

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)
Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2017 г.

**ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

методическое указание к выполнению лабораторной работы

по теоретическим основам электротехники

для студентов направления подготовки

«Электроэнергетика и электротехника»

УДК 621.301

Составитель Л.В. Плесконос

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения *А.Л.*

Овчинников

Простая цепь переменного тока. Методические указания по выполнению лабораторной работы по теоретическим основам электротехники для студентов направления подготовки "Электроэнергетика и электротехника"/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Л.В. Плесконос. г. Курск, 2017, 18 с.: ил. 13, табл. 3. Библиогр.: с.18.

Излагаются методические указания и теоретический материал, необходимый для выполнения работы.

Предназначены для студентов направления подготовки

"Электроэнергетика и электротехника"

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *3.04.17* Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л., *0,8* Уч.-изд. л. *0,7* Тираж 150 экз. Заказ *459* Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

Цель работы.

1. Экспериментальное подтверждение законов Ома и Кирхгофа.
2. Исследование распределение токов и напряжений в цепи при различной конфигураций схемы.
3. Построение векторных и топографических диаграмм.

Содержание работы.

В работе по опытным данным определяются параметры отдельных участков и всей заданной простой цепи. Затем, на основе сопоставления измеренных и рассчитанных по параметрам участков характеристик выполняется проверка законов сложения для последовательного и параллельного соединений и обобщение на случай смешанного соединения.

1. Основные теоретические положения.

Резистор в цепи синусоидального тока.

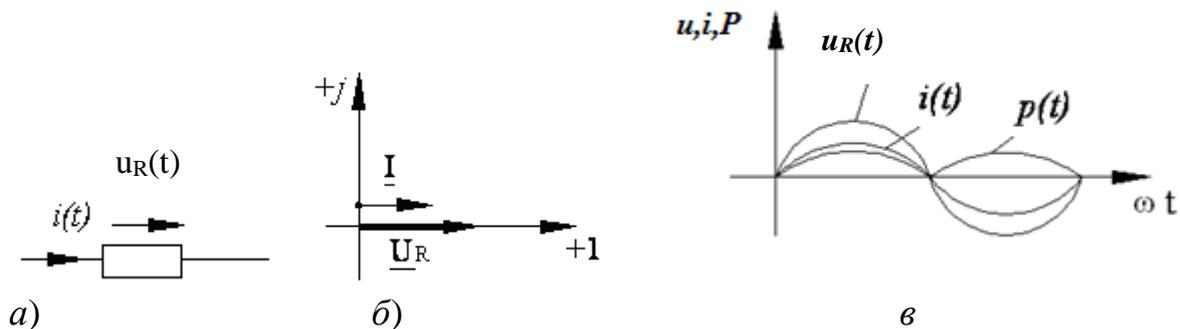


Рис. 1.1. Векторная и волновая диаграмма цепи с резистором.

На (рис. 1.1а) изображен резистор сопротивления R , по которому течет ток $i(t) = I_m \sin \omega t$.

По закону Ома напряжение на резисторе:

$$u_R(t) = i(t) \cdot R = RI_m \sin \omega t \text{ или } u_R(t) = U_m \sin \omega t, \text{ где } U_m = RI_m$$

Мгновенная мощность.

$$p = U_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t).$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую $\frac{U_m I_m}{2}$ и переменную

$$\frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t, \text{ изменяющуюся с частотой } 2\omega.$$

Активная мощность P равняется среднему значению мгновенной мощности P за период.

$$P = UI \cos \varphi,$$

где действующее значение соответственно напряжения и тока равны

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

φ - угол сдвига фаз между током и напряжением.

На рис. 1.1в даны кривые мгновенных значений тока i , напряжение u и мгновенной мощности p . Из рис 1.1в видно, что в цепи синусоидального тока с резистором, ток i и напряжение на резисторе u_R совпадают по фазе.

Комплекс действующего значения тока и напряжения

$$\underline{I} = I e^{j\varphi}, \quad \underline{U}_R = U e^{j\varphi},$$

В рассматриваемом случае $\varphi=0$, тогда $\underline{I} = I$, $\underline{U}_R = U$.

Векторная диаграмма тока и напряжения изображена на рис. 1.1б. Так как $U=RI$, то комплексы напряжения и тока в цепи с активным сопротивлением связаны соотношением $\underline{U}_R = R\underline{I}$.

Индуктивная катушка в цепи синусоидального тока.

Любая обмотка (катушка) обладает некоторой индуктивностью L и активным сопротивлением R . Рассмотрим одну индуктивность L (без активного сопротивления) – рис. 1.2а.

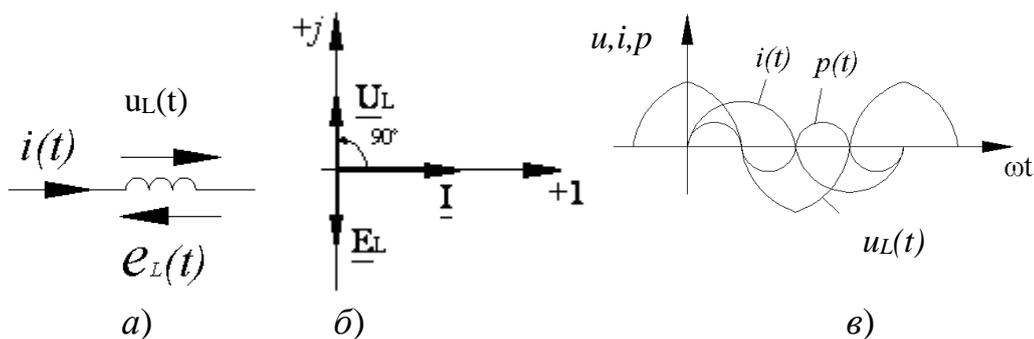


Рис. 1.2. Векторная и волновая диаграмма цепи с индуктивностью.

Если через L течет ток $i = I_m \sin \omega t$, то в катушке наводится ЭДС

самоиндукции:

$$\ell_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Напряжение на индуктивности $u_L = -\ell_L = L \frac{di}{dt}$.

$$u_L = -\omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $U_m = X_L I_m$, $X_L = \omega L$ [Ом] - индуктивное сопротивление.

Напряжение на индуктивности опережает ток на 90° (рис. 1.2в)

Мгновенная мощность (рис. 1.2в)

$$p = u \cdot i = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

Она проходит через нулевое значение, когда через нуль проходит либо u , либо i . Площадь, ограниченная кривой p и осью абсцисс за это время, представляет собой энергию, которая взята от источника питания на создание энергии магнитного поля в индуктивной катушке. Во вторую четверть периода, когда ток в цепи уменьшается от максимума до нуля, энергия магнитного поля отдается обратно источнику питания, при этом мгновенная мощность отрицательна. Энергия то периодически забирается индуктивной катушкой от источника, то отдается ему обратно. Таким образом, за полный период T , как видно из графика, средняя (активная) мощность в индуктивности равна нулю, т.е. никаких превращений электрической энергии в тепловую или механическую не будет. Чтобы оценить с количественной стороны меру скорости такого обмена энергий между источником и индуктивностью, вводят понятие реактивной мощности Q

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Реактивная мощность для цепи с индуктивностью определяется также по формуле

$$Q = I^2 X_L = U^2 b_L.$$

Комплекс действующего значения тока и напряжения:

$$\underline{I} = I e^{j\varphi}, \quad \underline{U} = U e^{j(\varphi+90^\circ)} = X_L I e^{j\varphi} e^{j90^\circ} = j X_L \underline{I}.$$

При $\varphi=0$, $\underline{I} = I$. Их векторная диаграмма изображения на рис. 1.2б.

Таким образом, комплексы действующих напряжения и тока в цепи с индуктивностью связаны соотношением:

$$\underline{U}_L = jX_L \underline{I}.$$

jX_L - комплексное индуктивное сопротивление.

Конденсатор в цепи синусоидального тока.

Если приложенное к конденсатору ёмкостью C напряжение не меняется во времени, то заряд $+q = Ci$ на одной его обкладке и заряд $-q = -Ci$ на другой неизменны и ток через конденсатор не проходит ($i = \frac{dq}{dt} = 0$).

Если же напряжение на конденсаторе меняется во времени, например по синусоидальному закону: $u_c(t) = U_m \sin \omega t$, то по синусоидальному закону будет меняться и заряд q конденсатора:

$q = cu = C U_m \sin \omega t$ и конденсатор будет периодически перезаряжаться. Периодическая перезарядка конденсатора сопровождается протеканием через него зарядного тока

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_m \sin \omega t) = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $I_m = \frac{1}{X_c} \cdot U_m$, $X_c = \frac{1}{\omega C}$ [Ом] - ёмкостное сопротивление.

т.е, ток через конденсатор опережает по фазе напряжение на конденсаторе на 90° (рис. 1.3а).

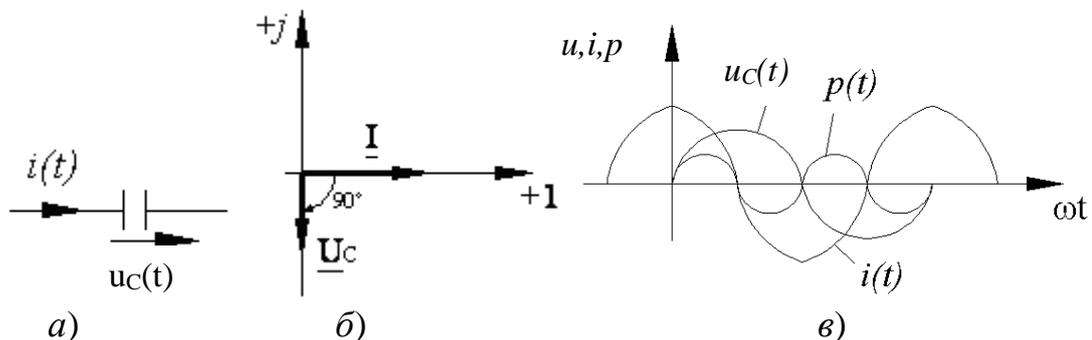


Рис.1.3. Векторная и волновая диаграмма цепи с емкостью.

Мгновенная мощность (рис. 1.3в)

$$p = u \cdot i = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t.$$

Как и для цепи с индуктивным, так и с ёмкостным сопротивлением, активная(средняя) мощность равна нулю, а реактивная мощность определяется по формуле:

$$Q=UI\sin\varphi=I^2X_c=U^2bc.$$

Комплекс действующего значения напряжения и тока:

$$\underline{U}_C = Ue^{j\varphi}, \text{ при } \varphi=0, \underline{U}_C = U .$$

$$\underline{I} = \frac{U}{X_C} e^{j(\varphi+90^\circ)} = j \frac{1}{X_C} \underline{U}_C .$$

Откуда $\underline{U}_C = -jX_C \underline{I}$,

где $-jX_C$ - комплексное емкостное сопротивление.

Векторная диаграмма цепи с емкостью показана на рис. 1.3б.

Широкое распространение на практике получил символический или комплексный метод расчета цепей синусоидального тока. Сущность символического метода расчета состоит в том, что при синусоидальном токе можно перейти от уравнений, составленных для мгновенных значений и являющихся дифференциальными и к алгебраическим уравнениям, составленным относительно комплексных значений тока и напряжений.

Для цепи (рис.1.4) составляем уравнение в комплексной форме

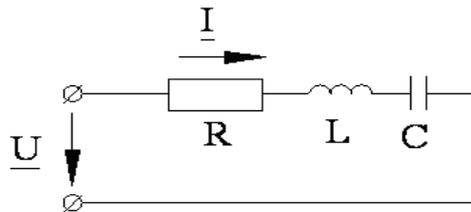


Рис. 1.4. Схема к расчету цепи символическим методом.

$$\underline{U} = \underline{I}R + jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I} = \underline{I}Z. \quad (1.1).$$

$$\underline{U} = \underline{I}Z.$$

Закон Ома для цепи в комплексной форме,
где $Z = R + j(X_L - X_C) = (R + jX)$ - полное комплексное сопротивление,

jX_L - комплексное индуктивное сопротивление,

$-jX_C$ - комплексное емкостное сопротивление.

$X = X_L - X_C$ - реактивное сопротивление, R - активное сопротивление.

Для расчета цепей синусоидального тока применяются те же методы расчета, которые используются для расчета цепей постоянного тока (законы Кирхгофа, метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод

эквивалентного генератора и т.д.). Только токи, напряжения, сопротивления элементов записываются в комплексной форме.

Комплексная проводимость

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} = g - jb,$$

где $g = \frac{R}{R^2 + X^2}$ - активная проводимость,

$b = \frac{X}{R^2 + X^2}$ - реактивная проводимость.

Закон Ома

$$\underline{I} = \underline{U} \underline{Y}. \quad (1.2)$$

В показательной форме записи комплексного числа

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} e^{j\varphi},$$

где φ - угол сдвига фаз между током и напряжением.

Из уравнения (1.1) и (1.2):

$$\underline{U} = \underline{I} \underline{Z} = \underline{I} R + j \underline{I} X = \underline{U}_a + j \underline{U}_p,$$

где $\underline{U}_a = \underline{I} R$ - активная составляющая напряжения,

$\underline{U}_p = \underline{I} X$ - реактивная составляющая напряжения.

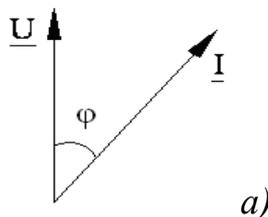
$$\underline{I} = \underline{U} \underline{Y} = \underline{U}_g - j \underline{U}_b = \underline{I}_a + j \underline{I}_p,$$

где $\underline{I}_a = \underline{U}_g$ - активная составляющая тока,

$\underline{I}_p = \underline{U}_b$ - реактивная составляющая тока.

Треугольники напряжения, сопротивления, тока и проводимости.

Пусть для некоторого режима заданного участка цепи известна векторная диаграмма (рис. 1.5a).



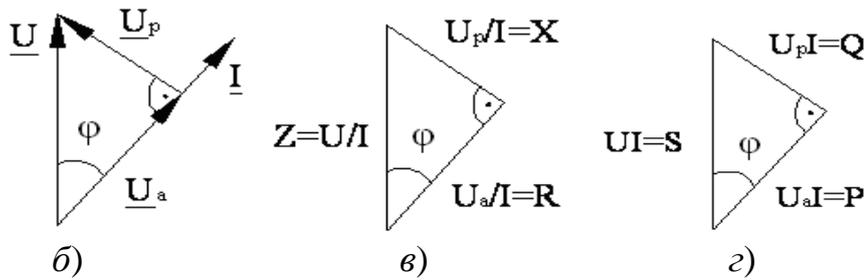


Рис. 1.5. Векторная диаграмма.

Проектируя вектор напряжения на вектор тока, получают треугольник напряжений (рис. 1.5б),

где \underline{U}_a - активная составляющая напряжения,

\underline{U}_p - реактивная составляющая напряжения.

Из треугольника напряжений следует, что

$$\underline{U}_a = U \cos \varphi; \quad \underline{U}_p = U \sin \varphi.$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_p}{U_a}.$$

Разделив все стороны треугольника напряжения на величину тока, получают треугольник сопротивлений (рис. 1.5в).

В треугольнике сопротивлений:

$$R = Z \cos \varphi; \quad X = Z \sin \varphi.$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}.$$

Умножая все стороны треугольника напряжений на величину тока, получают треугольник мощностей (рис. 1.5г).

Из треугольника мощностей:

Полная мощность $S = UI$; $U_a I = P$ - активная мощность, $U_p I = Q$ - реактивная мощность.

Из треугольника мощностей:

$$P = S \cos \varphi; \quad Q = S \sin \varphi.$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}.$$

Треугольники напряжения, сопротивления, мощности.

Если на векторной диаграмме (рис.1.6а) спроектировать вектор тока на вектор напряжения получим треугольник тока (рис. 1.6б).

Из треугольника тока:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi.$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}.$$

Разделив все стороны треугольника токов на напряжение получают треугольник проводимости (рис. 1.6в), где

$$Y = \frac{I}{U}, \quad g = \frac{I_a}{U}, \quad b = \frac{I_p}{U}.$$

Из треугольника проводимостей:

$$g = Y \cos \varphi; \quad b = Y \sin \varphi.$$

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}.$$

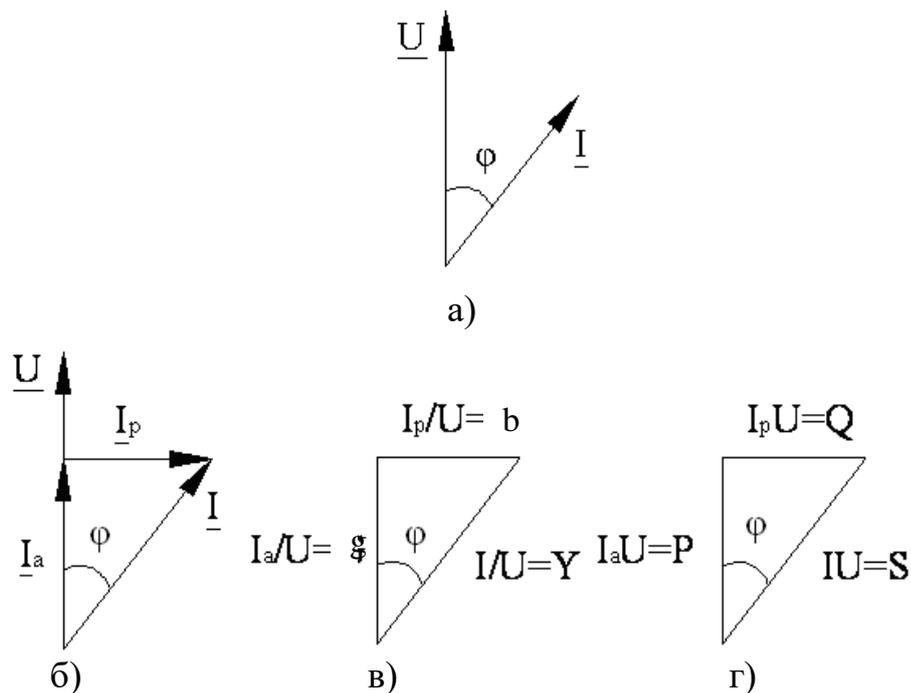


Рис. 1.6. Векторная диаграмма.

Треугольники токов, проводимости, мощности.

Формулы показывают, что в цепи переменного тока (в отличие от цепи постоянного тока) в общем случае $R \neq (1/g)$ и $g \neq (1/R)$ (и также $X \neq (1/b)$ и $b \neq (1/X)$).

Знаки реактивных составляющих, реактивной проводимости b и угла сдвига φ обычно определяют по знаку величины X , помня, что для

последовательной цепи R, L, C величина $X = \omega L - (1/\omega C)$.

Например, для идеального конденсатора (C) $X_c = -(1/\omega C)$ и $b_c = -\omega C$, так как в участке с конденсатором активное сопротивление отсутствует.

Умножая все стороны треугольника токов на величину напряжения получают треугольник мощности (рис. 1.62), так как

$$IU = S, \quad I_a U = P \quad \text{и} \quad I_p U = Q.$$

Для одной и той же электрической цепи все рассмотренные треугольники подобны друг другу, т.е. угол сдвига фаз между током и напряжением φ в них одинаковый.

Векторные диаграммы.

Представление о фазовом расположении векторов напряжения и тока электрической цепи дает векторная диаграмма токов и напряжений.

Построим векторную диаграмму напряжений для цепи, состоящей из последовательно соединенных индуктивностей L , активного сопротивления R и емкости C (рис.1.7)

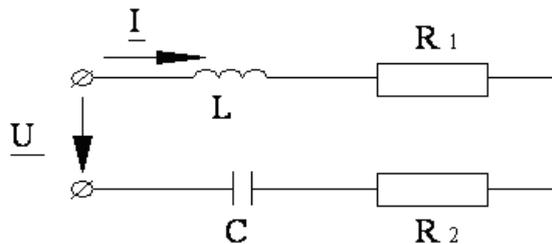


Рис. 1.7. Последовательная цепь переменного тока.

Построение векторных диаграмм для последовательных цепей начинают с вектора тока \underline{I} , так как ток на всех участках цепи один и тот же.

По второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U} = \underline{U}_L + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_C = jX_L \underline{I} + R_1 \underline{I} + R_2 \underline{I} - jX_C \underline{I}. \quad (1.3)$$

Проводим вектор тока \underline{I} (рис.1.8). Затем в выбранном масштабе относительно вектора тока строим частичные напряжения и полное напряжение, базируясь на уравнение (1.3).

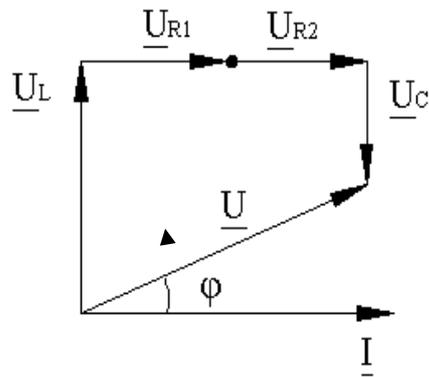


Рис. 1.8. Векторная диаграмма напряжений последовательной цепи.

Построение векторных диаграмм для параллельных цепей начинают с вектора напряжения \underline{U} так как напряжение для всех элементов цепи одно и то же.

Построим векторную диаграмму токов для цепи (рис.1.9).

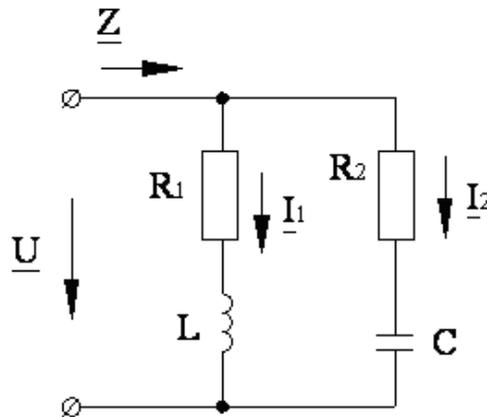


Рис.1.9. Параллельная цепь переменного тока.

Проводимость ветви с индуктивностью $\underline{Y}_1 = g_1 - j\beta_1$, проводимость ветви с емкостью $\underline{Y}_2 = g_2 + j\beta_2$. По первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{U}\underline{Y}_1 + \underline{U}\underline{Y}_2 = \underline{U}g_1 - j\underline{U}\beta_1 + \underline{U}g_2 + j\underline{U}\beta_2 = j\underline{I}a_1 - j\underline{I}p_1 + j\underline{I}a_2 + j\underline{I}p_2. \quad (1.4)$$

Проводим общий вектор напряжений \underline{U} (рис.1.9). Затем в выбранном масштабе относительно вектора напряжений строим частичные токи и общий ток, базируясь на уравнение (1.4).

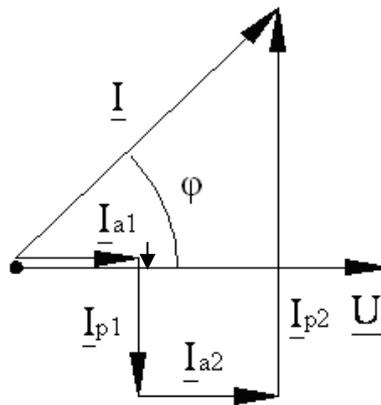


Рис.1.10. Векторная диаграмма токов параллельного соединения.

С помощью векторных диаграмм устанавливаются законы сложения составляющих напряжений, токов, сопротивлений и проводимостей для последовательного и параллельного соединения различных участков.

При последовательном соединении напряжения и полные сопротивления участков складываются геометрически, активные составляющие напряжений и активные сопротивления складываются арифметически, реактивные составляющие напряжений и реактивные сопротивления складываются алгебраически.

2. Порядок выполнения работы.

2.1. Составить индуктивный (Рис. 2.1а) и емкостный участки (Рис. 2.1.б), где R_k – активное сопротивление катушки.



а)



б)

Рис. 2.1. Индуктивный и емкостный участки

Элементы стенда, включаемые в них, выбрать согласно приложению или по указанию преподавателя. В ходе всей работы сопротивления участков не меняются.

Измерения выполняются методом амперметра, вольтметра и ваттметра по общей схеме рис. 2.2, где Z - сопротивление цепи.

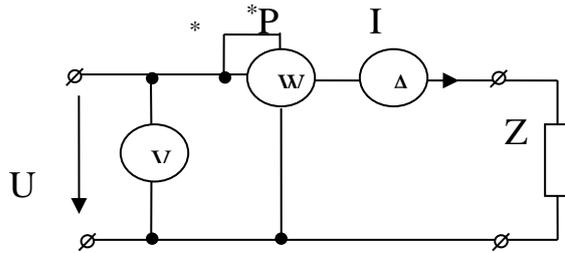


Рис. 2.2. Схема рабочей цепи

Рекомендуемые напряжения питания цепи указаны в Приложении

2.2. Измерить параметры участков. Для каждого участка измерения повторить при другом напряжении. Данные опытов внести в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

№ п/п	Из опытов			Из расчетов						Примечания	
	U В	I А	P Вт	φ град.	Z Ом	R Ом	X Ом	Y 1/Ом	g 1/Ом		b 1/Ом
1											Индуктивный участок
2											Индуктивный участок
3											Емкостный участок
4											Емкостный участок
среднее значение											
5											Индуктивный участок
6											Емкостный участок

2.3. Те же участки соединить в начале в последовательную цепь (рис.2.3а), затем – в параллельную (рис.2.3б).

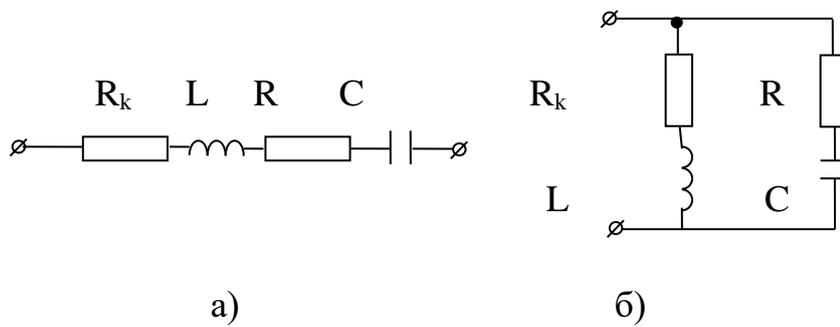


Рис. 2.3. Последовательная и параллельная цепь.

Устанавливая на зажимах каждой цепи напряжение, взятое в указанных пределах, снять показания приборов.

Результаты измерений внести в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

	Последовательная цепь	Параллельная цепь	Примечание
U, В	*		из опытов
I, А	*		
P, Вт	*		
φ , град.	*		
U _a , В	*		
U _{aΣ} , В	*		$R_k I + R I$
U _p , В	*		
U _{pΣ} , В	*		$X_1 I + X_2 I, X_2 < 0$
I _a , А		*	
I _{aΣ} , А		*	$g_1 U + g_2 U$
I _p , А		*	
I _{pΣ} , А		*	$b_1 U + b_2 U, b_2 < 0$
R, Ом	*		
R _Σ , Ом	*		$R_k + R$
X, Ом	*		
X _Σ , Ом	*		$X_1 + X_2, X_2 < 0$
Z, Ом	*		
Z _Σ , Ом	*		$\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}$
G, 1/Ом		*	
G _Σ , 1/Ом		*	$g_1 + g_2$
B, 1/Ом		*	
B _Σ , 1/Ом		*	$b_1 + b_2, b_2 < 0$
Y, 1/Ом		*	
Y _Σ , 1/Ом		*	$\sqrt{g + b_{\Sigma}^2}$

3. Обработка результатов опытов.

3.1. По данным опытов определить все расчетные величины, указанные в таблицах 2.1 и 2.2. С целью проверки законов сложения в таблицу 2.2 наряду со значениями, определяемыми по результатам измерений в п. 2.3, внести сопоставляемые с ними значения, рассчитанные по параметрам участков в п. 2.2. Для расчета компонент составляющих использовать опытные данные табл. 2.1. Например, $U_{a\Sigma} = R_K I + R I$, где R_K и R – активные сопротивления индуктивного и емкостного участков, найденные в табл. 2.1; I – ток последовательной цепи, измеренный в п.2.3.

3.2. Считая заданным измеренное в п.2.3 напряжение на зажимах цепи (или измеренный ток), в каждой цепи рассчитать ток (или напряжение на зажимах) и активную мощность, пользуясь данными только табл.2.1. Сопоставление измеренных и рассчитанных значений представить в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Последовательная цепь			Параллельная цепь			Примечание
U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	
						Измеренное
						Рассчитанное по параметрам участков

3.3. Сравнивая расчетные и опытные значения в таблицах 2.1 и 2.3, сделать выводы о результатах экспериментальной проверки законов сложения.

3.4. Построить (с указанием масштабов) векторные диаграммы измеренных режимов таблицы 2.2

Контрольные вопросы.

1. Каковы основные характеристики гармонического сигнала?
2. Чем различаются понятия фазового сдвига и начальной фазы для гармонических сигналов?
3. Как сдвинуты друг относительно друга векторы тока и напряжения для резистора, конденсатора и катушки индуктивности.
4. В чем заключается идея символического метода расчета.
5. Как изображаются гармонические токи и напряжения в комплексной форме (алгебраической и показательной форме)?
6. Что такое комплексное сопротивление конденсатора и катушки индуктивности, как записать его в алгебраической и показательной форме.
7. Почему параметры Z , R и X участка цепи связаны как стороны прямоугольного треугольника?
8. Как получают треугольник, стороны которого можно рассматривать как проводимости участка?
9. Приведите формулы связи проводимостей и сопротивлений участка цепи, как они получаются?
10. Как по комплексному изображению гармонического сигнала определить оригинал?
11. Какими мощностями характеризуются цепи при гармоническом воздействии? Каковы их определения?
12. Что называют треугольником мощности?
13. Как связаны полная комплексная мощность с активной и реактивной мощностями.
14. Как будет меняться активная мощность всей цепи и активные мощности ветви схемы (рис. 2.2) при переменной частоте входного сигнала?

Приложение к работе 1.

Источником питания в работе является лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), установленный внутри стенда (зажимы 0...250). Нужно следить, чтобы перед сборкой схем выключатель ЛАТРа находился в положении «ВЫКЛ», а ручка регулировки напряжения – в нулевом положении.

В качестве индуктивного участка используется катушка индуктивности L_1 (зажимы 1-4). Емкостный участок составляет последовательным соединением ряда параллельных конденсаторов общей емкостью в пределах 8-18 мкф и реостата с сопротивлением около 500 Ом. Включить полное сопротивление реостата.

Измерительные приборы:

амперметр электромагнитный класса 0,5 на 1 А (Э 514);

вольтметр электромагнитный класса 0,5 на 150 и 360 В (Э 515);

ваттметр электродинамический класса 0,5 на 150 Вт и 300Вт (типа Д500І).

Напряжение питания устанавливается в пределах 140-200 В.

В ходе измерений нужно следить, чтобы напряжение не превосходило установленный предел катушки напряжения ваттметра (при большем значении – установить другой предел).

Длительно допустимый ток реостата – 0,35 – 0,4 А.

Литература.

1. Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. М. – Л., Энергия, 1966г. С. 163-173, 177-180.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники (электрические цепи). – М.: Высшая школа, 1978г. С. 81-84