.
2. Указать номинальные паспортные данные опытного трансформатора и привести электрическую схему испытаний однофазного трансформатора под нагрузкой.
3. Представить результаты испытаний трансформатора в виде таблицы, дополнив ее расчетными данными, характеризующими работу трансформатора в опытах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.
4. Указать данные снижения напряжения на вторичной обмотке при различных коэффициентах нагрузки.
5. Привести схему замещения трансформатора и выполнить расчет ее параметров.
6. Выводы.

Пример Выбрать силовой трансформатор для строительной площадки по результатам расчетов. Исходными данными являются $P_{\text{расч}} = 45,9 \text{ кВт}$; $Q_{\text{расч}} = 53,1 \text{ кВАр}$; $S_{\text{расч}} = 70,2 \text{ кВА}$; $Q_{\text{ку}} = 11,65 \text{ кВАр}$.

1. Рассчитываем реактивную мощность стройплощадки с учетом мощности компенсирующего устройства $Q_{\text{ку}}$ по формуле (15):

$$Q' = Q_{\text{расч}} - Q_{\text{ку}} = 53,1 - 11,65 = 41,45 \text{ кВАр}.$$

2. Определяем полную расчетную мощность стройплощадки по формуле (16):

$$S' = \sqrt{(P')^2 + (Q')^2} = \sqrt{45,9^2 + 41,045^2} = 61,84 \text{ кВА}.$$

3. По результатам, полученным в п.2, используя Прил. 3, проводим предварительный выбор трансформатора, исходя из того, что его мощность должна быть больше S' .

Выбираем трансформатор типа ТМ-63/10 мощностью $S_{\text{тр}} = 63 \text{ кВ}$.

4. Рассчитываем потери в трансформаторе $\Delta P_{\text{тр}}$ и $\Delta Q_{\text{тр}}$ (формулы 13 и 14):

$$\Delta P = 0,02 \cdot S_{\text{тр}} = 1,26 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{\text{тр}} = 0,02 \cdot S_{\text{тр}} = 7,56 \text{ кВАр}.$$

5. Определяем общие расчетные мощности стройплощадки по формулам (18), (19), (20):

$$P_{\text{тр}} = P + \Delta P_{\text{тр}} = 45,9 + 1,26 = 47,16 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{общ}} = Q' + \Delta Q_{\text{тр}} = 41,45 + 7,56 = 49,01 \text{ кВА};$$

$$S_{\text{общ}} = \sqrt{(P_{\text{общ}})^2 + (Q_{\text{общ}})^2} = \sqrt{47,16^2 + 49,01^2} = 68 \text{ кВА}$$

6. Проверяем соотношение (21).

В нашем случае условие (21) не выполняется, т. е. $S_{\text{тр}} < S_{\text{общ}}$. В связи с этим по таблице Прил. 3 можно выбрать трансформатор большей мощности, а именно трансформатор типа ТМ-100/10, номинальной мощностью 100 кВА.

Однако такой выбор не будет оптимальным, так как трансформатор будет работать с большой недогрузкой. Более рациональным предоставляется использовать в данном случае два трансформатора меньшей мощности; мощность каждого из них при этом определяют, исходя из условия $S_{\text{тр}} = 0,65 \cdot S_{\text{общ}}$, где $S_{\text{общ}}$ – общая мощность стройплощадки, полученная в п.5 настоящего раздела.

Таким образом, исходя из вышесказанного, проводим окончательный выбор трансформатора:

$$S_{\text{тр}} = 0,65 \cdot S_{\text{общ}} = 0,65 \cdot 68 = 44,2 \text{ кВА} .$$

По приложению 3 выбираем два трансформатора типа ТМ-63/10 мощностью 63 кВА каждый.

ТЕМА 2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.

ТЕМА: РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: Приобрести практические навыки в сборке схемы и регулировке исполнительного двигателя постоянного тока при якорном способе управления; получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям о свойствах исполнительных двигателей постоянного тока.

Подготовка к работе

Повторить теоретический материал: назначение и особенности устройства исполнительных двигателей постоянного тока; якорное и полюсное способы управления, механические и регулировочные характеристики двигателей, зависимость полезной мощности от частоты вращения.

Подготовить в рабочей тетради таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Порядок выполнения работы:

Ознакомиться с конструкцией исполнительного двигателя и нагрузочного устройства; записать паспортные данные двигателя и данные измерительных приборов.

Подготовить таблицы для занесения результатов опытов и координатные сетки для построения графиков.

Собрать схему по рис. 4.1 и после проверки ее преподавателем выполнить пробный пуск двигателя, проверить возможность регулировки двигателя; определить напряжение трогания двигателя при якорном управлении.

Снять данные и построить механическую характеристику двигателя при якорном управлении.

Снять данные и построить регулировочную характеристику двигателя при якорном управлении.

Используя данные двигателя, полученные в п. 3, рассчитать параметры и построить график зависимости полезной мощности двигателя от частоты вращения.

Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

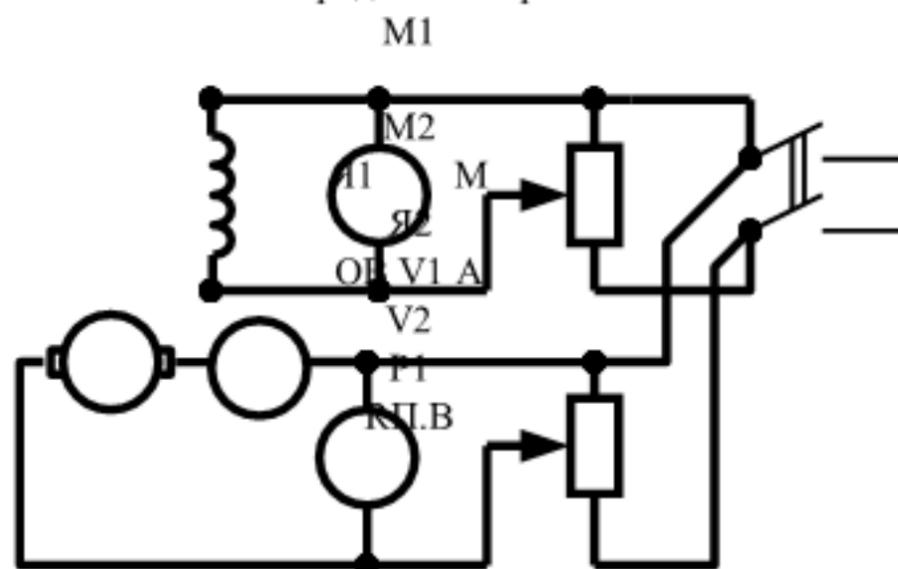


Рис. 4.1. Схема включения исполнительного постоянного тока

Схема включения и пробный пуск двигателя. Схема включения исполнительного двигателя (рис. 4.1) содержит два потенциометра: потенциометр $R_{п.в.}$ для создания на обмотке возбуждения номинального напряжения $U_{в.ном}$ и потенциометр

$R_{п.у.}$ для изменения напряжения на обмотке якоря (напряжения управления) $U_{у}$ в диапазоне от нуля до номинального значения $U_{у.ном}$.

Для измерения указанных напряжений в схеме предусмотрены два вольтметра: вольтметр $V1$ для измерения напряжения возбуждения $U_{в}$ и вольтметр $V2$ для измерения напряжения управления $U_{у}$. Кроме того, в схеме применен амперметр A для контроля за током в цепи управления $I_{у}$, который не должен превышать номинального значения.

Тип применяемого тормозного устройства определяется в основном мощностью исследуемого двигателя; при мощности до 20 Вт целесообразно применение ленточного тормоза маятникового типа, а при большой мощности - электромагнитного тормоза.

Для измерения частоты вращения желательно использовать строб тахометр, но при мощности более 50 Вт возможно применение тахометра часового типа или тахогенератора.

Собирают схему по рис. 4.1 и после проверки ее преподавателем выполняют пробный пуск двигателя. С этой целью движки потенциометров $R_{п.в}$ и $R_{п.у}$ ставят в положение, соответствующее минимальному напряжению, и включают рубильник $P1$. Затем потенциометром $R_{п.в}$ устанавливают в цепи обмотки возбуждения номинальное напряжение $U_{в.ном.}$. Если при этом якорь двигателя остается неподвижным, то это свидетельствует об отсутствии в двигателе самохода, т. е. соблюдении одного из основных требований, предъявляемых к исполнительным двигателям.

Постепенно повышают напряжение U_y до номинального значения и наблюдают за нарастающей частотой вращения двигателя. Затем напряжение U_y уменьшают до нуля, после чего очень медленно снова повышают до такого небольшого значения, при котором начинается вращение якоря. Измеренное при этом напряжение управления представляет собой напряжение трогания $U_{y.тр}$. Напряжение возбуждения при этом, как и при всех последующих опытах, должно сохраняться номинальным. При выполнении этого опыта по определению напряжения трогания в качестве вольтметра $V2$ следует применить вольтметр с небольшим пределом измерения не более $0,20 U_{у.ном.}$ Для получения более точного результата опыт повторяют три раза и получают три значения напряжения трогания $U_{y.тр1}$, $U_{y.тр2}$, $U_{y.тр3}$, а затем определяют среднее значение напряжения трогания (B)

$$U_{y.тр.ср.} = (U_{y.тр1} + U_{y.тр2} + U_{y.тр3}) / 3. \quad (4.1)$$

Механические характеристики. Механическая характеристика исполнительного двигателя представляет собой зависимость момента на валу от частоты вращения при неизменной величине сигнала, например, при номинальном напряжении сигнала. Данные для построения механической характеристики получают следующим образом. Потенциометрами $U_{п.в}$ и $R_{п.у}$ устанавливают номинальные напряжения возбуждения $U_{в.ном}$ и управления $U_{у.ном}$, и с помощью тормозного устройства затормаживают якорь двигателя. При этом измеряют начальный пусковой момент $M_п$ при $n=0$. Постепенно уменьшая нагрузку на вал двигателя вплоть до х. х. ($M_2 = 0$), через приблизительно одинаковые интервалы этого момента измеряют частоту вращения двигателя. Делают не менее пяти замеров, а результаты заносят в табл. 4.1. Полученные значения момента и частоты вращения пересчитывают в относительные единицы:

$$m = M_2 / M_п;$$

$$\gamma = n / n_0.$$

Таблица 4.1

Номер измерения	M_2 , Нм	n , об/мин	m	γ

этих выражениях начальный пусковой момент $M_п$ (при $n=0$) и частота вращения в режиме х. х. n_0 (при $M_2 = 0$) приняты за базовые величины. Полученные относительные значения момента m и частоты вращения γ , соответствующие коэффициенту сигнала $\alpha = U_y / U_{в.ном} = U_{у.ном} / U_{в.ном} = 1$, заносят в табл. 4.1 и строят механическую характеристику исполнительного двигателя постоянного тока $m=f(\gamma)$.

$$m = (DB/AB) / 100. \quad (4.3)$$

Регулировочная характеристика. Регулировочная характеристика исполнительного двигателя представляет собой зависимость частоты вращения от напряжения управления или же, переходя к относительным величинам, зависимость относительной частоты вращения γ от коэффициента сигнала $\alpha = U_y / U_{в.ном}$. Данные для построения регулировочной характеристики снимают при неизменной нагрузке на валу двигателя. В данной работе эти данные снимают в режиме х. х. ($M_2 = 0$).

Поставив потенциометр $R_{п.у}$ в положение, соответствующее $U_y = 0$, а потенциометр $R_{п.в}$ в положение, соответствующее $U_{в.} = U_{в.ном}$, постепенно повышают напряжение управления до номинального значения. При этом через приблизительно одинаковые интервалы этого напряжения измеряют частоту вращения двигателя. Всего делают не менее пяти замеров и заносят показания в табл. 4.2, а затем рассчитывают относительные значения измеренных величин: напряжение управления — коэффициент сигнала

$$\alpha = U_y / U_{в.ном}, \quad (4.4)$$

и относительную частоту вращения γ (4.2), где за базовую величину n_0 принимают частоту вращения в режиме х. х. при $\alpha = 1$, т. е. при $U_y = U_{у.ном}$.

Таблица 4.2

Номер измерений	Uy, В	n, об/мин	α	γ

Результаты вычислений заносят в табл. 4.2, строят регулировочную характеристику исполнительного двигателя постоянного тока при якорном управлении $\gamma = f(\alpha)$ и определяют ее нелинейность.

Зависимость полезной механической мощности двигателя от частоты вращения. Используя данные, приведенные в табл. 4.1, определяют полезную механическую мощность двигателя (Вт).

$$P_2 = 0,105M_2 \times n. \quad (4.5)$$

Результаты вычислений заносят в таблицу 4.3:

Таблица 4.3

γ					
P2., Вт					

По результатам вычислений строят графики $P_2=f(\gamma)$ при якорном способе управления исполнительным двигателем постоянного тока.

РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ

ТЕМА 3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И ОСВЕЩЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7.

ТЕМА: РАСЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЛОЩАДОК

Цель работы: Ознакомление с принципом расчета освещенности строительных площадок, характеристиками и методами исследования освещения.

Краткие теоретические сведения

Электрическое освещение строительных площадок и участков подразделяется на рабочее, аварийное (безопасности и эвакуационное) и охранное.

Рабочее освещение должно быть предусмотрено для всех строительных площадок и участков, где работы выполняются в ночное время и сумеречное время суток. Оно осуществляется установками общего освещения (равномерного или локализованного) и комбинированного (к общему добавляется местное).

Общее равномерное освещение применяют, если нормируемая величина освещенности не превышает 2 лк. В остальных случаях в дополнение к общему должно предусматриваться локализованное или местное освещение.

Для этого могут использоваться как светильники, так и прожекторы с разными типами ламп [2, п.1.6]. Как правило, применение прожекторного освещения для стройплощадок по сравнению с освещением светильниками предпочтительнее, поскольку оно более экономично, благоприятно для объемного видения (благоприятное соотношение вертикальной и горизонтальной освещенности), не загружает территорию столбами и воздушной проводкой и более удобно для обслуживания. Однако необходимо принимать меры по снижению слепящего действия прожекторов и исключению теней.

В общем случае при расчете прожекторного освещения необходимо: выбрать тип прожектора и лампы, определить необходимое их количество, высоту установки, места расположения прожекторных мачт и углы наклона оптической оси прожекторов в вертикальной и горизонтальной плоскости, обеспечивающие заданную нормами освещенность площадки.

В практике проектирования освещения стройплощадок применяют два метода: расчет по удельной мощности прожекторной установки и метод кривых равных значений относительной освещенности (изолукс).

Расчет по удельной мощности прожекторной установки регламентирован ГОСТ 12.1.046-85 [2, прил.3]. Выбор прожектора и лампы производится по таблицам, приводимым в литературе [2, прил.1; 3, табл.9-6; 7, табл.12.9; 8, табл.9.2]. В таблице 1 приведены параметры осветительных установок общего равномерного освещения при нормируемой освещенности $E_n = 2$ лк, в таблице 2 – при нормируемой освещенности $E_n = 0,5$ лк [2, прил.1].

Таблица 1

Параметры осветительных установок общего равномерного освещения при нормируемой освещенности $E_n = 2$ лк

Прожекторы с лампами накаливания											
100	15	70	ПЗС-35	6	500	15	15	15	0,60	0,86	
150	20	100	или	10		20			0,85	0,67	
150		300	ПСМ-40	10			12		0,70	0,84	
200		275	ПЗС-45	9	1000		18	20	0,75		
			или	10			12				
250		290	ПСМ-50	9			18			0,70	
300	30	250		13		30	10	15		0,61	
				9		17	20		0,80	0,61	
				13							
				9		10	15				
						17	20				
Прожекторы с лампами ДРЛ											
75	15	160	ПЗС-45	3	700	15	20	60	0,30	0,35	
100		160	или	4				40			0,35
150	20	150	ПСМ-50	4		20		20		0,25	0,45
200		180		7		30	15	15		0,40	0,40
250	30	200		10			10		0,40	0,45	
300		140		16						0,55	
				16							
Прожекторы с галогенными лампами типа КГ											
75		180	ПКН-1500-	3	1500	20		30	0,50	0,65	
100	20	160	2							0,55	
150		140								0,45	
200		175				15	20			0,45	

150		230								0,45
200	30	210		5		30		30	0,65	0,35
250		190								0,30
100	20	300	ИСУ-	3		20			0,65	0,40
150		200	01×2000/К-						0,56	0,40
200		160	-63-01		2000		12	50	0,68	0,38
250	30	280		6		30			0,71	0,44
300		230							0,68	0,35
200		390	ИСУ-							0,38
250	30	360	02×5000/К-	3	5000	30	12	45	0,70	0,34
300		260	-03-12							0,38
350		210								0,41

Прожекторы с лампами типа ДРИ

150		240	ПЗС-35						0,50	0,27
200	20	200	или	7		20		15	0,60	0,25
250		260	ПСМ-40		700		12		0,55	0,21
300	30	270		10		30		10	0,75	0,18
350		220							0,55	0,18

Светильники с ксеноновыми лампами

200	30	180	"Арвик" или ККУ					30		0,30	2,2
200	50	275									1,5
250		250						50	30	0,50	1,3
300		220									1,2
350		175									1,3

200	30	270	ОУКсН	2	20000	30	60	0,50		1,5
250		230								1,4
300		205								1,3
350		155								1,5
200	50	320				50	15	0,65		1,25
250		310								1,05
300		300								0,9
350		290								0,9
400		275								0,75

E_n – нормируемая освещенность, лк [2, табл. 1];

P_l - мощность лампы, Вт.

Таблица 3

Осветительные приборы	Коэффициент запаса при	
	лампах накаливания	газоразрядных источниках света
Прожекторы и др. световые приборы с усилением силы света 5-кратным и более	1,5	1,7
Светильники	1,3	1,5

Таблица 4

Ориентировочные значения коэффициента t

Источник света	Тип прожектора или светильники	Ширина освещаемой площади, м	Значения t при расчетной освещенности, лк	
			0,5 -1,5	2,0 -30,0
ЛН	ПЗС, ПСМ	75-150	0,90	0,30
		175-300	0,50	0,25
Галогенные ЛН	ПКН, ИСУ	75-125	0,35	0,20
		150-350	0,20	0,15
Лампы типа ДРЛ	ПЗС, ПЗМ	75-250	0,25	0,13
		275-350	0,30	0,115
Лампы типа ДРИ	ПЗС, ПСМ	75-150	0,30	0,10
		175-350	0,16	0,06
Ксеноновая	ОУКсН (H=30 м)	150-175	0,75	0,50

лампа ДКсТ-20000	"Арвик" (Н-30 м)	200-350	0,50	0,40
		150-175	0,90	0,70
	200-250	0,70	0,50	
Ксеноновая лампа ДКсТ- 10000	СКсН (Н= 20-30 м)	100-150	0,55	0,45
		175-250	0,40	0,35

Из условия ограничения слепящего действия минимальная допустимая высота установки прожектора (или наклонно расположенного светильника прожекторного типа) определяется по формуле [9]:

$$H = \sqrt{\frac{J_{\max}}{e}}$$

где J_{\max} - осевая сила света прожектора, кд [2, прил.4];

$E, \text{лк}$	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	10	30	50
c	100	150	250	300	400	700	2100	3500

Высота прожекторных мачт принимается из ряда 10, 12, 15, 20 или 30 м. При определении мест установки прожекторных мачт можно воспользоваться рекомендациями табл. 1 и 2, а также [2, прил.2]. Оптимальный угол наклона оптической оси прожекторов в вертикальной плоскости при освещении горизонтальной поверхности

находят по таблицам 1 и 2 или по формулам [9]:

$$\theta = \arcsin$$

$$\sqrt{\frac{m}{m + n \cdot (eh)^2}}, \quad /$$

где m и n – постоянные, которые зависят от углов рассеяния прожекторов в горизонтальной и вертикальной плоскостях:

$$m = \sin^2 \beta; \quad n = \frac{\pi \cdot \sin 2\beta_B \cdot \cos \beta_B \cdot \text{tg}^2 \beta_T}{2\Phi};$$

в

$$| \quad 2\Phi$$

здесь Φ - световой поток лампы;

h – высота установки прожектора;

e – нормируемая освещенность.

Более точно количество прожекторов и их размещение можно определить методом изолюкс [3, 9].

Рассчитать методом удельной мощности и методом изолукс потребное количество прожекторов для общего равномерного освещения строительной площадки по исходным данным табл.5 и разместить их на плане площадки. При этом минимальную освещенность принять: для вариантов 1...12 - 2лк; для вариантов 11...25 - 0,5 лк.

Таблица 5

Вариант	Размер площадки, м	Вид выполняемых работ	Тип прожектора	Тип лампы
1	75x75	Работы нулевого цикла	ПСМ-40А-1	Г220-500
2	100x75			
3	125x75			
4	150x75			
5	175x75			
6	100x100	Возведение здания высотой 15 м	ПСМ-50А-1	Г220-1000
7	125x100			
8	150x100			
9	175x100			
10	200x100			
11	125x125	Возведение здания высотой 18 м	ПЗР-250	ДРЛ-250
12	150x125			
13	175x125			
14	200x125			
15	225x125			
16	150x150	Работы нулевого цикла	ПЗР-400	ДРЛ-400
17	175x150			
18	200x150			
19	225x150			
20	200x150			
21	200x200	Возведение здания высотой 18 м	ПКН-1500	КГ220-1500
22	200x225			
23	200x250			
24	200x275			
25	200x300			

ТЕМА 3.3. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КРАНОВ И ПОДЪЕМНИКОВ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8.

ТЕМА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОЙ ЗОНЫ КРАНА. ЗАЩИТНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ ПОДКРАНОВЫХ ПУТЕЙ.

Рельсовые пути грузоподъемных кранов [9] должны быть заземлены (занулены) согласно действующим нормам сразу после их установки на место, до начала каких-либо работ. В системе с глухо заземленной нейтралью заземление (рис. 3.11) выполняется путем соединения металлоконструкций и рельсовых путей с нулевым проводом линии, являющейся источником электроэнергии для крана.

Для этого необходимо:

проложить соединительный проводник 7 (рис.3.11) между подключательным пунктом 10 и рельсовыми путями; концы этого проводника приварить к корпусу подключательного ящика 10 и к рельсу; корпус подключательного ящика 10 присоединить к нулевому проводу 12 питающей линии с помощью болта 11;

- соединить с помощью электросварки специальными перемычками 4 нитки рельсов в начале и в конце кранового пути, а также стыки рельсов (рис. 3.11, 3.12, 3.13).
- выполнить повторное заземление нулевого провода и присоединить его к рельсам.

Повторное заземление рельсового пути не производится, если кран получает электроэнергию по четырехжильному шланговому кабелю от отдельной передвижной электростанции, находящейся на расстоянии не более 50м и имеющей собственное заземляющее устройство. В этом случае нулевой провод кабеля соединяется с нитками рельсов.

Перемычки приваривают по нейтральной оси рельсов на расстоянии не менее 500мм от их концов. Приварка перемычек и соединительных проводников к подошвам рельсов не допускается.

Повторное заземление выполняется из трех расположенных треугольником вертикально погруженных заземлителей (рис.3.12). Расстояние между заземлителями должно быть не менее 3000мм.

Вертикальные заземлители забивают в предварительно вырытую траншею глубиной 600-700мм таким образом, чтобы оставались концы длиной 100-200мм, к которым привариваются перемычки. В качестве заземлителей применяют стальные трубы диаметром 50-75 и длиной 2500-3000мм или угловую сталь (50 X 50 и 60 X 60мм). Заземлители с помощью сварки соединяют металлическими перемычками на 150мм ниже уровня грунта.

Повторное заземление должно иметь сопротивление растеканию тока не более 10 Ом. Рельсы с повторным заземлением соединяют двумя проводниками с помощью сварки. Сварные швы покрывают битумом. После устройства заземления рельсового пути проверяют сопротивление растеканию тока заземляющей системы.

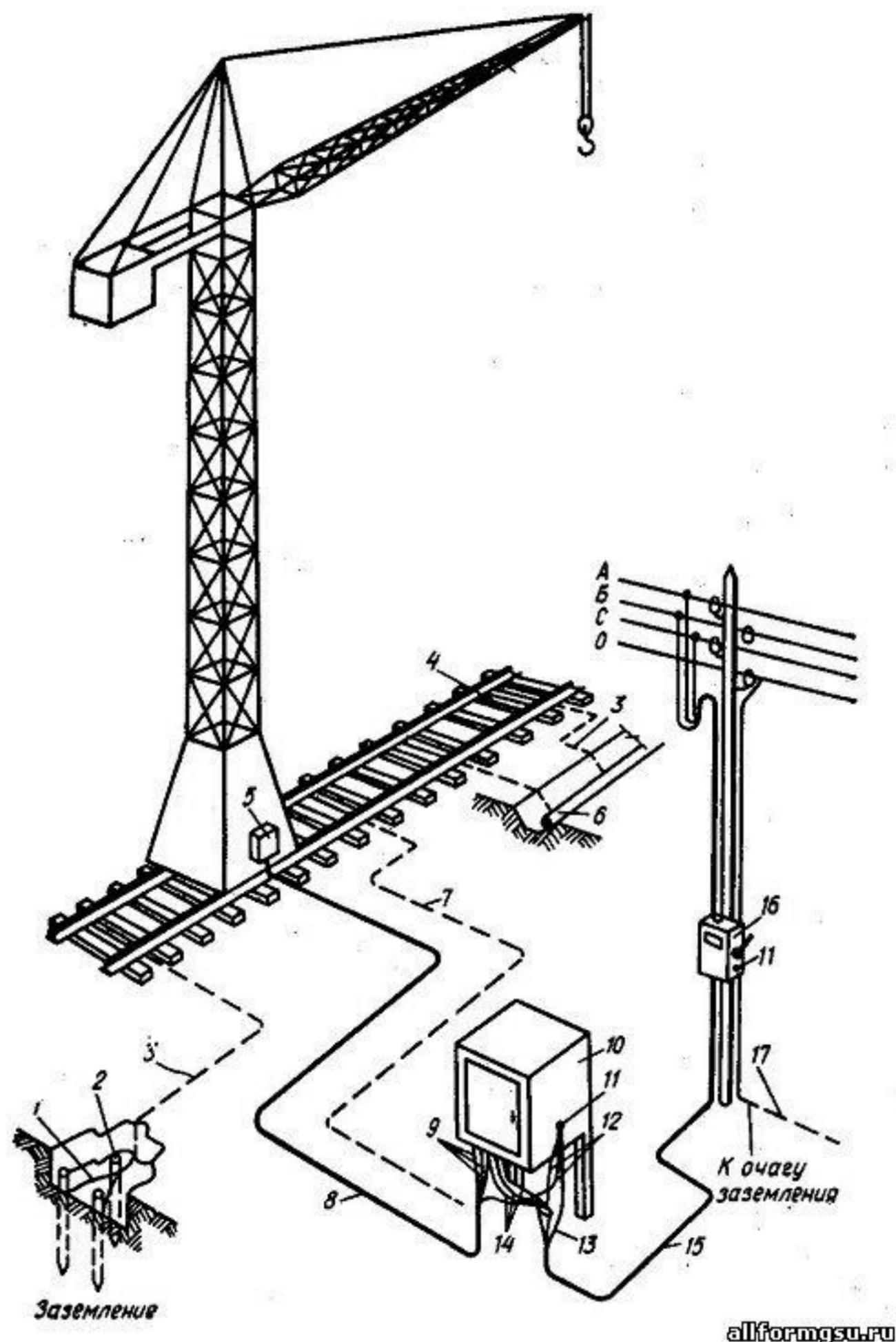


Рис. 3.11. Заземление башенного крана.

А, В, С — фазные провода линии; О, 12 — нулевые провода; 1 — сталь полосовая 40x4мм; 2 — стальная труба; 3 — заземляющий проводник (проволока диаметром 6мм); 4 — перемычка между нитками рельсов (приваривается); 5, 10 — подключательные ящики на кране и основной; 6 — труба, использованная как заземлитель; 7 — проводник, соединяющий металлический корпус подключательного пункта крана с нитками рельсов; 8 — гибкий шланговый четырехжильный кабель; 9 — фазные провода гибкого кабеля; 11 — заземляющий болт; 13 — проводник, заземляющий изоляцию кабеля; 14 — фазные провода питающего кабеля; 15 — питающий четырехжильный кабель; 16 — рубильник разрыва; 17 — заземляющий проводник.

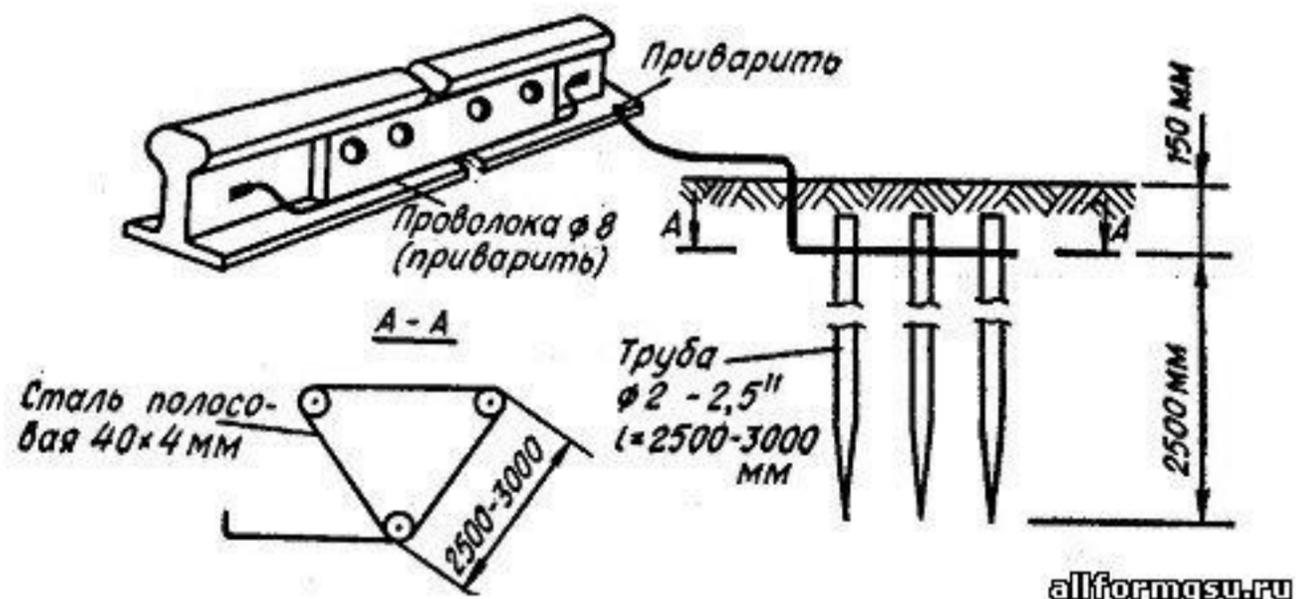


Рис. 3.12. Соединение стыка и присоединение повторного контура заземления к рельсу.

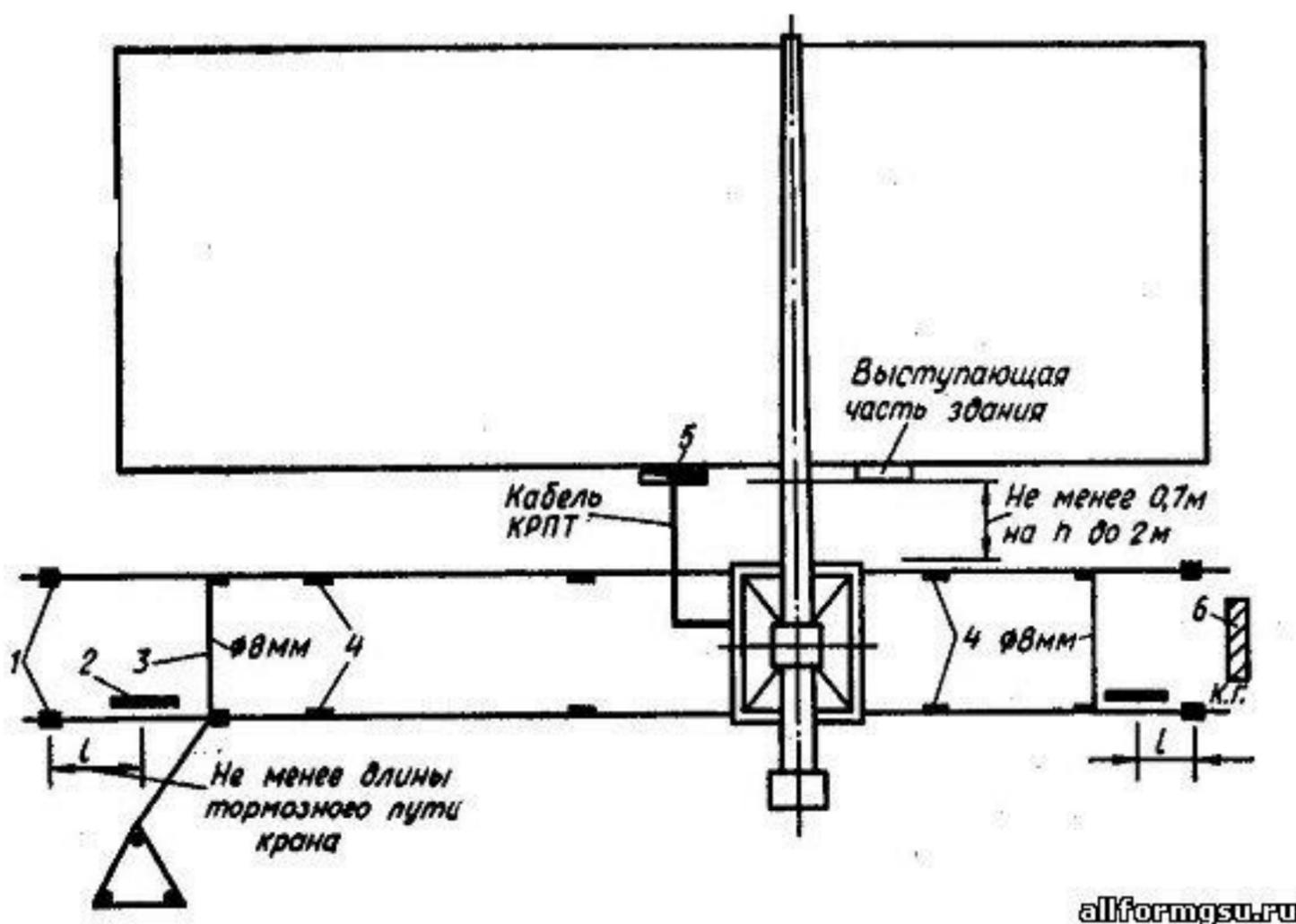


Рис. 3.13. План кранового пути.

1 – тупиковые упоры; 2 – линейка, отключающая движение крана; 3 - перемычка между нитками рельсов; 5 – подключательный ящик; 6 – контрольный груз.

ТЕМА 3.4. ЭЛЕКТРОПРОГРЕВ БЕТОНА И ГРУНТА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9.

Тема: Выбор метода прогрева бетона, грунта, трубопровода и т.д. Определенного объема

Цель работы: Ознакомление с принципом методом прогрева бетона

Краткие теоретические сведения

В настоящий момент в практике строительства существует проблема производства бетонных работ в зимнее время при отрицательных температурах. В результате общего ознакомления с ней, была сформулирована тема: «Методы расчета параметров прогрева бетона при помощи греющих проводов».

Актуальность проблемы и значимость работы:

1. рост заинтересованности в быстром и недорогом строительстве
2. использование монолитных конструкций, подъем экономики;
3. использование наиболее технологичного и безопасного метода с учетом особенностей региона: около 50% времени приходится на низкие температуры;
4. малая изученность вопроса;

Основные части любого бетона это щебень, песок, цемент и вода. Процесс бетонирования – процесс перехода бетона из жидкой фазы в твердую. Но для успешного перехода необходимы определенные условия. При нормальных условиях (температура +15°C во влажной среде) гидратация зерен цемента начинается с их поверхности, образуя при этом цементный клей в виде водного гидросиликата кальция. Затем реакция переходит на более глубоко расположенные слои зерен цемента вследствие отсасывания ими воды. Гель поверхностных слоев, постепенно обезвоживаясь, все плотнее и крепче стягивается, достигает полной водонепроницаемости и превращается в твердый гель – цементный камень. Таким образом, зерно цемента превращается как бы в орешек, имеющий затвердевшую оболочку и нетронутое ядрышко, которое не участвовало в реакции гидратации.

Процесс гидратации экзотермический. В 28-дневном возрасте при нормальной температуре гидратированная часть зерна цемента составляет 12% от всего объема. При повышении температуры большая часть цементного зерна гидратирует, увеличивается скорость гидратации. Заметно повышается прочность бетона, сокращается период времени, за который бетон дойдет до марки. (Марка бетона – это его средняя прочность на сжатие в кг/см², достигнутая за 28 суток при твердении в нормальных условиях). В результате реакции гидратации выделяется большое количество теплоты.

Если по какой либо причине произойдет повышение температуры выше допустимой (выше 80°C), то свободная вода начнет интенсивно испаряться, оставляя поры и снижая плотность бетона. Если же во время этого процесса температура понизится ниже допустимой (ниже 5°C), что возможно в условиях зимнего бетонирования, то несвязанная вода начнет замерзать, т.е. создавать свои структуры и своими связями разрушать связи зерен цемента. И в том, и в другом случае прочностные показатели резко снижаются.

Очевидна необходимость прогрева бетона в период низких температур, а т.к. с ростом температуры реакции растет ее скорость, прогрев бетона может применяться в любое время для скорейшего достижения бетоном марки. Чем быстрее твердеет бетон, тем скорее представляется возможность освободить опалубку, обогревательные приборы, утеплительные приспособления и материалы, а также сократить расход топлива или энергии, перебросить технический персонал и рабочих на другой участок и приступить к работам, ведение которых невозможно до распалубки.

1. Обогрев бетона с применением греющих проводов

Сущность метода заключается в том, что в бетон укладываются провода со стальной жилой диаметром 1,1 – 1,8 мм в полиэтиленовой или поливинилхлоридной изоляции, которые при прохождении по ним сильного тока, за счет сопротивления выделяют тепло. Т.к. провода в изоляции, электропроводность бетона не играет никакой роли в процессе обогрева. Арматура, в отличие от метода, когда ток проходит через бетон, также не влияет на ход прогрева.

Электропрогрев следует применять для конструкций, как правило, с модулем поверхности $M_n \geq 5$ ($M_n = S_{\text{пов}}/V$). Обогрев бетона нагревательными проводами позволяет при температуре наружного воздуха до -40°C возводить монолитные фундаменты, стены, колонны и т.п., заделывать стыки сборных железобетонных элементов и пр.

Нагревательные провода размещаются в соответствии с технологическими картами после установки арматуры, закладных деталей и завершения электросварки арматуры. В монолитных железобетонных конструкциях они навиваются на арматурный каркас без натяжения, в бетонных – на инвентарные шаблоны. Нагревательные провода размещаются в один или несколько рядов. Греющие провода должны размещаться в теле бетона, иначе они сгорят. Они не должны касаться опалубки или соприкасаться с деревянными закладными деталями. Выводы греющих элементов из бетона должны быть увеличены в сечении провода в 2-3 раза подсоединением кусков медных проводов с изоляцией места подсоединения. Подключение выводов греющих элементов к инвентарным соединениям питающей сети необходимо производить только после проверки их сопротивления мегомметром. Необходимо обеспечить равномерную загрузку фаз низкой стороны подстанции.

Усредненные значения расхода нагревательного провода на 1 м^3 бетона - 60 м, трудоемкости – 0,6 чел/ч, расхода электроэнергии – 4,8 кВт/ч.

1.1. Превращение электрической энергии в тепловую

Метод осуществляется при пониженных (от 50 до 110 В) напряжениях и высокой силе тока. Возможно применение как постоянного, так и переменного тока. Применяются однофазный или трехфазный переменный ток нормальной частоты (50 Гц). Для использования низкого напряжения необходимы понизительные трансформаторы типа ТМОБ-63 или КТПТО-80.

В расчетах необходимо учитывать, что при расходе электроэнергии в 1 кВт/ч выделяется 864 ккал тепла. Удельная теплоемкость бетона – 620 ккал/м^3 на градус. Между превращением электрической энергии в тепловую существует зависимость:

$$Q = 864 Pt = 864 IUt = 864 I^2Rt = 864 U^2t/R \text{ кал,}$$

где: Q – выделившееся тепло, P – мощность, t – время в часах, I – сила тока,

U – напряжение,
R – сопротивление проводника.

Отсюда следует, что количество выделяемого током в бетоне тепла прямо пропорционально квадрату напряжения тока и обратно пропорционально сопротивлению прогреваемого элемента. Таким образом, температура прогрева бетона находится в непосредственной зависимости от его сопротивления и напряжения тока.

1.2. Выпаривание влаги

Нельзя допускать резких местных перегревов, вызывающих вредное для бетона интенсивное испарение влаги. Причиной выпаривания влаги являются разность парциальных давлений паров в бетоне и окружающей среде и малая влажность последней. Интенсивность выпаривания зависит от температуры и длительности прогрева, M_n элемента, степени армирования, плотности бетона (чем она меньше, тем выпаривание больше) и, наконец, от способа утепления. При неблагоприятных значениях указанных факторов выпаривание может оказаться настолько большим, что бетон получится пересохший. Этого можно избежать, если

бетон тщательно провибрировать после укладки, укрыть матами, досками и применять умеренные температуры прогрева для легких конструкций. Увлажнение бетона, частично предохраняющее его от высыхания, является крайне желательным, но практически часто трудно осуществимо.

В зимнее время обязательно устройство легкого шатра, защищающего место работы от ветра и снега. Такой шатер повышает производительность труда, уменьшает потери через рабочий настил и предохраняет укладываемый бетон от непосредственного воздействия мороза.

1.3. Режим прогрева бетона

Электропрогрев можно начинать только после завершения укладки бетона и размещения всех греющих элементов и нижней части выводов в бетоне, выполнения указаний охраны труда и техники безопасности. В конструкциях необходимо сделать скважины для замера температуры.

Включать ток следует не позднее чем через 1,5 – 2 часа после укладки бетона при температуре в нем не ниже +5°C. При этом чем ниже температура бетона в момент включения тока, тем больше расход энергии. Интенсивность подъема и понижения температуры в обычных железобетонных конструкциях должна не превышать значения коэффициента модуля поверхности M_n и не быть выше 15°C в час при подъеме и 10°C в час при понижении.

С помощью токоизмерительных клещей измерить пусковую силу тока во всех греющих элементах. При значениях показаний, превышающих допустимые в момент пуска, необходимо понизить напряжение в сети.

Предельная температура изотермического прогрева бетона не должна превышать 70°C во избежание пересушивания бетона. Температура в разных точках прогреваемого элемента не должна отличаться по длине его более чем на 15°C и по сечению – более чем на 10°C. Колебания температуры в элементе в период изотермического прогрева не должны превышать 10°C. В целях экономии расхода электроэнергии бетон в процессе прогрева должен быть защищен от излишней потери тепла и влаги.

В пределах зоны работ на видном месте должны быть установлены сигнальные лампочки, загорающиеся при пуске тока в линию.

1.4. Мощность, необходимая для прогрева бетона

Удельная мощность, необходимая в период подъема температуры бетона для последующего прогрева при 80°C, находится по таблице:

Скорость подъема температуры бетона, °C/ч	Температура воздуха, °C	Удельная мощность, кВт/м ³ , при температуре последующего прогрева в 80°C и модуле поверхности			
		6	10	15	20
5	-10	3,8	4,6	5,6	6,5
	-20	4	4,9	6	7,1
	-30	4,2	5,07	6,4	7,6
10	-10	7,6	8,6	9,7	10,9
	-20	7,8	8,7	10,1	11,5
	-30	7,9	9,1	10,6	12
15	-10	11,4	12,5	13,9	15,3
	-20	11,7	12,8	14,3	15,9
	-30	11,7	13,1	14,7	16,4

Удельная мощность, необходимая в период изотермического прогрева бетона при температуре 80°C, находится по таблице:

Температура воздуха, °C	Удельная мощность, кВт/м ³ , при температуре прогрева 80°C и модуле поверхности			
	6	10	15	20
-10	1,4	2,4	3,6	4,8
-20	1,6	2,7	3,4	5,3

-30	1,8	2,9	4,4	5,9
-----	-----	-----	-----	-----

Установочная мощность в подстанциях зависит от напряжения при обогреве бетона и определяется по таблице:

ТМОБ-63	Сила тока, А	520			301		
	Напряжение, В	49	60	70	85	103	121
	Установочная мощность, кВт	45,5	53,5	63	45,5	53,6	63
КТШТО-80	Сила тока, А	520			471		
	Напряжение, В	55	65	75	85	95	
	Установочная мощность, кВт	49,5	58,5	61	69,3	77,4	

В зависимости от планируемых суточных объемов укладки бетона и требуемой для электропрогрева электрической мощности необходимо определить количество требуемых подстанций.

Характеристика греющих проводов определяется их длиной, диаметром, электрическим сопротивлением стальной жилы провода. Зная необходимую для прогрева мощность, находим необходимую длину греющих проводов.

РАЗДЕЛ 4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ
ТЕМА 4.1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10.

ТЕМА: СНЯТИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: научиться снимать опытным путём входные и выходные характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и определять его параметры.

Материальное обеспечение:

Макет для снятия характеристик транзистора, в котором смонтированы:

- а) источник питания;
- б) транзистор типа П13;
- в) вольтметр постоянного тока 0,5В;
- г) вольтметр постоянного тока 12В;
- д) миллиамперметр постоянного тока 1 мА;
- е) миллиамперметр постоянного тока 50мА.

Содержание работы:

Полупроводниковым транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя р-п- переходами, разделяющими полупроводники с разным характером примесной проводимости: п-р или р-п, где п-область с электронной проводимостью, р-область с дырочной проводимостью.

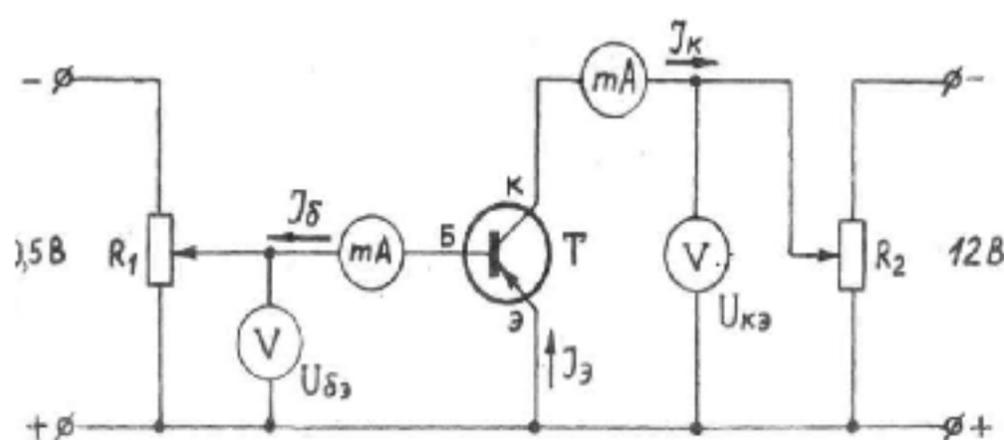
Смежные области, отделенные друг от друга р-п - переходами, называются эмиттер Э, база Б и коллектор К.

Наиболее распространённым является транзистор типа р-п-р, у которого база (средняя область) обладает электронной проводимостью. Возможны три основные схемы Включения транзистора: с общей базой ОБ, с общим эмиттером ОЭ и общим коллектором ОК.

Наибольшее распространение имеет схема с общим эмиттером ОЭ, как наиболее выгодная.

В схеме с ОЭ входным током является ток базы I_b , а выходным — ток коллектора I_k . Ток эмиттера равен сумме токов I_b и I_k : $I_э = I_b + I_k$. Зависимости между током и напряжением входной и выходной цепях транзистора определяются его входными и выходными статическими характеристиками.

Входная характеристика представляет собой зависимость тока базы I_b от напряжения между базой и эмиттером $U_{бэ}$ при напряжении $U_{кэ} = \text{const}$ $I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

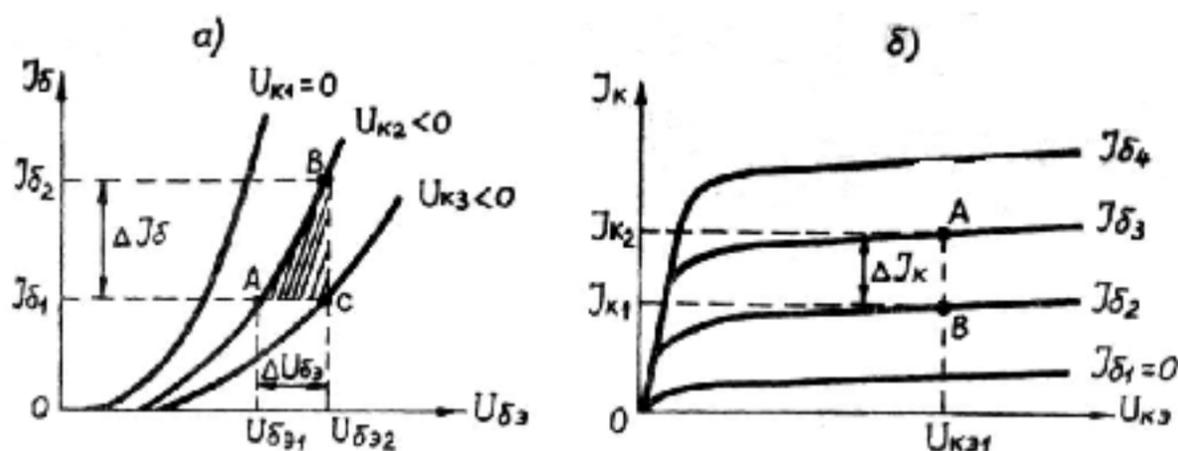


Выходной характеристикой является зависимость тока коллектора I_k от напряжения между коллектором и эмиттером $U_{кэ}$ при токе базы $I_b = \text{const}$.

$I_k = f(U_{кэ})$ при $I_b = \text{const}$.

Входные (а) и выходные (б) статические характеристики транзистора в схеме с ОЭ имеют вид:

Схема соединения:



По характеристикам транзистора определяются его параметры:

а) Входное сопротивление транзистора $R_{вх}$:

$$R_{вх} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_{бэ}} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{I_{бэ2} - I_{бэ1}} \text{ при } U_{кэ2} = const$$

$R_{вх} = h_{11}$

б) коэффициент усиления по току β : $\beta = \frac{\Delta I_{кэ}}{\Delta I_{бэ}} = \frac{I_{кэ2} - I_{кэ1}}{I_{бэ2} - I_{бэ1}}$ при $U_{кэ1} = const$; $\beta = h_{21}$

Коэффициент усиления по току α этого транзистора, включенного по схеме с ОБ,

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

определяется по формуле:

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с макетом и приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их технические данные в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	Наименование	Номинальные значения или пределы измерений	Цена деления	Класс точности	Заводской номер

2. Включить макет в сеть переменного тока с напряжением 220В.

Включить ток и снять три входные характеристики транзистора, изменяя напряжение $U_{бэ}$ от 0 до 0,3 В через 0,05 В с помощью потенциометра R1 при неизменных $U_{кэ1}=0$, $U_{кэ2}=-5В$, $U_{кэ3}=-7В$.

Полученные значения тока базы $I_{бэ}$ и напряжения $U_{бэ}$ занести в таблицу 2:

Таблица 2

№ изм	$U_{кэ1} = 0$		$U_{кэ2} = -5 В$		$U_{кэ3} = -7 В$	
	$U_{бэ}$ В	$I_{бэ}$ мА	$U_{бэ}$ В	$I_{бэ}$ мА	$U_{бэ}$ В	$I_{бэ}$ мА
1	0		0		0	
2	0,05		0,05		0,05	
3	0,1		0,1		0,1	

4	0,15		0,15		0,15	
5	0,2		0,2		0,2	
6	0,25		0,25		0,25	
7	0,3		0,3		0,3	

5. Снять три выходные характеристики транзистора, изменяя напряжение $U_{кэ}$ от 0 до -8 В через 1В с помощью потенциометра R2 при неизменных значениях тока базы $I_{б1} = 0,2\text{мА}$, $I_{б2} = 0,4\text{мА}$, $I_{б3} = 0,6\text{мА}$.

Выключить ток.

6. Полученные значения тока коллектора $I_{к}$ и напряжения $U_{кэ}$ занести в таблицу 3:

Таблица 3

№ изм.	$I_{б1} = 0,2\text{мА}$		$I_{б2} = 0,4\text{мА}$		$I_{б3} = 0,6\text{мА}$	
	$U_{кэ}$ В	$I_{к}$ мА	$U_{кэ}$ В	$I_{к}$ мА	$U_{кэ}$ В	$I_{к}$ мА
1	0		0		0	
2	1		1		1	
3	2		2		2	
4	3		3		3	
5	4		4		4	
6	5		5		5	
7	6		6		6	
8	7		7		7	
9	8		8		8	

7. Построить на одном координатном поле семейство входных характеристик транзистора $I_{б} = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ и определить по ним входное сопротивление транзистора $R_{вх}$.

8. Построить на одном координатном поле семейство выходных характеристик транзистора $I_{к} = f(U_{кэ})$ при $I_{б} = \text{const}$ и определить по ним коэффициент усиления по току β , а затем коэффициент усиления α .

9. Составить отчет и предъявить его руководителю следующем занятии.

Контрольные вопросы:

Что такое биполярный транзистор?

Области биполярного транзистора.

Условно-графическое обозначение транзистора.

Какие типы биполярных транзисторов существуют?

Какие характеристики называют входными, а какие выходными?

Параметры транзистора.