

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

**«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

Методическое пособие к лабораторным работам по предмету

Часть 1

Теоретические основы электротехники: Методическое пособие. Сост.: Абидов К.Г., Кадырова Д.Р., Ташмухамедова Д.А. - Ташкент: ТашГТУ, 2015. -48 с.

Методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 5310200 – Электро энергетика, 5310700 – Электро техника, электро механика и электрические технологии, 5310800 – Электроника и приборостроение, 5350700 – Радиоэлектронные приборы и устройства.

Печатается по решению научно-методического совета Ташкентского государственного технического университета.

**Рецензенты: к.ф.-м.н., доцент. Нурматов Н.А. (УзНУ);
к.ф.-м.н., доцент. Рахмонов Б. (ТашГТУ).**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Последовательное включение приёмников энергии переменного тока

Цель работы:

1. Исследовать последовательное включение различных потребителей энергии в цепь переменного тока.
2. Определить углы сдвига фаз между током цепи и приложенным напряжением.
3. Научиться строить векторные диаграммы токов и напряжения. Собрать схему из активного сопротивления реальной катушкой индуктивности.

План работы:

1. Определить полное активное сопротивление цепи, а также индуктивность катушки. Отсчитать показания вольтметра и ваттметра (рис. 1.1) при определенном значении тока.

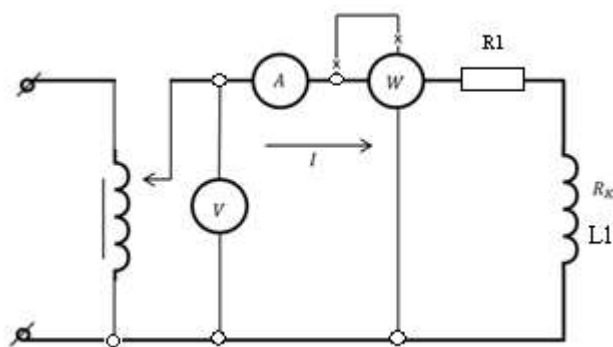


Рис.1.1. RL - цепь.

С целью измерения угла сдвига между векторами входного напряжения и тока последовательно с реальной катушкой индуктивности подключить резистивное сопротивление R_1 . Данные опытов и вычислений записать, соответственно, в таблицу.

2. Построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений, треугольник сопротивлений.

3. Исследовать последовательное включение активного сопротивления и ёмкости.

Для этого в предыдущей схеме заменить катушку индуктивности конденсаторной батареей (рис.1.2). Включив в сеть, измерить напряжение, ток, потребляемую мощность при данном значении тока. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

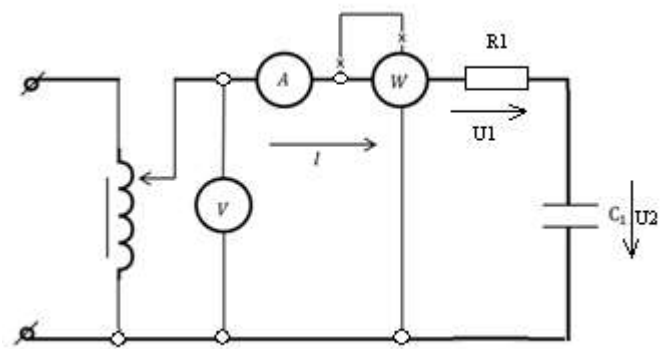


Рис. 1.2. Последовательная RC-цепь.

4. Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов, треугольник сопротивлений в RC-цепи.

5. Собрать схему с последовательным включением приёмников R, L, C (рис. 1.3) и измерить потребляемую мощность. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1.

№	Измерено					Вычислено							Номер рисунка схемы
	U	I	P	U ₁	U ₂	Z	R	X	X _C	L ₁	C ₁	cosφ	
	[В]	[А]	[Вт]	[В]	[В]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Ом]	[Гн]	[мкФ]	-	
1				x	x				x		x		1а
2				x	x			x		x			2а
3				x	x					x			3а

x – графа не заполняется.

6. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов, треугольники сопротивлений и мощностей.

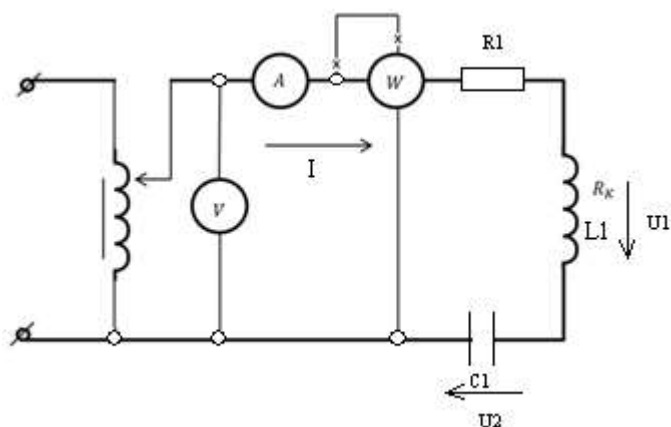


Рис. 1.3. Последовательная RLC-цепь.

Указания к работе:

1. При включении катушки индуктивности, обладающей активным сопротивлением, в цепи будет действовать напряжение источника Э.Д.С. самоиндукции, поэтому приложенное напряжение имеет две составляющие – активную и реактивную (индуктивную):

$$u = u_R + u_L = Ri + L_1 \frac{di}{dt} = RI_m \sin \omega t + \omega L_1 I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.1)$$

Полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{L_1}^2} = \frac{U}{I}, R = R_1 + R_k \quad (1.2)$$

где активная мощность $P = UI \cos \varphi$, откуда $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Если измерены напряжения на входе цепи и на отдельных элементах, то $\cos \varphi$ для всех пунктов работы следует вычислить по выражению:

$$\cos \varphi = \frac{U^2 + U_1^2 - U_2^2}{2UU_1} \quad (1.3)$$

Составляющие полного сопротивления определяются из выражений: $R = Z \cos \varphi$, $X_L = Z \sin \varphi$, $X_L = \omega L$, откуда определяем значение индуктивности $L = \frac{X_L}{\omega}$; $\omega = 2\pi f$.

Векторная диаграмма цепи будет иметь вид (рис. 1.4):

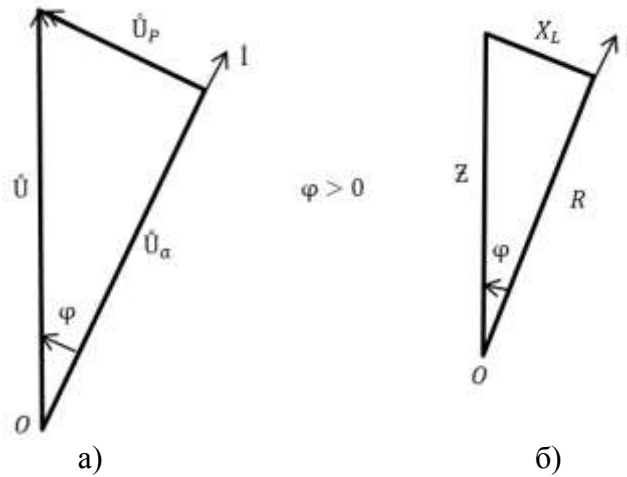


Рис.1.4. а) Векторная диаграмма напряжений, б) векторная диаграмма сопротивлений.

2. Для RC-цепи по второму закону Кирхгофа имеем следующее уравнение:

$$u = u_R + u_C = Ri + \frac{1}{C_1} \int i dt = RI_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.4)$$

$$\text{Полное сопротивление цепи } Z = \sqrt{R^2 + X_{C_1}^2} = \frac{U}{I}.$$

Активная мощность цепи, измеряемая ваттметром, равна $P = UI \cos \varphi$, откуда $\cos \varphi = \frac{P}{UI}$.

Составляющие полного сопротивления определяются из выражений $R = Z \cos \varphi$, $X_{C_1} = Z |\sin \varphi|$, $X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1}$, откуда определяем значение ёмкости:

$$C_1 = \frac{10^6}{\omega X_C} [\text{мкФ}], \omega = 2\pi f \quad (1.5)$$

Векторная диаграмма цепи будет иметь вид (рис. 1.5):

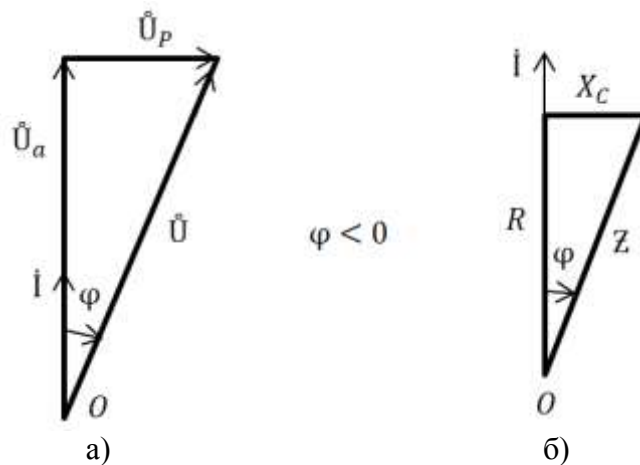


Рис.1.5. а) Векторная диаграмма напряжений, б) векторная диаграмма сопротивлений.

3. Для электрической цепи, состоящей из последовательного соединения R , L и C , уравнение состояния, составленное по второму закону Кирхгофа, имеет вид:

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L_1 \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i dt = RI_m \sin \omega t + \omega L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{\omega C} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.6)$$

По показаниям приборов определяем полное сопротивление цепи, сдвиг фаз, активное и реактивное сопротивления цепи:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (1.7)$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI}, \quad R = R + R_k = Z \cos \varphi, \quad X = X_L - X_C = Z \sin \varphi \quad (1.8)$$

Полная мощность $S=UI$ и реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$.

Векторная диаграмма тока и напряжений, треугольники сопротивлений и мощностей имеют следующий вид (рис. 1.6):

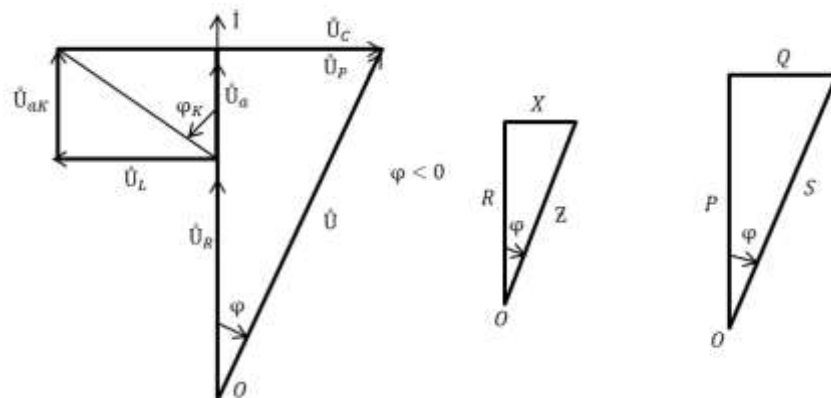


Рис.1.6. а) Векторная диаграмма напряжений при последовательном соединении.

Контрольные вопросы:

1. Дать определение электрической цепи, электрической схемы, активных и пассивных элементов цепи.
2. Что такое положительное направление синусоидального тока?
3. Что такое фазовый сдвиг тока относительно напряжения? Чем вызван фазовый сдвиг?
4. Какая разница между активной, реактивной и полной мощностям? В каких единицах они измеряются?
5. Действующее значение синусоидальных э.у.с., напряжения и тока?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Параллельное включение приёмников энергии переменного тока

Цель работы:

1. Исследовать параллельное включение приёмников энергии переменного тока.
2. Определить углы сдвига фаз между током и напряжением у различных приёмников энергии.
3. Научиться строить диаграммы токов и напряжений.

План работы:

1. Исследовать параллельное включение активного сопротивления (реостата) и катушки индуктивности, обладающей активным сопротивлением. Собрать схему (рис. 2.1), включить ключи K_1 , K_2 и произвести отсчеты показаний приборов для заданного преподавателем значения напряжения. Данные опытов и вычислений записать в таблицу 2.1.

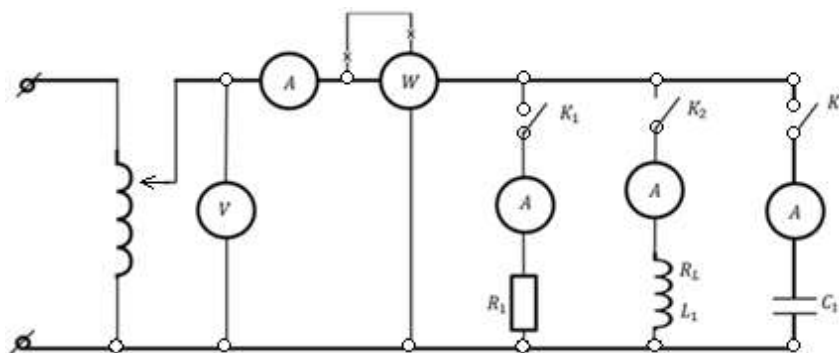


Рис. 2.1. Параллельная GLC- цепь.

2. По данным опытов построить векторные диаграммы токов и напряжений треугольник проводимостей.
3. Исследовать параллельное включение активного сопротивления и конденсаторной батареи (ёмкости). Для этого включить ключи K_1 , K_3 (рис.2.1) и произвести измерения

показаний приборов для заданного преподавателем значения напряжения. Данные опытов и вычислений записать в таблицу.

Таблица 2.1.

№	Измерено						Вычислено					Номер замкнутых ключей
	U	I	P	I _R	I _L	I _C	B _L	B _C	Y	B	cosφ	
	В	А	Вт	А	А	А	1/Ом				-	
1						х		х		х		K ₁ K ₂
			х					х		х		
3					х		х			х		K ₁ K ₃
			х		х		х			х		
5												K ₁ K ₂ K ₃

х – графа не заполняется.

4. По данным опыта построить векторную диаграмму токов и треугольник проводимостей.

5. Исследовать параллельное включение активного сопротивления, индуктивной катушки и конденсаторной батареи (ёмкости). Для этого включить ключи K₁, K₂, K₃ и произвести отсчёты показаний приборов. Данные опытов и вычислений записать в таблицу.

6. По данным опыта построить векторные диаграммы токов, треугольники проводимостей и мощностей.

Указания к работе:

1. Полная проводимость цепи, обладающей параллельно включёнными активным сопротивлением и индуктивностью $Y = G^2 + B_L^2 = \frac{1}{U^2}$; где $G = G_1 + G_K$ – активная проводимость цепи, состоящая из активной проводимости реостата и индуктивной катушки. Активная мощность цепи измеряется ваттметром $P = UI \cos \varphi$, откуда

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (2.1)$$

Составляющие полной проводимости определяются из выражений $G = Y \cos \varphi$, $B = Y \sin \varphi$, $B = \frac{1}{\omega L}$, откуда $L = \frac{1}{B \omega}$, $\omega = 2\pi f$.

Векторная диаграмма цепи будет следующей:

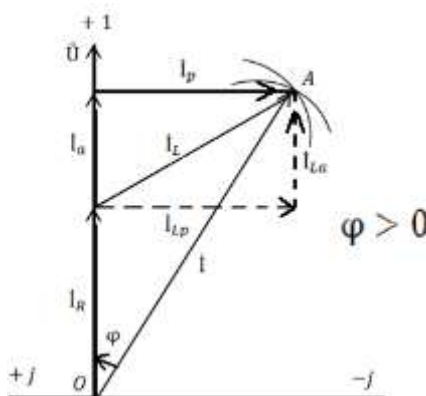


Рис. 2.2. Векторная диаграмма токов.

Точку «А» на векторной диаграмме (рис.2.2) находим, построив векторную диаграмму токов $\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L$.

Для этого применяем «метод засечек». Из конца вектора \dot{I}_R , который совпадает по фазе с напряжением \dot{U} , проводим дугу радиусом равным вектору тока \dot{I}_L так, чтобы ток \dot{I}_L отставал по фазе от напряжения, т.е. имел индуктивный характер, а из начала координат – радиусом, равным вектору тока \dot{I} . Точка пересечения А этих дуг является точкой, определяющей положение векторов \dot{I}_L и \dot{I} .

Используя векторную диаграмму и данные измерения, вычислим необходимые величины:

$$G_1 = \frac{I_R}{U}, \quad G_K = \frac{I_{La}}{U}, \quad B_L = \frac{I_{Lp}}{U}, \quad Y_K = \frac{I_L}{U}, \quad G = G_1 + G_K \quad (2.2)$$

2. Полная проводимость цепи, обладающей параллельно включёнными активным сопротивлением и ёмкостью:

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \frac{I}{U}, \quad B_C = \frac{1}{\omega C}, \quad C = \frac{10^6}{B\omega} [\text{мкФ}], \quad \omega = 2\pi f \quad (2.3)$$

Активная мощность цепи, измеряемая ваттметром:

$$P = UI \cos \varphi = U^2 G, \quad \text{откуда } \cos \varphi = \frac{P}{UI}, \quad G = Y \cos \varphi \quad (2.4)$$

Векторная диаграмма цепи будет (рис.2. 3):

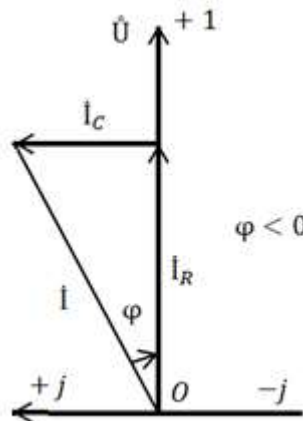


Рис.2.3. Векторная диаграмма токов.

3. При параллельном включении R, L, C элементов величина вектора общего тока \dot{I} определяется как сумма трёх векторов токов: $\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C$.

Полная проводимость цепи:

$$Y = \sqrt{(G_1 + G_K)^2 + (B_L - B_C)^2} = \frac{I}{U} \quad (2.5)$$

Активная мощность цепи:

$$P = UI \cos \varphi, \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (2.6)$$

Составляющие полной проводимости цепи: $G = Y \cos \varphi$ и $B = Y \sin \varphi$.

Активная мощность индуктивной катушки определяется как разность между всей мощностью, потребляемой цепью, и той мощностью, которую забирает реостат:

$$P_L = P - P_R = P - G_1 U^2 \quad (2.7)$$

Векторная диаграмма токов, треугольники проводимостей и мощностей имеют следующий вид (рис.2. 4):

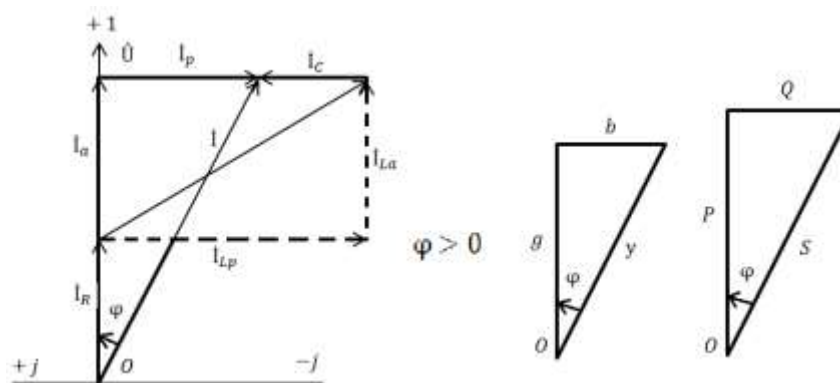


Рис.2.4. а) Векторная диаграмма токов, б) Векторная диаграмма проводимости, в) Векторная диаграмма мощностей.

Контрольные вопросы:

1. Что такое векторная диаграмма токов и напряжений цепи?
2. В чем заключается удобство комплексной формы расчёта электрической цепи.
3. Построить синусоиды и векторы напряжений и токов для активного сопротивления, индуктивности и емкости.
4. Записать выражения комплексных сопротивлений и проводимостей для RL-, RC-, RLC-цепей при последовательном и параллельном соединении.
5. Почему в общем случае активная проводимость ветви не равна величине, обратной активному сопротивлению ветви? В каком частном случае выполняется такое равенство?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Исследование простой цепи переменного тока при смешанном соединении приёмников.

Цель работы:

1. Изучить законы Кирхгофа в применении к цепям переменного тока.
2. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.
3. Определить параметры электрических цепей на основе построенных векторных диаграмм.

План работы:

1. Начертить электрическую схему смешанного соединения элементов электрической цепи, заданной преподавателем. Выбрать необходимые измерительные приборы, обеспечивающие построение векторных диаграмм токов и напряжений.
2. Собрать схему на стенде. После проверки электрической схемы преподавателем, включить её в сеть и произвести измерения напряжений и токов.
3. По опытным данным построить векторную диаграмму токов и напряжений.
4. Используя полученную векторную диаграмму, определить электрические параметры всех элементов цепи, эквивалентные, полное, активное и реактивное сопротивления всей цепи
5. Определить активную, реактивную и полную мощности всей цепи. Построить треугольник мощностей.

Указания к работе:

1. Для расчёта процессов в электрической цепи её изображают на рисунке в виде схемы цепи.

Схемой электрической цепи называют графическое изображение электрической цепи, показывающее последовательность соединения её участков и отображающее свойства рассматриваемой электрической цепи. Основными элементами (параметрами) электрической цепи являются: активное сопротивление R , индуктивность L и ёмкость C .

Примечание: Поскольку катушка индуктивности всегда имеет определённое активное сопротивление, то его следует относить к сопротивлению резистора, включённого последовательно с этой катушкой.

2. В качестве примера на рис.3.1 изображена электрическая схема с включёнными измерительными приборами.

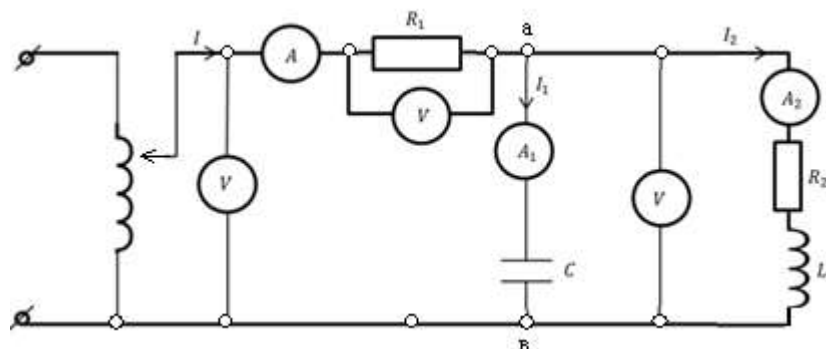


Рис. 3.1. Смешанная электрическая цепь.

3. Показания всех приборов сводятся в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

U	U ₁	U ₂	I	I ₁	I ₂
В	В	В	А	А	А

4. Для построения векторной диаграммы задаёмся масштабами токов m_I и напряжений m_U .

Масштабы указываются рядом с векторной диаграммой. Построение векторной диаграммы рекомендуется начинать со сложного участка электрической цепи. В данном случае начинаем с участка ab (рис. 3.1). В выбранном масштабе откладываем по оси абсцисс вектор напряжения \dot{U}_2 (рис.3.2). Ось абсцисс считаем совмещённой с осью вещественных чисел на комплексной плоскости. Ток \dot{I}_1 в ветви с ёмкостью C опережает по фазе вектор напряжения \dot{U}_2 на угол 90° . Ток \dot{I}_2 в ветви с R_2 и L_2 по отношению к напряжению \dot{U}_2 имеет индуктивный характер, но угол сдвига между \dot{U}_2 и \dot{I}_2 меньше 90° из-за наличия активного сопротивления R_2 . Учитывая, что $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$, методом засечек находим направление и величину тока \dot{I} (вектор \overrightarrow{OA}). Для построения диаграммы напряжений воспользуемся вторым законом Кирхгофа. По второму закону Кирхгофа для данной цепи имеем равенство: $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$. Из конца вектора \dot{U}_2 построим вектор напряжения \dot{U}_1 , параллельно вектору тока \dot{I} , так как падение напряжения на активном сопротивлении R_1 совпадает по фазе с током \dot{I} .

Соединяя точки B с началом координат, получаем векторную диаграмму напряжений. Вектор \overrightarrow{OB} равен значению напряжения \dot{U} .

Из векторной диаграммы видно, что цепь в целом имеет ёмкостной характер ($\varphi < 0$), так как ток на выходе схемы опережает напряжение на её зажимах.

Нужно иметь в виду, что угол сдвига фаз φ имеет свой знак и отсчитывается от вектора тока к вектору напряжения. В цепи с отстающим током угол положителен ($\varphi > 0$), в цепи с опережающим током- отрицателен ($\varphi < 0$). Этот угол определяется по векторной диаграмме с помощью транспортира. В данном случае $\varphi = 20^\circ$. С другой стороны, для узла «а» (рис. 3.1) по первому закону Кирхгофа имеем:

$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$, т.е. вектор тока \dot{I} является геометрической суммой векторов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . Это даёт возможность определить положение искомых векторов на диаграмме, применяя «метод

засечек». Для этого из конца вектора тока \dot{I}_1 (рис. 3.2) проводим дугу радиусом равным вектору тока \dot{I}_2 , а из начала координат – радиусом, равным вектору тока \dot{I} .

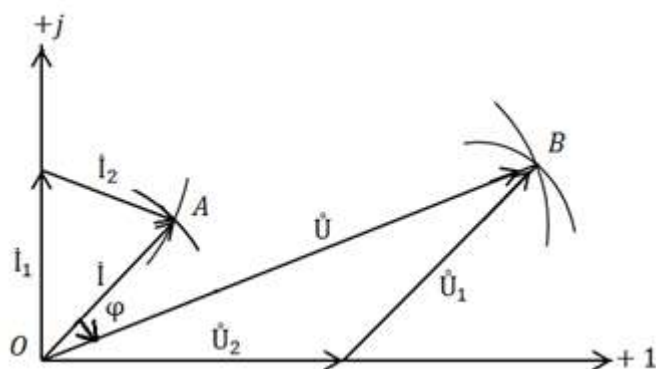


Рис.3.2. Диаграмма токов и напряжений.

Точка пересечения «А» этих двух дуг является точкой, определяющей векторы \dot{I}_1 и \dot{I}_2 . В результате получим векторную диаграмму токов для заданной цепи.

5. Используя полученную векторную диаграмму, построим треугольники напряжений и сопротивлений для всей цепи. Для этого из общей векторной диаграммы выделяем вектора \dot{U} и \dot{I} , сохраняя угол сдвига фаз между ними. Для получения треугольника напряжений нужно спроектировать вектор напряжения на вектор тока или на его продолжение. По формулам $U_a = U \cos \varphi$, $U_p = U \sin \varphi$ находим величину активной и реактивной составляющих напряжения (рис.3.3). Затем подсчитываем эквивалентное сопротивление схемы: $Z_{\Sigma} = \frac{U}{I}$, $R_{\Sigma} = \frac{U_a}{I}$, $X_{\Sigma} = \frac{U_p}{I}$, отсюда находим U , U_a , U_p .

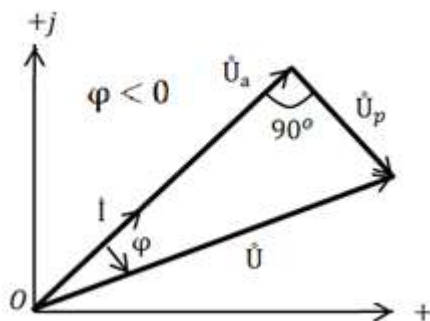


Рис.3.3. Векторная диаграмма напряжений.

По найденным величинам сопротивлений строим треугольник сопротивлений (рис.3.4) (в масштабе сопротивления $m_z = \frac{mU}{I}$).

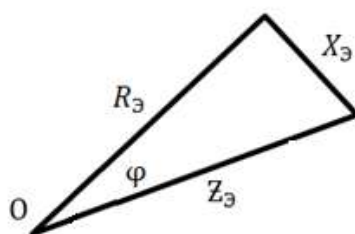


Рис.3.4. Векторная диаграмма сопротивлений.

Из построения следует, что треугольники напряжений и сопротивлений подобны.

Т.о., данную схему можно заменить простой цепью с последовательным соединением элементов R_{Σ} и X_{Σ} (Рис.3.5) :

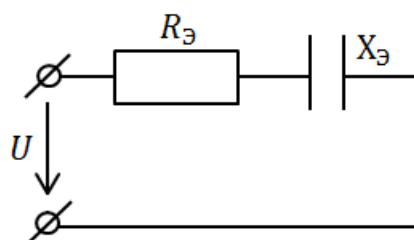


Рис.3.5. Электрическая схема при последовательном соединении R, C.

6. Для вычисления параметров всех элементов цепи воспользуемся формулами:

$$R_1 = \frac{U_1}{I} \quad , \quad X_C = \frac{1}{\omega C} \quad , \quad C = \frac{1}{\omega X_C} \quad , \quad \omega = 2\pi f \quad (3.1)$$

Для определения R_2 и L_2 из общей векторной диаграммы (рис. 3.2) выделяем вектора \dot{U}_2 и \dot{I}_2 , сохраняя угол сдвига между ними.

Для получения \dot{U}_{2p} и \dot{I}_{2p} спроектируем вектор напряжения \dot{U}_2 на вектор тока \dot{I}_2 или на его продолжение (рис. 3.6):

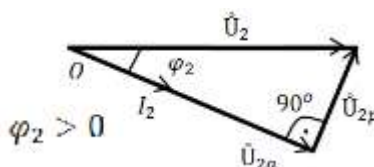


Рис.3.6. Векторная диаграмма напряжений.

Значения U_{2p} и I_{2p} получим, помножив длины вектора \dot{U}_{2p} и \dot{I}_{2p} на масштаб напряжения m_u и далее $R_2 = \frac{U_{2a}}{I_2}$, $X_{L2} = \frac{U_{2p}}{I_2} = \omega L_2$, $L_2 = \frac{X_{L2}}{\omega}$.

7. Для вычисления мощностей на входе цепи воспользуемся следующими соотношениями:

$$P = UI \cos \varphi = U_a I = R_Э I^2 \quad - \quad \text{активная мощность [Вт].}$$

$$Q = UI \sin \varphi = U_p I = X_Э I^2 \quad - \quad \text{реактивная мощность [Вар].}$$

$$S = UI = Z_Э I^2 \quad - \quad \text{полная мощность [ВА].}$$

Для построения треугольника мощностей нужно задаться масштабом мощности и построить треугольник, подобный треугольнику напряжений (рис.3.7):

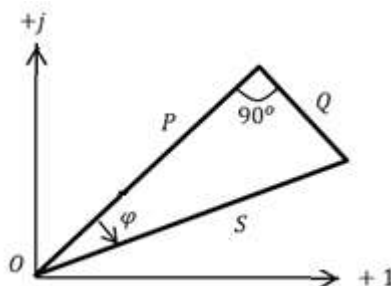


Рис.3.7. Векторная диаграмма мощностей.

Вычисленные величины сводим в таблицу 3.2.

Таблица 3.2.

U	U _a	U _p	R _Э	X _Э	Z _Э	R ₁	R ₂	L ₂	C	P	Q	S	cosφ
В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ	Вт	ВАР	ВА	-

Контрольные вопросы:

1. Основные понятия и определения, относящиеся к цепям переменного тока (частота, период, начальная фаза, амплитуда, сдвиг по фазе напряжений и токов и т.д.).
2. Значения синусоидальных величин (амплитудные, действующие, средние).
3. Причина сдвига по фазе напряжения и тока в ветвях, содержащих индуктивность и ёмкость.
4. Законы Кирхгофа для цепей переменного тока.
5. Графическое изображение синусоидальных величин. Векторная диаграмма.
6. Сопротивления в цепях переменного тока.
7. Мгновенная мощность, активная, реактивная и полная мощности.
8. Колебание энергии в цепях переменного тока.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**Исследование цепей переменного тока с взаимной индуктивностью****Цель работы:**

1. Экспериментальное определение коэффициента взаимной индуктивности 2-х индуктивно связанных катушек, а также влияние взаимной индукции при последовательном соединении элементов.
2. Определение эквивалентных параметров цепи и разности фаз между током в цепи и напряжениями на отдельных её участках.

План работы:

1. Определение параметров реактивных катушек, взятых в отдельности.
2. Определение параметров цепи, составленной из 2-х индуктивно связанных реактивных катушек, соединённых последовательно при согласном и встречном включении.
3. Вычисление взаимной индуктивности и коэффициента связи 2-х индуктивно связанных реактивных катушек по данным п.п. 1.2 и построение векторных диаграмм напряжений для последовательного соединения при согласном и встречном включении их.

Схема соединений приведена на рис. 4.1.

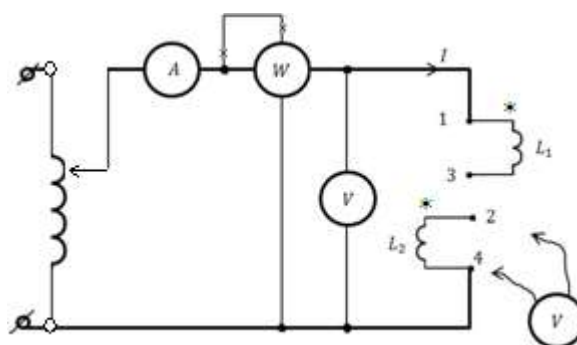


Рис. 4.1. Последовательное соединение двух индуктивно-связанных катушек.

Указания к работе:

1. Для определения параметров первой катушки соединяют зажимы 3 и 4, а для определения параметров второй катушки – зажимы 1 и 2. В электрических схемах для определения характера включения индуктивно связанных катушек их так называемые одноименные зажимы помечают звёздочками (*). Результаты измерений и вычислений внести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

Номер катушки	Измерено					Вычислено					Соединённые зажимы
	U	I	P	U ₀	U ₁	Z	R	X	L	cosφ	
	В	мА	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	мГн	-	
1				x	x						3-4
			x								
2					x						1-2
			x								

x – графа не заполняется.

Формулы для вычисления величин:

$$P = IU \cos \varphi, \cos \varphi = \frac{P}{UI}, Z = \frac{U}{I}, R = Z \cos \varphi, X = Z \sin \varphi, \\ X_L = \omega L, L = \frac{X_L}{\omega}, \omega = 2\pi f \quad (4.1)$$

Результаты измерений и вычислений по схеме рис. 4.1 также вносятся в таблицу 4.1. При этом значение $\cos \varphi$ следует вычислять по выражению: $\cos \varphi = \frac{U^2 + U_0^2 - U_1^2}{2UU_0}$, а остальные параметры по вышеуказанным выражениям.

2. Для определения параметров цепи, составленных из 2-х последовательно соединённых и индуктивно связанных реактивных катушек, соединяют зажимы 2 и 3, причём переход от согласного включения к встречному следует осуществлять переключением одной из исследуемых катушек.

Для измерения падения напряжений в отдельных катушках воспользуемся вольтметром 2.

Результаты измерений и вычислений по рис. 4.1 вносим в таблицу 4.2.

Таблица 4.2.

Включение	Измерено						Вычислено					Номер рисунка
	U	I	P	U ₁	U ₂	U ₀	Z _э	R _э	X _э	M	K _M	
	В	мА	Вт	В	В	В	Ом	Ом	Ом	мГ	-	
Согласное						x						1а
			x									1б
Встречное						x						1а
			x									1б

х – графа не заполняется.

Формулы для вычисления искомых величин приведены в п.1.

Если известны эквивалентные сопротивления цепи при согласном и встречном включении катушек, то по ним легко найти коэффициент взаимной индукции:

$$M = \frac{X_{\text{согл.}} - X_{\text{встр.}}}{4\omega} \quad (4.2)$$

Отношение взаимной индуктивности 2-х катушек к среднему геометрическому из их индуктивностей называется коэффициентом связи катушек:

$$K_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4.3)$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы.

3. Для построения векторных диаграмм напомним уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа.

а) при согласном включении:

Напряжения u_1 и u_2 на отдельных катушках:

$$u_1 = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} ; \quad u_2 = R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}, \quad (4.4)$$

где R_1 и R_2 – активные сопротивления катушек.

Напряжение на зажимах всей цепи равно:

$$u = u_1 + u_2 = (R_1 + R_2)i + (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt} \quad (4.5)$$

При синусоидальном режиме это уравнение можно записать в комплексной форме:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = (R_1 + R_2)\dot{I} + j\omega\dot{I}(L_1 + L_2 + 2M) \quad (4.6)$$

б) при встречном включении:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} ; \quad u_2 = R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt}; \\ u &= u_1 + u_2 = (R_1 + R_2)i + (L_1 + L_2 - 2M) \frac{di}{dt}; \\ \dot{U} &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = (R_1 + R_2)\dot{I} + j\omega\dot{I}(L_1 + L_2 - 2M). \end{aligned} \quad (4.7)$$

При построении векторных диаграмм необходимо вычислить величины, которые записаны в выражениях «4.6» и «4.7».

На рисунках 4.2 и 4.3 построены векторные диаграммы напряжений для согласного и встречного соединения катушек.

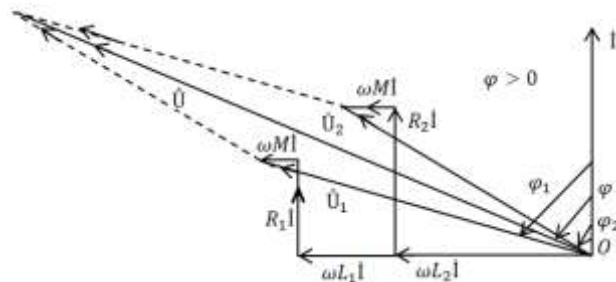


Рис. 4.2. Векторная диаграмма при согласованном соединении.

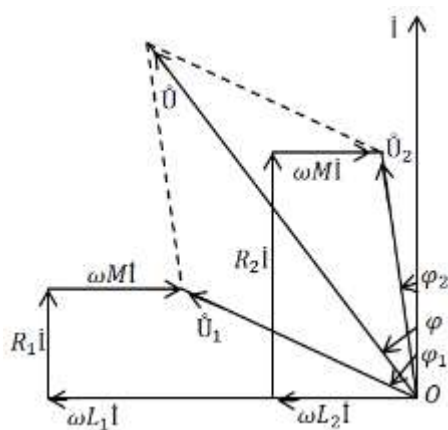


Рис. 4.3. Векторная диаграмма при встречном соединении.

Контрольные вопросы:

1. Какие цепи называются индуктивно-связанными?
2. Что такое индуктивность и взаимная индуктивность?
3. Как опытным путём определить параметры катушки индуктивности?
4. Что такое согласное и встречное включение индуктивно связанных цепей?
5. Указать способы опытного определения коэффициента взаимной индукции 2-х индуктивно связанных катушек.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование резонанса при последовательном соединении элементов R, L и C

Цель работы:

1. Исследование резонанса при последовательном соединении имеет целью ознакомить студентов с явлением резонанса напряжений путём изменения ёмкости C при постоянных значениях индуктивности L и угловой частоты или путём изменения частоты источника синусоидального напряжения при постоянных индуктивности L и ёмкости и показать, что при резонансе, а также и вблизи от него, напряжения на зажимах катушки и на зажимах конденсаторов могут значительно превзойти напряжение на зажимах цепи, и что сопротивление цепи при резонансе имеет минимальное значение, вследствие полной взаимной компенсации индуктивного сопротивления катушки и ёмкостного сопротивления конденсатора.

2. Получение практических навыков в построении векторных диаграмм и графиков кривых для цепи при резонансе напряжений.

План работы:

1. Собрать последовательную цепь (рис. 5.1), состоящую из реактивной катушки и группы параллельно соединённых конденсаторов с общей ёмкостью порядка 30-40 мкФ (рис. 5.1).

2. После проверки схемы преподавателем, включить исследуемую цепь в электрическую сеть через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) .

Рабочее напряжение на входе схемы установить по заданию преподавателя.

3. Изменяя ёмкость или частоту источника напряжения, записать показания всех приборов. Для малых значений тока использовать миллиамперметр (мА).

4. По данным опыта построить кривые U_L , U_C , I , Z , φ в функции от ёмкости схемы или частоты источника.

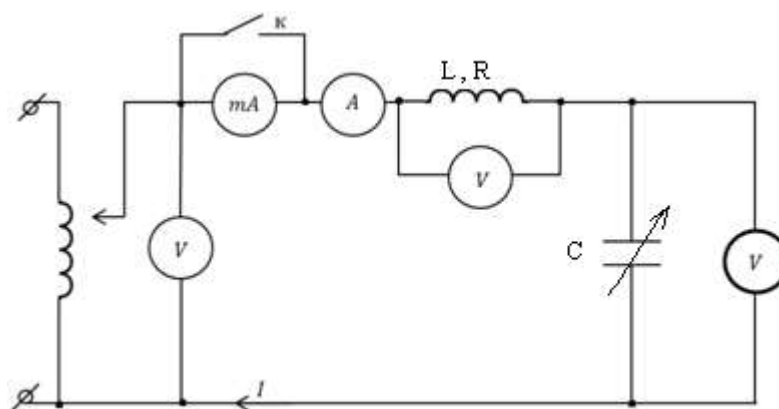


Рис. 5.1. Последовательный колебательный контур.

5. На основании опытных данных построить векторные диаграммы для 3-х режимов работы цепи:

- до резонанса
- в момент резонанса
- после резонанса

6. Определить характеристическое (волновое) сопротивление цепи, величину затухания цепи и добротность контура при резонансе.

Указания к работе:

1. Результаты измерений и вычислений вносятся в таблицу 5.1 (снять не менее 10 точек).

Таблица 5.1.

N	Измерено					Вычислено		
	f	U	U_L	U_C	I	Z	C	φ
	Гц	В	В	В	А	Ом	мкФ	градус

2. Величины ёмкости подсчитываются по показаниям приборов, ёмкостное сопротивление цепи $X_C = \frac{U_C}{I}$, с другой стороны, $X_C = \frac{1}{\omega C}$, следовательно, $C = \frac{I \cdot 10^6}{U_C \omega}$ [мкФ], где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

3. Величина полного сопротивления цепи Z и угол сдвига фаз между приложенным напряжением и током в цепи вычисляются по известным формулам:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad \varphi = \arccos \frac{R}{Z} \quad (5.1)$$

Величину активного сопротивления определить в момент резонанса $R=Z_0$ и считать её неизменной.

4. Для вычисления характеристического (волнового) сопротивления ρ , затухания цепи d и добротности контура Q имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\rho &= \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{U_{L0}}{I} = \frac{U_{C0}}{I}; \\ d &= \frac{R}{\rho} = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 R C = \frac{U}{U_{L0}} = \frac{U}{U_{C0}}; \quad d < 1; \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad Q = \frac{1}{d} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{U_{C0}}{U}\end{aligned}\quad (5.2)$$

5. Построение векторных диаграмм произвести методом «засечек». Порядок построения вытекает из приводимых ниже диаграмм (рис.5.2) .

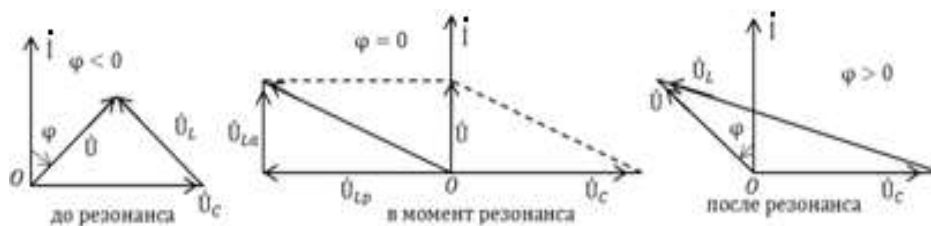


Рис. 5.2. Векторные диаграммы для различных режимов работы RLC-цепи

6. Кривые U , U_L , U_C , I , Z , φ строятся по опытным данным в функции от ёмкости или частоты источника синусоидального напряжения.

Графики вышеперечисленных кривых, в частности при изменении ёмкости схемы, показаны на рис. 5.3.

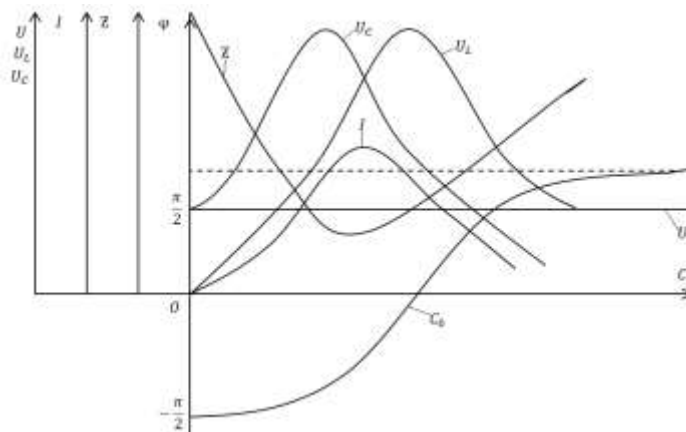


Рис. 5.3. Резонансные кривые для последовательный RLC-цепи.

Контрольные вопросы:

1. Из каких элементов состоит колебательный электрический контур?
2. Что называется резонансом в электрической цепи?
3. Условия возникновения резонанса напряжений?
4. От чего зависит частота собственных колебаний контура?
5. Практическое значение резонанса напряжений.
6. Колебание энергии при резонансе в идеальном контуре.
7. Какое значение в технике имеет добротность контура?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Исследование резонанса при параллельном соединении элементов R , L и C

Цель работы:

1. Исследование резонанса при параллельном соединении имеет целью ознакомить с характером различных резонансных кривых и показать, что при резонансе, а также вблизи от него токи в катушке и в конденсаторах могут превысить ток в не разветвлённой части цепи и что полная проводимость цепи при резонансе имеет наименьшее значение, вследствие полной компенсации индуктивной и ёмкостной проводимости цепи;

2. Получение практических навыков в построении векторных диаграмм и графиков для электрической цепи при резонансе токов.

План работы:

1. Собрать параллельную цепь из реактивной катушки и из группы конденсаторов (рис.6.1).

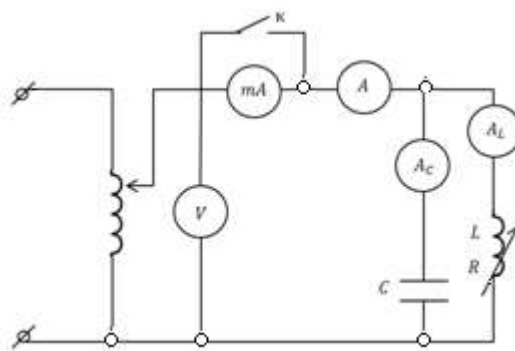


Рис. 6.1. Параллельный колебательный контур.

2. После проверки схему преподавателем, включить исследуемую цепь в электрическую сеть через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (рис.6.1).

Рабочее напряжение на входе установить по указанию преподавателя.

3. Изменяя индуктивность катушки (рис.6.1) (путем поворота штурвала) и поддерживая при этом неизменным входное напряжения, записать в таблицу показания всех приборов.

4. По данным опытов построить кривые резонанса I , I_L , I_C , Y , $\cos\varphi$ в функции от индуктивности или частоты источника.

5. На основании опытных данных построить векторные диаграммы для 3-х режимов работы цепи:

а) до резонанса; б) в момент резонанса; в) после резонанса

6. Определить характеристическую (волновую) проводимость цепи, величину затухания цепи и добротность контура при резонансе.

Указания к работе:

1. Результаты измерений и вычислений вносятся в таблицу 6.1 (снять не менее 8-10 точек).

Таблица 6.1.

N	Измерено					Вычислено			
	f	U	I	I_L	I_C	B_L	L	Y	$\cos\varphi$
	Гц	В	А	А	А	1/Ом	Гн	1/Ом	-

2. Полная проводимость Y всей цепи определяется по формуле: $Y = \frac{I}{U}$.

Величину активной проводимости определить в момент резонанса и считать её неизменной.

Индуктивная проводимость: $B_L = Y \sin\varphi$, где

$$\varphi = \arccos \frac{G}{Y}; \quad B_L = \frac{1}{\omega L};$$

$$L = \frac{1}{B_L \omega}; \quad \omega = 2\pi f \quad (6.1)$$

3. Для вычисления характеристической (волновой) проводимости γ , коэффициента затухания цепи d и добротности контура Q используем следующие соотношения:

$$\gamma = \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{1}{\omega_0 L} = \omega_0 C = \frac{I_{C0}}{U} = \frac{I_{L0}}{U}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}};$$

$$d = \frac{G}{\gamma} = G \omega_0 L = \frac{G}{\omega_0 C} = \frac{I}{I_{L0}} = \frac{I}{I_{C0}}; \quad d < 1;$$

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{I_{L0}}{I} = \frac{I_{C0}}{I} \quad (6.2)$$

4. Построение векторных диаграмм произвести методом «засечек» (рис.6.2).

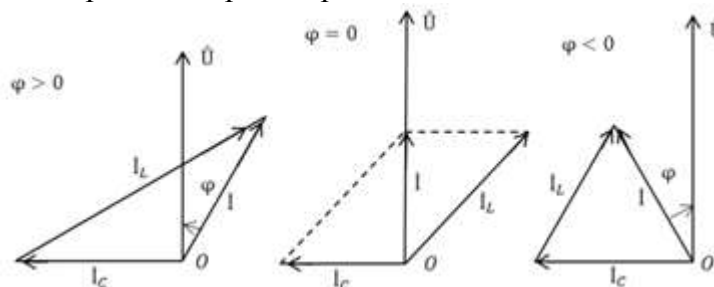


Рис.6.2. Векторные диаграммы для различных режимов работы GLC-цепи.

5. Кривые резонанса I , I_L , I_C , Y , $\cos\varphi$ в функции от индуктивности индуктивной катушки показаны на рис. 6.3. Аналогичные кривые получаются и при изменении частоты генератора синусоидального напряжения.

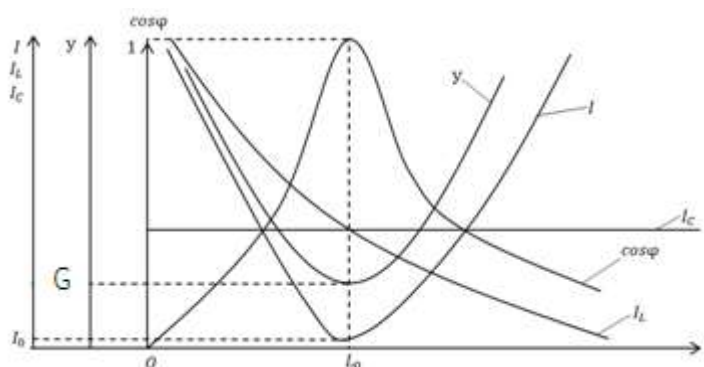


Рис.6.3. Резонансная характеристика.

Контрольные вопросы:

1. Что называется резонансом в цепи?
2. Условия возникновения резонанса токов.
3. Практическое значение явления резонанса токов в электрических цепях.
4. Какими способами достигается повышение $\cos\varphi$?
5. Колебание энергии при резонансе в идеальном контуре.
6. От чего зависит волновая проводимость?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Исследование трехфазной цепи при соединении приемников звездой.

Цель работы:

1. Получение практических навыков в составлении трех и четырехпроводных трехфазных цепей.
2. Ознакомление с определением порядка следования фаз трехфазной системы.
3. Ознакомление с особенностями работы трех и четырехпроводных трехфазных цепей при симметричной и несимметричной нагрузке.
4. Определение опытным путем, а также с помощью топографических диаграмм, основных зависимостей между линейными и фазными величинами напряжения и тока.
5. Изучение графического и аналитического метода разложения несимметричной системы фазных напряжений или токов на симметричные составляющие.
6. Ознакомление с измерением мощности в трехфазных цепях.

План работы.

1. Определить фазоуказателем порядок следования фаз в трехфазной сети и произвести разметку клемм источника (A,B,C).
2. Выполнить соединения трехфазной цепи согласно рис.7.1.

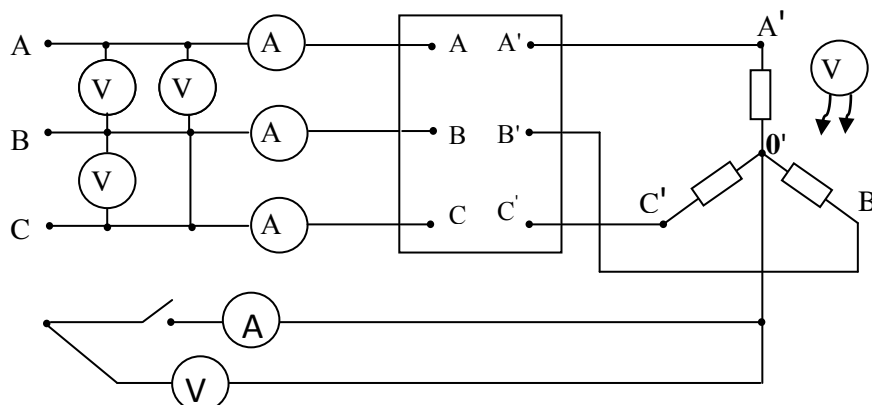


Рис.7.1. Соединение звездой трехфазной системы.

3. После проверки электрической схемы преподавателем включить ее в сеть и произвести измерения токов и напряжений всех фаз, а также показания трехфазного ваттметра. Измерение произвести при следующих нагрузках фаз приемника:

- а) симметричная активная нагрузка ;
- б) обрыв одной фазы генератора и короткое замыкание одной из фаз приемника при симметричной нагрузке фаз приемника;
- в) несимметричная активная нагрузка с нулевым проводом;
- г) несимметричная активная нагрузка без нулевого провода;
- д) замена в фазе **A'** резистора в цепи без нулевого провода;
- е) замена в фазе **B'** резистора конденсатором, сохраняя индуктивную катушку в фазе **A'** в цепи без нулевого провода.

4. По опытным данным построить для всех режимов работы схемы топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов.

5. Определить параметры элементов для всех режимов работы схемы.

6. Для одного из несимметричных режимов, по указанию преподавателя, определить аналитическими и графическими методами симметричные составляющие фазных напряжений.

7. Составить таблицу 7.1 паспортных данных всех измерительных приборов.

Таблица 7.1.

Наименование прибора	Система	Номер прибора	Класс точности	Предел измерения

Указания к работе

I. Генераторы с тремя обмотками, в которых наводятся эдс одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ периода, называются трехфазными генераторами. При соединении звездой все концы (x, y, z) фазных обмоток генератора (или трансформатора) соединяют в одну общую точку (точка 0), которая называется нулевой точкой источника. Обычно на схемах обмотки источника не показывают.

Определение порядка следования фаз сети производится с помощью фазоуказателя рис.7.2, состоящей из конденсатора и двух одинаковых ламп накаливания, соединенных в звезду без нулевого провода. Абсолютные значения всех этих трех проводимостей в рассматриваемом приборе равны. Поэтому можно положить $U_1=ja$, $U_2=a$, $U_3=ja$. Схема включается в сеть. Если фазу сети, к которой подключена конденсатор, обозначить

буквой А, то ярко горящая лампа окажется включенной в фазу В, а тускло горящая - в фазу С. На этом основании произвести маркировку клемм буквами А, В, С. Фазные напряжения источника образуют симметричную систему.

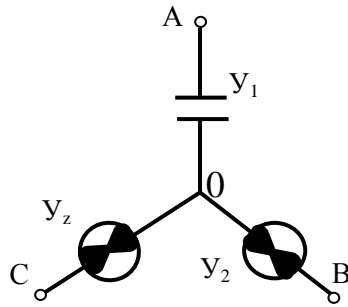


Рис. 7.2. Схема фазы указателя.

При прямой последовательности фаз U_a отстает U_A , а U_c отстает от U_b на 120° . На рис. 7.3 показана векторная диаграмма фазных напряжений генератора. Симметричную систему фазных напряжений можно записать в виде \dot{U}_A , $\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_A$, $\dot{U}_C = a \cdot \dot{U}_A$, $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ фазный множитель. Генератор создает также линейные напряжения \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} , которые связаны с фазными напряжениями соотношениями: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$. С помощью этих соотношений на рис. 7.4 построены вектора линейных напряжений, которые образуют равносторонний треугольник А, В, С.

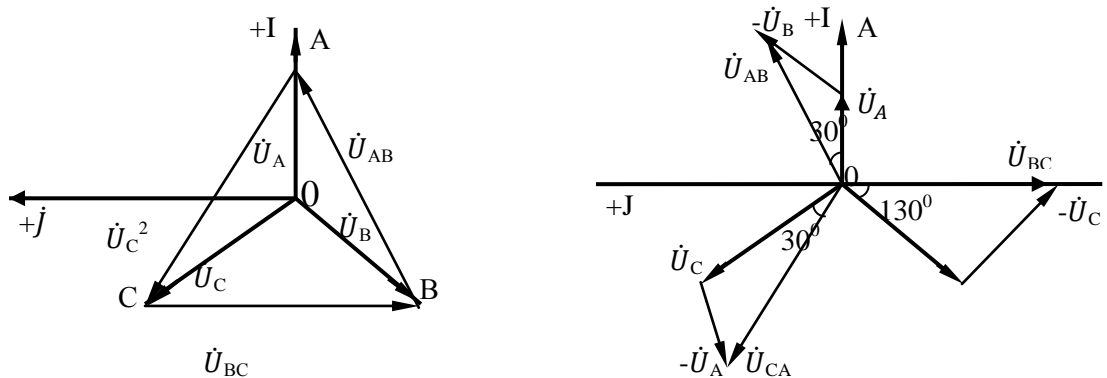


Рис. 7.4. Топографическая диаграмма токов и напряжений.

Таким образом, при выбранном направлении напряжений источника система линейных опережает систему фазных напряжений на 30° , причем линейные напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше фазных.

В схеме звезда-звезда без нулевого провода (рис. 7.5) между нулевыми точками источника и приемника образуется напряжение. Это узловое напряжение между узлами 0 и 0' будет определяться из формулы:

$$\dot{U}_{00'} = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (7.1)$$

где \underline{Y}_A , \underline{Y}_B , \underline{Y}_C – комплексные проводимости фаз приемника.

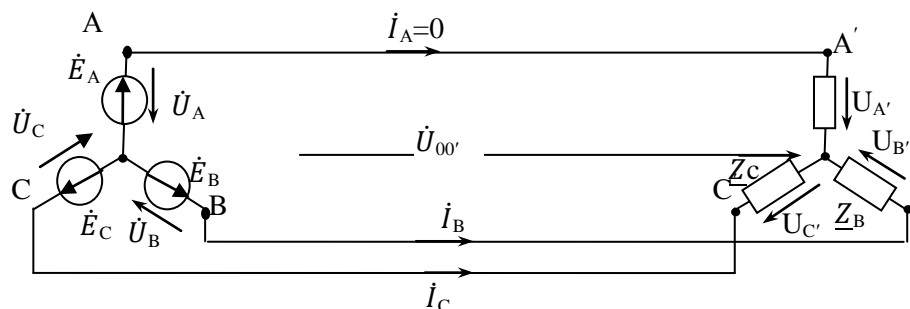


Рис.7.5. Соединения источника и нагрузки звёздой.

Напряжения на фазах приемника:

$$\dot{U}_{A'} = \dot{U}_A - \dot{U}_{00}; \quad \dot{U}_{B'} = \dot{U}_B - \dot{U}_{00}; \quad \dot{U}_{C'} = \dot{U}_C - \dot{U}_{00} \quad (7.2)$$

2. Активная нагрузка состоит из ламп накаливания. Изменяя число включенных ламп, получаем различную активную нагрузку фаз.

3. Измеренные величины напряжений, токов и мощностей внести в сводную таблицу 7.2:

Таблица 7.2.

Вид нагрузки	$U_A=U_B=U_C$	$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}$	I_A	I_B	I_C	I_0	P	$\dot{U}_{A'}$	$\dot{U}_{B'}$	$\dot{U}_{C'}$	\dot{U}_0
	В	В	А	А	А	А	В _I	В	В	В	В
а. б. в.											

4. Построение топографических диаграмм производим по опытным данным. Для примера рассмотрим случай «е», когда в фазу А включен резистор, в фазу В – реальная индуктивная катушка и в фазу С- конденсатор. Откладываем в масштабе m_u вектора фазных и линейных напряжений генератора. Из точки «0» радиусом, равным напряжению U_{00}' , описываем окружность.

Из точки А радиусом, равным напряжению приемника $U_{A'}$, из точки В радиусом, равным напряжению приемника $U_{B'}$, делаем засечки на дуге проведенной окружности. Таким образом получаем точку $0'$. Длина вектора $0'C$ дает в масштабе напряжение приемника $U_{C'}$. Это значение напряжения должно совпасть со значением, которое показывает вольтметр, подключенный к зажимам конденсатора.

Из точки $0'$ в масштабе проводим вектора токов I_B и I_C , учитывая характер нагрузки в этих фазах.

Находим расположение вектора тока I_B (методом засечек), учитывая что этот ток отстает от $U_{C'}$ на угол меньше 90° и что векторная сумма трех токов равна нулю, т.е. вектора этих токов образуют замкнутый треугольник. Таким образом строим топографические диаграммы для всех случаев нагрузки (рис.7.8). Итак в трехпроводной системе при несимметричной нагрузке появляется напряжение \dot{U}_{00}' между нейтральными точками генератора и приемника $\dot{I}_{A'}$, $\dot{U}_{B'}$, $\dot{U}_{C'}$ становятся несимметричными. Опыты холостого хода и короткого замыкания (в одной фазе приемника) производятся без нулевого провода и при одинаковых активных сопротивлениях в остальных фазах. Выключая все лампы накаливания одной фазы приемника (например, в фазе А), получаем схему опыта холостого хода (рис.7.6)

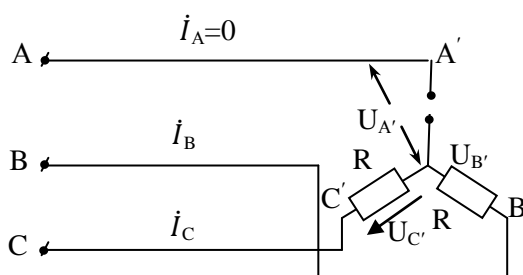


Рис.7.6. Обрыв фазы A' трехфазного приемника.

Так как $\underline{Y}_A = 0$ и $\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$ то $\dot{U}_{00}' = -\frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{2} = -\frac{\dot{U}_A}{2}$, следовательно, точка 0 находится посередине вектора линейного напряжения U_{BC} . Соединяя точку 0' с точками В, С и А получаем фазные напряжения приемника U_B' и U_C' и напряжение между зажимами разомкнутой фазы, причем $U_A' = \frac{3}{2}U_A$.

Токи I_B и I_C совпадают по фазе с напряжениями \dot{U}_B' и \dot{U}_C' , причем $I_B + I_C = 0$ или $I_B = -I_C$.

Закорачивая лампы одной фазы (например, А) получаем схему опыта короткого замыкания (рис. 7.7).

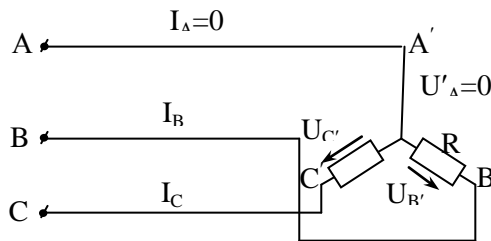


Рис 7.7. Короткое замыкание фазы A' трехфазного приёмника.

Так как $\underline{Y}_A = \infty$ и $\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}$ то $\dot{U}_{00}' = \dot{U}_A$, т.е. точка 0' совпадает с точкой А. Следовательно, фазные напряжения приемника U_B' и U_C' равны по величине линейному напряжению генератора. Токи I_B и I_C совпадают по фазе с напряжениями U_B' и U_C' . Ток А определяется из $I_A + I_B + I_C = 0$, т.е. $I_A = -(I_B + I_C)$. Выводы, изложенные в теории, должны быть подтверждены экспериментами.

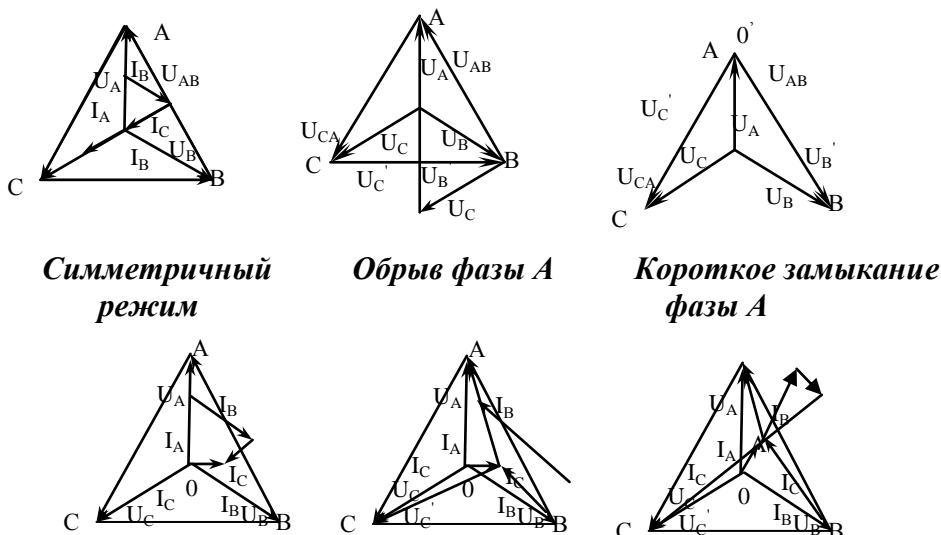


Рис 7.8. Топографические диаграммы для различных режимов работы трехфазной цепи.

6. Любую несимметричную трехфазную систему величин (токов, напряжений) можно разложить на симметричные системы нулевой, прямой и обратной последовательности фаз.

Пусть имеется несимметричная система фазных напряжений приемника U_A', U_B', U_C' . Основные вектора систем нулевой, прямой и обратной последовательностей определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A' + \dot{U}_B' + \dot{U}_C'); \quad U_{A1} = \frac{1}{3}(U_A + aU_B' + a^2U_C') \\ U_{A2} &= \frac{1}{3}(U_A' + a^2U_B' + aU_C') \end{aligned} \quad (7.3)$$

Для аналитического разложения на симметричные составляющие нужно записать, воспользовавшись топографической диаграммой, несимметричную систему исходных величин в комплексной форме. Для графического разложения несимметричную систему на симметричные составляющие воспользуемся следующим методом. Пусть несимметричная система фазных векторов А, В, С и соответствующая к ним система линейных векторов М, К, L.

Для прямой, обратной и нулевой симметричных составляющих системы фазных векторов имеем:

$$A_0 = \frac{1}{3}(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C}) \quad (7.4)$$

$$A_1 = \frac{1}{3}(\bar{A} + a\bar{B} + a^2\bar{C}) \quad (7.5)$$

$$A_2 = \frac{1}{3}(\bar{A} + a^2\bar{B} + a\bar{C}) \quad (7.3)$$

Заменяя А через В+М и С через В-К, найдем

Контрольные вопросы:

1. Многофазные цепи. Определения и классификация.
2. Соотношения между линейными и фазными величинами при соединении треугольником.
3. Как изменится режим работы трехфазной цепи, если осуществить переход от соединения в треугольник.
4. Преимущества измерения активной мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование трехфазной цепи при соединении приемника

Цель работы:

1. Получение практических навыков в составлении трехфазной цепи при соединении приемников в треугольник.
2. Ознакомление с особенностями работы трехфазной цепи, соединенной в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.
3. Определение опытным путем, а также по топографическим диаграммам зависимостей между линейными и фазными токами.
4. Выявление на опыте влияния обрыва линейного провода и обрыва одной фазы приемника на работу трехфазного приемника, соединенного в треугольник.
5. Ознакомление с измерением активной мощности трехфазной трехпроводной цепи по показаниям двух ваттметров.

План работы:

1. Определить с помощью фазоуказателя порядок следования фаз и разметить клеммы источника (A, B, C).
2. Собрать схему трехфазной системы при соединении фаз приемника в треугольник (рис.8.1)

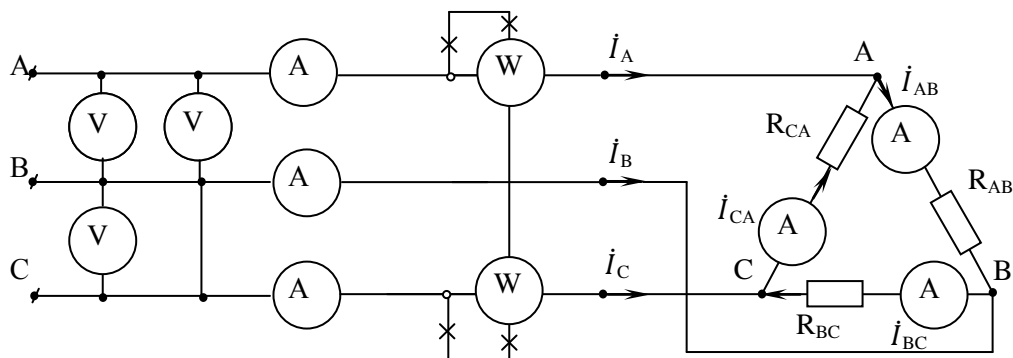


Рис.8.1.Соединения нагрузки в треугольники.

Примечание: указанные на рис.8.1 два ваттметра могут быть объединены в одном приборе - трехфазном ваттметре.

3. Составить таблицу паспортных данных измерительных приборов, используемых в схеме.
4. После проверки схемы преподавателем включить ее в сеть и произвести напряжений, токов и мощностей всех фаз при следующих нагрузках фаз приемника.
 - А) симметричная активная нагрузка трех фаз приемника.
 - Б) отключение одной фазы приемника.
 - В) несимметричная активная нагрузка фаз приемника.
 - Г) включение в одну из фаз приемника активно-индуктивного сопротивления
 - Е) включение в одну из фаз приемника емкостного сопротивления при сохранении индуктивного сопротивления в другой фазе.
5. По опытным данным построить топографические диаграммы для всех режимов работы схемы.
6. Определить параметры элементов схемы для различных режимов по топографическим диаграммам.

Указание к работе:

1. Определение последовательности фаз сети производится с помощью фазоуказателя согласно в лабораторной работе № 5.
2. Активная нагрузка состоит из ламп накаливания. Изменяя число включенных ламп получаем различную активную нагрузку фаз.
3. Измеряемые величины напряжений, токов и мощностей по всем опытам вносятся в сводную таблицу 8.1.

Таблица 8.1.

Вид нагрузки	$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}$	i_A	i_B	i_C	i_{AB}	i_{BC}	i_{CA}	P_A	P_C
	В	А	А	А	А	А	А	B_T	B_T
А.									
Б.									
В.									
Г.									
Е.									
Д.									

4. Построение топографических диаграмм производим по опытным данным для всех случаев симметричной и несимметричной нагрузок фаз приемника (рис.8.2,8.3,8.4,8.5,8.6.).

А) Симметричная активная нагрузка.

Построим вектора линейных напряжений в виде трехлучевой звезды и по ним направляем вектора фазных токов, линейные токи определяем как разность фазных токов. $I_A = I_{AB} - I_{BC}$; $I_B = I_{BC} - I_{CA}$; $I_C = I_{CA} - I_{AB}$. (рис.8.2)

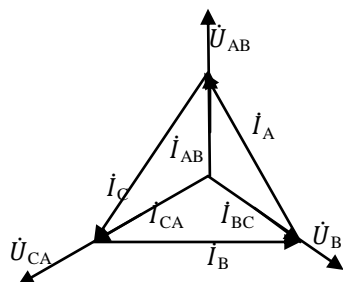


Рис.8.2. Симметричный режим

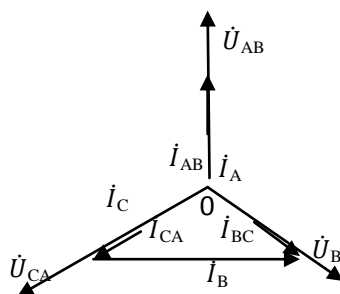


Рис.8.3. Несимметричный режим

Б) Отключение одной фазы приемника, например, фазы АВ. $I_{AB} = 0$. значения и направления остальных фазных токов, а также линейных токов определим из выражений линейных токов через фазные токи. (рис.8.3)

$$I_A = -I_{BC} \quad (8.1)$$

$$I_B = I_{BC} - I_{CA} \quad (8.2)$$

$$I_C = I_{CA} \quad (8.3)$$

В) Несимметричная активная нагрузка.

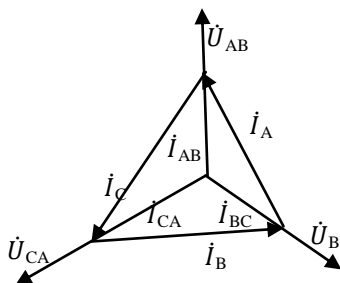


Рис.8.4. Несимметричная нагрузка.

Г) Рассмотрим построение топографической диаграммы для случая, когда в одну из фаз приемника включена активно-индуктивная нагрузка, а в остальные активное сопротивление.

Так как в фазах приемника ВС и СА активное сопротивление то вектора фазных токов \bar{I}_{BC} и \bar{I}_{AC} совпадают по фазе с векторами соответствующих напряжений. Расположение вектора фазного тока \bar{I}_{AB} находим методом засечек с точек В и С с помощью векторов линейных токов \bar{I}_A и \bar{I}_C (рис.8.5).

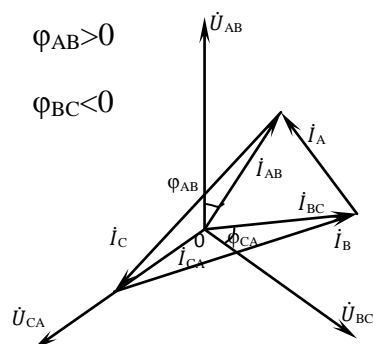
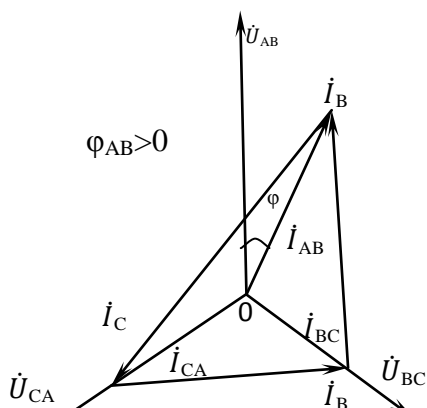


Рис.8.5. Симметричная нагрузка

Рис.8.6. Несимметричная нагрузка

Е) рассмотрим теперь построения топографической диаграммы для случая «е», когда во вторую фазу приемника включено активно-емкостное сопротивление, при сохранении активно-индуктивного сопротивления в первой фазе приемника. Так как в этом случае угол φ_{AB} остается неизменным и в третьей фазе ток \bar{I}_{AC} совпадает по фазе с вектором напряжения, то расположение вектора фазного тока \bar{I}_{BC} определяется также методом засечек с точек А и С с помощью векторов линейных токов \bar{I}_A и \bar{I}_B (рис.8.6).

5. Определить для всех режимов работы приемника сопротивления всех фаз. Для определения значений индуктивности и емкости воспользоваться векторными диаграммами. Метод определения перечисленных величин указан в инструкции по лабораторной работе № 3 (часть 1).

6. В трехпроводной системе для любой нагрузки фаз приемника обычно при измерении активной мощности применяют метод двух ваттметров (рис.8.1).

Для мгновенного значения мощности всей системы имеем:

$$P = U_A \cdot i_A + U_B \cdot i_B + U_C \cdot i_C \quad (8.4)$$

где U_A, U_B, U_C и i_A, i_B, i_C суть мгновенных значений фазных напряжений и фазных напряжений и фазных токов.

Так как при отсутствии нулевого провода $i_A + i_B + i_C = 0$ и $i_B = -i_A - i_C$, то получим: $P = U_A \cdot i_A - U_B \cdot i_A - U_B \cdot i_C + U_C \cdot i_C = (U_A + U_B) \cdot i_A + (U_C - U_B) \cdot i_C = U_{AB} \cdot i_A + U_{CB} \cdot i_C$, где U_{AB} и U_{CB} – мгновенные значения соответствующих линейных напряжений. Следовательно, для средней мощности трехфазной системы имеем:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_{AB} \cdot i_A \, dt + \frac{1}{T} \int_0^T U_{CB} \cdot i_C \, dt = P_{AB} + P_{BC}, \quad (8.5)$$

где P_{AB} и P_{BC} – мощности, показываемые первым и вторым ваттметрами. Показания первого ваттметра определяет величину $P_A = U_{AB} \cdot I_A \cos(30^\circ - \varphi)$, а второго $P_A = U_{CB} \cdot I_C \cos(30^\circ + \varphi)$. Суммируя показания двух приборов, получим активную мощность трех фаз нагрузки. Если стрелка одного из ваттметров отклонится в обратную сторону, то следует изменить направление точка (с переключением концов в токовой обмотке) ваттметра и считать его показания отрицательными. Это происходит при $\varphi > 60^\circ$ и $\cos \varphi < 0,5$.

При определении суммарной активной мощности нагрузки, в этом случае, из показания первого. При $\varphi > 60^\circ \cos(60^\circ + \varphi) = \cos(30^\circ + 60^\circ) = \cos 90^\circ = 0$ второй ваттметр дает нулевые показания.

Контрольные вопросы:

1. Многофазные цепи. Определения и классификация.
2. Соотношения между линейными и фазными величинами при соединении треугольником.
3. Как изменится режим работы трехфазной цепи, если осуществить переход от соединения в треугольник.
4. Преимущества измерения активной мощности трехфазной цепи методом двух ваттметров.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Фильтры симметричных составляющих

Цель работы:

1. Углубление знаний о методе симметричных составляющих.
2. Ознакомление со схемами фильтров симметричных составляющих.
3. Выделение при помощи фильтров прямой и обратной составляющих несимметричной трехфазной системы линейных напряжений.

План работы:

1. Определить порядок следования фаз в трехфазной сети с помощью фазоуказателя.
2. Определить полное сопротивление Z , активное R и реактивное X индуктивной катушки.
3. Вычислить емкость конденсаторов, включаемых в схему фильтра, а также добавочное сопротивление для ветви, содержащей индуктивную катушку.
4. Собрать на стенде схему фильтра (рис.9.1). После проверки схемы преподавателем, включить в сеть и измерить симметричные составляющие линейных напряжений U_1 и U_z , а также линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

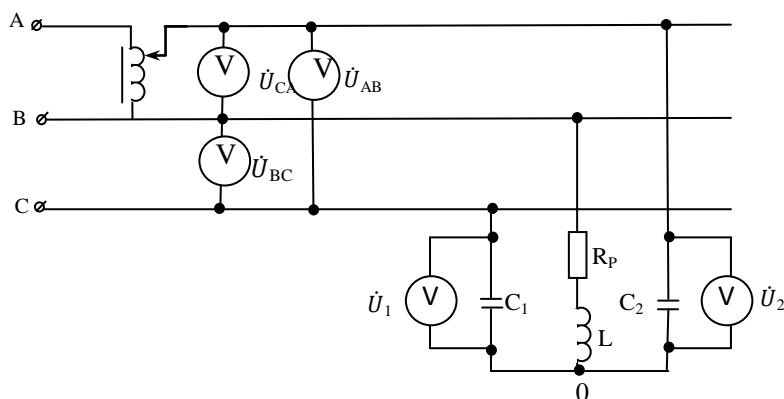


Рис.9.1. Схема фильтр симметричных составляющих.

5. Результаты измерений записать в таблицу 9.1.

Таблица 9.1.

№	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_1	U_z
	В	В	В	В	В

1.					
2.					
3.					

6. Графическое определение симметричных составляющих линейных напряжений.

Указания к работе:

1. Симметричные составляющие несимметричных систем можно определить не только аналитически или графически, но и экспериментально при помощи особых электрических схем называемых электрическими фильтрами симметричных составляющих. Эти фильтры часто применяются в схемах, защищающих электрические установки от ненормальных режимов.

В данной лабораторной работе рассматривается фильтр симметричных составляющих линейных напряжений (рис.9.1). Параметры элементов этой схемы фильтра должны удовлетворять следующим условиям: $R_1=R_2=0$; $X_1=X_2=-X$; $X=2X$; $X=2X_L$; $X_L=\frac{X}{2}$ где $X=\frac{1}{\omega c}$ - емкостное сопротивление первой и второй и второй ветви.

Как видно из вышеприведенных соотношений, параметры элементов фильтра зависит от параметров индуктивной катушки.

2. Для определения параметров индуктивной катушки воспользуемся следующей схемой (рис.9.2)

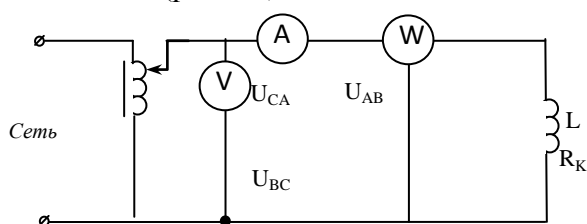


Рис.9.2. Схема индуктивной катушки.

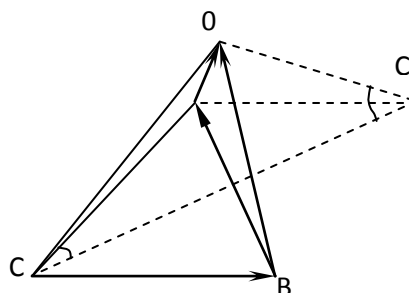


Рис.9.3. Векторная диаграмма

Измерив ваттметром активную мощность P , напряжение на зажимах катушки U и ток в ней I , вычислим параметры катушки (рис. 9.3).

$$P = U \cdot I \cos \varphi; \cos \varphi = \frac{P}{UI}; Z_K = \frac{U}{I}; R_K = Z_K \cdot \cos \varphi; X_L = Z_K \cdot \sin \varphi \quad (9.1)$$

Сопротивление реостата, включаемое последовательно с индуктивной катушкой, равно $R_P = R_3 - R_K$

3. При выполнении вышеуказанных условий $\dot{U}_{B0} = \dot{U}_1$ -прямая последовательность линейных напряжений, $\dot{U}_{A0} = \dot{U}_2$ -обратная последовательность линейных напряжений.

4. Топографическая диаграмма напряжений для рассматриваемой схемы фильтра представляет собою одновременно метод графического определения прямой и обратной составляющих \dot{U}_1 и \dot{U}_2 системы линейных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} .

Контрольные вопросы

1. Назначение фильтров симметричных составляющих.
2. Симметричные составляющие несимметричных величин в несимметричной трехфазной цепи, соединенной в звезду.
3. Симметричные составляющие несимметричных величин в несимметричной трехфазной цепи, соединенной в треугольник.
4. Значение метода симметричных составляющих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каримов А.С. . Назарий электротехника. – Т.: Ўқитувчи, 2003 .
2. Демирчан К.С., Нейман Л.Р. и др. /Теоретические основы электротехники: в 3-х тт., 4-е изд. – СПб.: "Питер", 2003 (а также предыдущие издания).
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. 11-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 701 с. (а также предыдущие издания).
4. Трофимова Т.И. Курс физики. Учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 1998. – 542 с.
5. Рашидов Й.Р., Абидов К.Г., Колесников И.К.. Электротехниканинг назарий асослари I, II, III қисмлар (маъруза матнлари тўплами), ТДТУ, 2002 й, 250 б.
6. Рашидов Й.Р., Абидов К.Г., Колесников И.К. «Электротехника-нинг назарий асослари» фанидан 1-оралиқ, 2- оралиқ ва якуний назорат саволлари тўплами. ТДТУ, 2002 й, 102 б.
7. Коровкин Н.В., Селина Е.Е., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. Сборник задач- Санкт-Петербург. Питер, 2004 г. 510с.

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. Последовательное включение приёмников энергии переменного тока	3
.....	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. Параллельное включение приёмников энергии переменного тока	9
.....	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. Исследование простой цепи переменного тока при смешанном соединении приёмников	14
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. Исследование цепей переменного тока с взаимной индуктивностью	20
.....	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. Исследование резонанса при последовательном соединении элементов R, L и C	24
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. Исследование при параллельном соединении элементов R, L и C	28
.....	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. Исследование трехфазной системы при соединении приемников звездой.....	31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. Исследование трехфазной цепи при соединении приемника.....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9. Фильтры симметричных составляющих	44
.....	

Редактор:

Ахметжанова Г.М.

Корректор:

Мардонова Э.З.