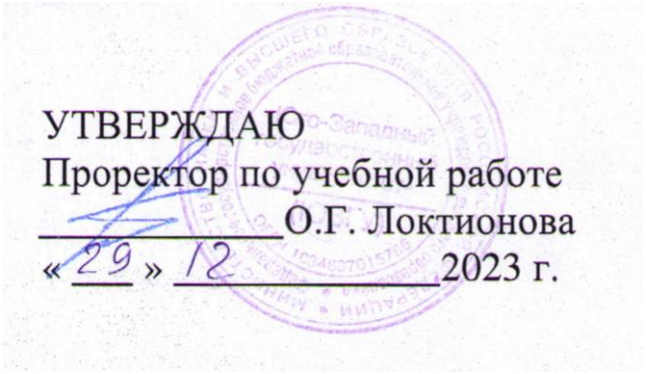
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем



ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по теоретическим основам электротехники

Курск 2023

УДК 621.3 (076.1)

Составители: А. С. Романченко, И. А. Башмакова

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент *А .С. Чернышёв*

Простая цепь переменного тока : методические указания по выполнению лабораторной работы по теоретическим основам электротехники для студентов технических специальностей и направлений подготовки / Юго-Зап. гос. ун-т ; сост.: А. С. Романченко, И. А. Башмакова. - Курск, 2023. - 14 с.: ил. 6, табл. 4. - Библиогр.: с. 14.

Методические указания содержат сведения по исследованию простых электрических цепей переменного тока с последовательным и параллельным соединением элементов. Указывается порядок выполнения лабораторной работы, правила оформления отчета. Лабораторная работа относится к разделу электрических цепей синусоидального тока, включая измерение параметров электрической цепи и простейшие методы её расчета.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теоретические основы электротехники».

Предназначены для студентов технических специальностей и направлений подготовки при проведении лабораторных занятий.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. . Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное изучение ряда основных положений, используемых при анализе цепей. Для этого по опытным данным определяются параметры отдельных участков (индуктивного и емкостного) и всей заданной простой цепи (последовательной и параллельной), а затем на основе сопоставления измеренных и рассчитанных по параметрам участков характеристик выполняется проверка законов сложения для последовательного и параллельного соединений данных участков.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. Изучить по конспекту лекций и рекомендованному учебнику в разделе «Электрические цепи однофазного синусоидального тока» параграфы, относящиеся к анализу простейших цепей синусоидального тока: последовательному и параллельному соединению элементов, применению закона Ома и законов Кирхгофа для данных соединений, построению векторных диаграмм.

2.2. Освоить методику выполнения лабораторной работы по настоящим методическим указаниям.

2.3. Заготовить таблицы для экспериментальных данных.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

В синусоидальных режимах основными параметрами всякого участка или ветви линейной электрической цепи при неизменной частоте являются полное сопротивление Z, активное и реактивное сопротивления R и X, сдвиг фаз тока и напряжения на участке, измеряемый углом φ. Все эти параметры связаны между собой:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \qquad (3.1)$$

$$\varphi = arctg(X/R). \qquad (3.2)$$

Режим участка характеризуют ток и напряжение (действующие значения – I, U), сдвиг фаз между ними, а также полная, активная и реактивная мощности (S, P, Q). Наглядное представление о режиме дает его векторная диаграмма. Применяются и другие характеристики: активные и реактивные составляющие тока и напряжения, проводимости, а также треугольники токов и напряжений, сопротивлений и проводимостей, треугольник мощностей.

Из треугольника напряжений можно записать формулы, связывающие между собой общее напряжение U на участке и его активную U_a и реактивную U_p составляющие, а также угол сдвига фаз φ напряжения и тока:

$$U_a = U \cos \varphi, \quad (3.3)$$

$$U_p = U \sin \varphi, \quad (3.4)$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \quad (3.5)$$

$$\varphi = arctg(U_p / U_a). \quad (3.6)$$

Из треугольника сопротивлений можно записать формулы, связывающие активное и реактивное сопротивления R и X участка с полным сопротивлением Z:

$$R = Z \cos \varphi, \quad (3.7)$$

$$X = Z \sin \varphi, \quad (3.8)$$

А также формулы (3.1) и (3.2) для полного сопротивления и сдвига фаз тока и напряжения участка.

Из треугольника мощностей можно записать формулы, связывающие между собой полную мощность S участка, его активную P и реактивную Q мощности, а также угол сдвига фаз φ напряжения и тока:

$$P = S \cos \varphi, \quad (3.9)$$

$$Q = S \sin \varphi, \quad (3.10)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (3.11)$$

$$\varphi = arctg(Q / P). \quad (3.12)$$

Из треугольника токов можно записать формулы, связывающие между собой ток участка I и его активную I_a и реактивную I_p составляющие, а также угол сдвига фаз φ напряжения и тока:

$$I_a = I \cos \varphi, \quad (3.13)$$

$$I_p = I \sin \varphi, \quad (3.14)$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (3.15)$$

$$\varphi = arctg(I_p / I_a). \quad (3.16)$$

Из треугольника проводимостей можно записать формулы, связывающие между собой полную проводимость Y участка, его активную G и реактивную B проводимости, а также угол сдвига фаз φ напряжения и тока:

$$G = Y \cos \varphi, \quad (3.17)$$

$$B = Y \sin \varphi, \quad (3.18)$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \quad (3.19)$$

$\varphi = arctg(B / G).$ (3.20)

Если участок электрической цепи представляет собой последовательное соединение элементов и известны активное R, реактивное X и полное Z сопротивления этого участка, то можно найти активную G, реактивную B и полную Y проводимости эквивалентного участка с параллельным соединением элементов по формулам:

$Y = 1/ Z,$ (3.21)

$G = R / Z^2 = R /(R^2+X^2),$ (3.22)

$B = X / Z^2 = X /(R^2+X^2).$ (3.23)

При обратном переходе от участка с параллельным соединением элементов и заданными значениями проводимостей к эквивалентному участку с последовательным соединением элементов его сопротивления можно найти по формулам:

$Z = 1/ Y,$ (3.24)

$R = G / Y^2 = G /(G^2+B^2),$ (3.25)

$X = B / Y^2 = B /(G^2+B^2).$ (3.26)

Знаки реактивных составляющих, реактивной проводимости и угла сдвига фаз φ обычно определяют по знаку реактивного сопротивления с последовательным соединением элементов: $X=\omega L–1/\omega C.$

Из треугольников также можно получить все формулы для мощностей:

$S = UI = ZI^2 = YU^2,$ (3.27)

$P = S \cos \varphi = UI\cos \varphi = U_aI = I_aU = RI^2 = GU^2,$ (3.28)

$Q = S \sin \varphi = UI\sin \varphi = U_pI = I_pU = XI^2 = BU^2.$ (3.29)

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

Векторная диаграмма напряжений для последовательного соединения участков (рисунок 1, а и б) представляет собой наглядное изображение уравнения по второму закону Кирхгофа:

$\underline{U} = \underline{U_1} + \underline{U_2},$ (3.30)

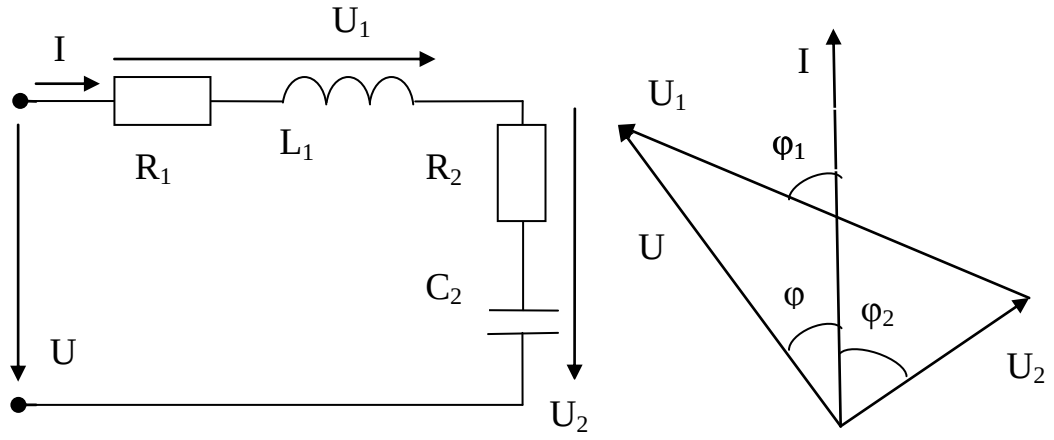
где U – напряжение на зажимах цепи, U_1 и U_2 – напряжения на её участках.

Раскладывая векторы напряжений на активные и реактивные составляющие, получаем диаграмму, представленную на рисунке 2, из которой следует:

$U_a = U_{a1} + U_{a2},$ (3.31)

$U_p = U_{p1} – U_{p2},$ (3.32)

где U_{p2} вычитается, т.к. представляет собой напряжение на емкости.



а) б)

Рисунок 1. Последовательное соединение индуктивного и емкостного участков (а) и его векторная диаграмма (б)

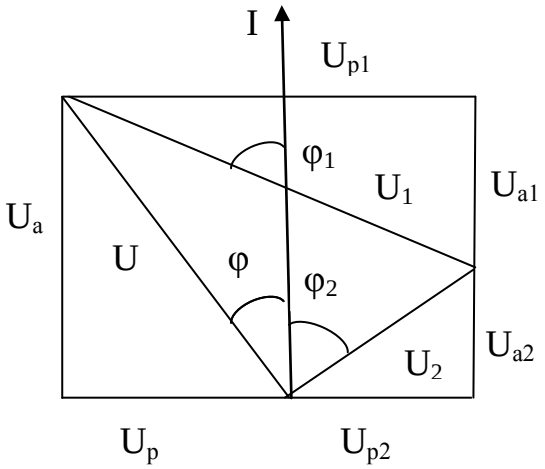


Рисунок 2. Разложение векторов напряжений на составляющие

Построение векторных диаграмм для последовательных цепей начинают с вектора тока I, так как ток на всех участках цепи один и тот же. По второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U} = \underline{U}_L + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_C = jX_L I + R_1 I + R_2 I - jX_C I \qquad (3.33)$$

Проводим вектор тока I (рисунок 3). Затем в выбранном масштабе относительно вектора тока строим напряжения на отдельных элементах и полное напряжение цепи, базируясь на уравнение (3.33).

Разделив напряжения в выражениях (3.30) - (3.32) на ток, получим формулы для нахождения полного, активного и реактивного сопротивлений цепи через соответствующие сопротивления участков:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2\,, \qquad (3.34)$$

$$R = R_1 + R_2, \qquad (3.35)$$

$$X = X_1 - X_2, \qquad (3.36)$$

где X_2 – емкостное сопротивление, поэтому вычитается.

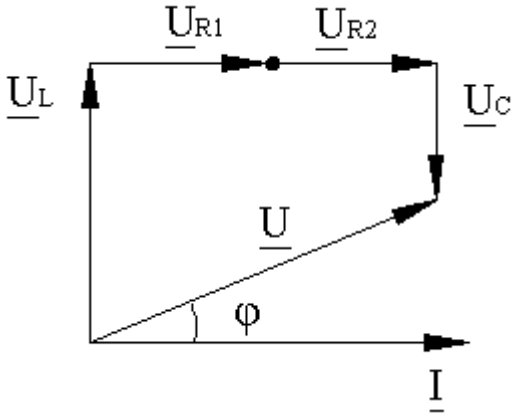


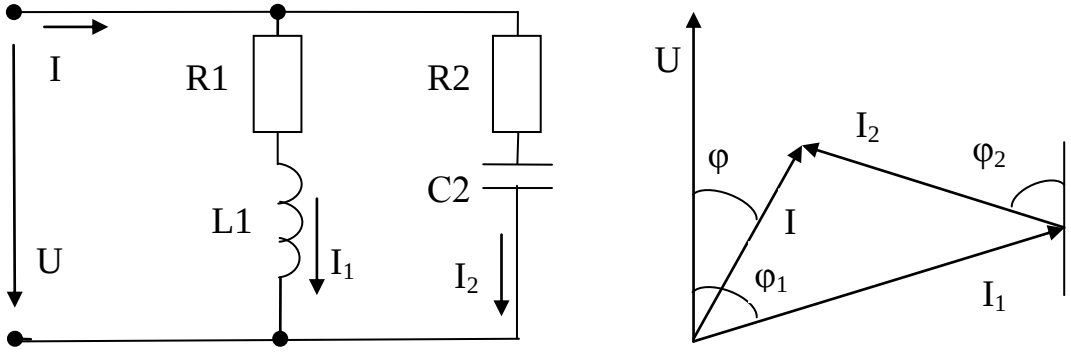
Рисунок 3. Векторная диаграмма напряжений последовательной цепи

Таким образом, 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.

Векторная диаграмма токов параллельного соединения участков (рисунок 4, а и б) изображает составленное согласно первому закону Кирхгофа уравнение для узла:

$$\underline{I} = \underline{I_1} + \underline{I_2}, \qquad (3.37)$$

где I – ток в неразветвленной части цепи, I_1 и I_2 – токи ветвей.



а) б)

Рисунок 4. Параллельное соединение индуктивного и емкостного участков (а) и его векторная диаграмма (б)

Раскладывая векторы токов на активные и реактивные составляющие аналогично, как действовали для схемы с последовательным соединением участков, получаем следующие формулы:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}, \qquad (3.38)$$

$$I_p = I_{p1} - I_{p2}, \qquad (3.39)$$

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 , \quad (3.40)$$

$$G = G_1 + G_2, \quad (3.41)$$

$$B = B_1 - B_2, \quad (3.42)$$

где I_{p2}, B_2 относятся к емкостному участку, поэтому вычитаются.

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

Построим векторную диаграмму токов для параллельной цепи на рисунке 4, разложив токи ветвей на активные и реактивные составляющие. По первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}=\underline{I}_1+\underline{I}_2=\underline{U}\underline{Y}_1+\underline{U}\underline{Y}_2=\underline{U}G_1-j\underline{U}B_1+\underline{U}G_2+ j\underline{U}B_2=j\underline{I}_{a1}- j\underline{I}_{p1}+ j\underline{I}_{a2}+ j\underline{I}_{p2}. \quad (3.43)$$

Проводим общий вектор напряжений U (рисунок 5). Затем в выбранном масштабе относительно вектора напряжений строим частичные токи и общий ток, базируясь на уравнение (3.43).

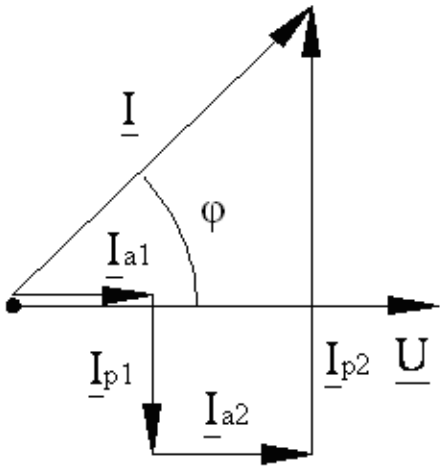


Рисунок 5. Векторная диаграмма токов параллельного соединения индуктивного и емкостного участков

Следовательно, при параллельном соединении токи и полные проводимости участков складываются геометрически, активные составляющие токов и активные проводимости складываются арифметически, реактивные составляющие токов и реактивные проводимости складываются алгебраически.

Законы сложения в виде формул (3.30) - (3.32), (3.34) - (3.42) и формулы (3.21) - (3.26) составляют основу метода эквивалентных преобразований (метода свёртки) без использования комплексных чисел (иначе – метода проводимостей), применяемого для расчета обычных в практике простых цепей.

При построении векторных диаграмм надо учитывать, что наибольшую информацию и наглядность дают диаграммы, являющиеся

изображением совокупности независимых уравнений Кирхгофа этой цепи. Для напряжений наилучшей является топографическая диаграмма.

Топографической называют векторную диаграмму, каждая точка которой однозначно соответствует точке схемы. Преимущество её в том, что напряжение между любыми двумя точками схемы измеряется отрезком (вектором), проведенным между такими же точками диаграммы.

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Источником питания в работе является лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) АТ, установленный внутри стенда (зажимы 0 ... 250 В) и подключаемый тумблером ЛАТР. Перед сборкой схем тумблер ЛАТР должен быть в положении ВЫКЛ, а ручка регулировки напряжения автотрансформатора – в нулевом положении, т.е. против часовой стрелки до упора.

В качестве индуктивного участка используется индуктивная катушка L_1 (зажимы 1-4). Емкостный участок составляется последовательным соединением батареи конденсаторов (параллельное соединение конденсаторов общей емкостью в пределах 8-18 мкФ) и реостата с сопротивлением около 500 Ом. Включить полное сопротивление реостата.

Используемые измерительные приборы: амперметр электромагнитной системы на 1 А, вольтметр электромагнитной системы на 150 В и 300 В, ваттметр электродинамической системы на 150 Вт и 300 Вт (пределы измерения тока 1 А и напряжения 150 В и 300 В).

Напряжение питания устанавливается в пределах 100-200 В. Длительно допустимый ток реостата – 0,35-0,4 А.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Ознакомиться с используемыми приборами и аппаратурой, определить цену деления измерительных приборов.

5.2. Вначале определяются параметры индуктивного и емкостного участков. Для этого собрать электрическую схему (рисунок 6, в качестве сопротивления Z взять вначале индуктивный участок, затем емкостный участок) и дать её проверить лаборанту или преподавателю. При этом тумблер ЛАТР должен находиться в выключенном со-

стоянии (нижнее положение), а регулятор автотрансформатора в положении до упора против часовой стрелки. В ходе всей работы сопротивления индуктивного и емкостного участков не меняются.

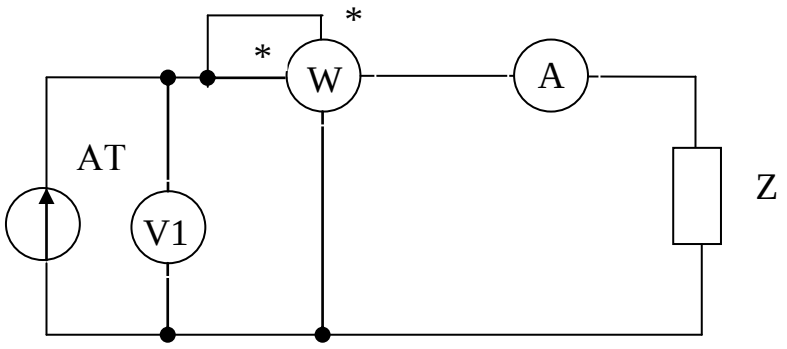


Рисунок 6. Схема рабочей цепи

Измерения параметров участков (вначале индуктивного, затем емкостного) выполняются методом амперметра, вольтметра и ваттметра по общей схеме на рисунке 6 при двух напряжениях питания – например, 100 В и 140 В или 140 и 180 В. Данные измерений внести в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры индуктивного и емкостного участков

№ п/п	Измерено			Вычислено							Примечание
	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											
3											Емкостный участок
4											
				Среднее значение:							
											Индуктивный участок
											Емкостный участок

5.3. Исследуемые индуктивный и емкостный участки соединить в последовательную цепь (см. рисунок 1) и включить вместо сопротивления *Z* в рабочую цепь на рисунке 6. Произвести измерения тока и мощности при поданном на рабочую цепь напряжении в пределах 160-200 В. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2. Параметры последовательной цепи

Последовательная цепь		Примечание
U, В		Из опытов
I, А		
P, Вт		
φ, град		
U_a, В		
$U_{a\Sigma}$, В		R_1I+R_2I
U_p, В		
$U_{p\Sigma}$, В		$X_1I–X_2I$
R, *Ом*		
R_Σ, *Ом*		R_1+R_2
X, *Ом*		
X_Σ, *Ом*		$X_1–X_2$
Z, *Ом*		
Z_Σ, *Ом*		$\sqrt{R_\Sigma^2+X_\Sigma^2}$

5.4. Исследуемые индуктивный и емкостный участки соединить в параллельную цепь (см. рисунок 4) и включить вместо сопротивления Z в рабочую цепь на рисунке 6. Произвести измерения тока и мощности при поданном на рабочую цепь напряжении в пределах 160-200 В. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3. Параметры параллельной цепи

Параллельная цепь		Примечание
U, В		Из опытов
I, А		
P, Вт		
φ, град		
I_a, В		
$I_{a\Sigma}$, В		G_1U+G_2U
I_p, В		
$I_{p\Sigma}$, В		$B_1U–B_2U$
G, *1/Ом*		
G_Σ, *1/Ом*		G_1+G_2
B, *1/Ом*		
B_Σ, *1/Ом*		$B_1–B_2$
Y, *1/Ом*		
Y_Σ, *1/Ом*		$\sqrt{B_\Sigma^2+X_\Sigma^2}$

5.5. Выключить стенд, привести выключатели и регуляторы в исходное состояние и, не разбирая цепи, дать проверить результаты измерений преподавателю.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. По полученным экспериментальным данным п.5.2 рассчитать значения сопротивлений и проводимостей индуктивного и емкостного участков и внести их в таблицу 1. Для каждого участка при каждом напряжении находим:

$Z=U/I$, $R=Z\cos\varphi$,

$X=Z\sin\varphi$ или $X=\sqrt{Z^2-R^2}$,

$Y=I/U$, $G=Y\cos\varphi$,

$B=Y\sin\varphi$ или $B=\sqrt{Y^2-G^2}$.

Найти их средние значения (среднеарифметические значения) для каждого участка и внести их в таблицу 1.

6.2. По полученным экспериментальным данным п.5.3 рассчитать значения активных и реактивных составляющих напряжения и сопротивлений последовательного соединения индуктивного и емкостного участков по формулам (3.3), (3.4), (3.7), (3.8) и внести их в таблицу 2.

6.3. По полученным экспериментальным данным п.5.4 рассчитать значения активных и реактивных составляющих тока и проводимостей параллельного соединения индуктивного и емкостного участков по формулам (3.13), (3.14), (3.17), (3.18) и внести их в таблицу 3.

6.4. С целью проверки законов сложения в таблицы 2 и 3 наряду со значениями, определяемыми по результатам измерений, внести сопоставляемые с ними значения, рассчитанные по средним параметрам участков. Для расчета компонент составляющих использовать опытные данные п.5.3, 5.4 (ток или напряжение). Например, $U_{a\Sigma}=R_1I+R_2I$, где R_1 *и* R_2 – средние значения активных сопротивлений индуктивного и емкостного участков, найденные в п.6.1, I – ток последовательной цепи, измеренный в п.5.3.

В столбец примечаний таблиц 2 и 3 вписать соответствующие расчетные формулы.

6.5. Считая заданным напряжение на зажимах цепи, при котором выполнялись измерения в п.5.3, 5.4, для последовательной цепи и для параллельной цепи рассчитать ток и активную мощность, пользуясь

данными только таблицы 1. Сопоставление измеренных и рассчитанных значений представить в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение опытных и расчетных данных

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

6.6. Сравнивая расчетные и опытные значения в таблицах 2, 3, 4, сделать выводы о результатах экспериментальной проверки законов сложения и метода свёртки.

6.7. Построить (с указанием масштабов) векторные диаграммы измеренных режимов последовательной и параллельной цепей по данным таблиц 2 и 3.

7. 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 индуктивной катушки?
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 индуктивной катушки, 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, т.е. его представление в виде тригонометрической функции?

11. Какими мощностями характеризуются цепи при гармоническом воздействии? Каковы их определения?

12. Что называют треугольником мощности?

13. Как связана полная комплексная мощность с активной и реактивной мощностями?

14. Как будет меняться активная мощность всей параллельной цепи и активные мощности её ветвей при переменной частоте входного напряжения, например, при её росте?

15. Что такое метод амперметра, вольтметра и ваттметра? Изобразите схему и запишите формулы для определения параметров двухполюсника этим методом.

16. Что такое топографическая диаграмма напряжений? Изобразите её для схемы на рисунке 1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. – Текст непосредственный.

2. Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Попов. - 3-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 575 с. – Текст непосредственный.

3. Бакалов, В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М.: Радио и связь, 1989. – 525 с. – Текст непосредственный.

4. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – Текст непосредственный.