

1.5 или от-

- мощность источника: $P_H = U_H I_H$;
 - мощность нагрузки: $P_H = I_H^2 R_H$;
 - расчетное значение сопротивления нагрузки: $R_H = \frac{U_H}{I_H}$;
 - КПД: $\eta = \frac{P_H}{P_{\Sigma}}$;
 - потери мощности: $\Delta P = P_1 - P_2$;
 - сопротивление проводов ЛЭП: $R_L = \frac{U_L}{I_{\text{кз}}}$;
 - падение напряжения в ЛЭП: $\Delta U = U_1 - U_2$;
2. По данным таблицы 3.3 построить графики $U_5(I)$, $P_H(I)$, $\eta(I)$, $P_H(I)$ и $R_H(I)$, откладывая ток по оси абсцисс. Сделать анализ полученных зависимостей.

Дополнительное задание

Проверить метод эквивалентного генератора (метод холостого хода и короткого замыкания). Для этого привести исходную схему (рис. 3.3) к виду рис. 3.2, выделив нагрузочное сопротивление, оставшуюся часть поместив активным двухполюсником. Рассчитать ЭДС двухполюсника и его внутреннее сопротивление.

3.6. Контрольные вопросы

1. Рассказать ход выполнения работы.
2. Какие электрические цепи можно назвать двухполюсником?
3. Записать условие передачи максимальной мощности от двухполюсника нагрузке.
4. Записать соотношения, характеризующие режимы холостого хода и короткого замыкания.

Лабораторная работа № 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

4.1. Цель работы

Изучение основных соотношений между параметрами в простых электрических цепях; построение векторных диаграмм, треугольников напряжений, сопротивлений и мощностей для цепей с последовательным соединением элементов r и L , r и C .

4.2. Краткие теоретические сведения

Идеальными пассивными элементами электрической цепи переменного тока являются резистивный, индуктивный и емкостный элементы. **Резистивный элемент r** обладает активным сопротивлением. В нем происходит необратимый процесс преобразования электрической энергии в тепловую. **Индуктивный элемент L** накапливает энергию в виде энергии магнитного поля. **Емкостный элемент C** накапливает энергию в виде энергии электрического поля. Индуктивный и емкостный элементы характеризуются соответственно индуктивным X_L и емкостным X_C реактивными сопротивлениями.

При синусоидальном напряжении источника $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ ток резистивного элемента будет также синусоидальным $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$. Ток и напряжение совпадают по фазе, таким образом, угол сдвига фаз $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0^\circ$,

где φ_u, φ_i — начальные фазы соответственно напряжения и тока.

При протекании по индуктивному элементу синусоидального тока $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$, согласно закону электромагнитной индукции, на элементе появится синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$, причём напряжение опережает ток по фазе на 90° , $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$.

На емкостном элементе напряжение и ток также изменяются по синусоидальному закону, но напряжение отстает от тока по фазе на 90° или $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90^\circ$.

Для рассматриваемых элементов закон Ома в дифференциальной комплексной формах записи представлены в таблице 4.1.

Таблица 4

Элемент	Дифференциальная форма	Комплексная форма
Резистор, r	$u_r = r i$	$\dot{U} = r \dot{I}$
Индуктивность, L	$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$	$\dot{U} = j X_L \dot{I}$
Емкость, C	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$	$\dot{U} = -j X_C \dot{I}$

На рисунках 4.1, а, б, в показаны соответствующие векторные диаграммы, полученные путем реализации законов Ома (записанных в комплексной форме записи) на комплексной плоскости. При построении учитывалось, что умножение вектора на $j = e^{j90^\circ}$ соответствует его повороту

на 90° в положительном направлении (против часовой стрелки), а умножение вектора на $-j = e^{-j90^\circ}$ соответствует его повороту на 90° в отрицательном направлении (по часовой стрелке).

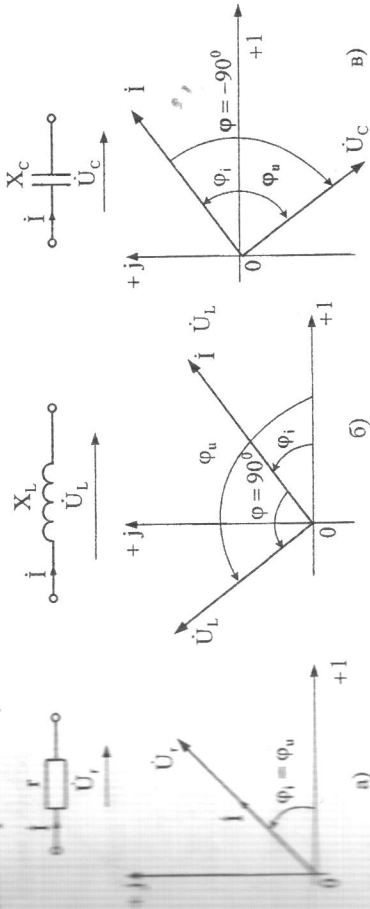


Рис. 4.1. Векторные диаграммы

На рисунке 4.2 представлено последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов.

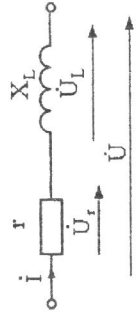


Рис. 4.2. Последовательное соединение r и L элементов

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа в комплексной форме, имеет вид

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L = r \dot{I} + j X_L \dot{I}. \quad (4.1)$$

На рисунке 4.3, а показана реализация уравнения (4.1) на комплексной плоскости. При построении вектор тока \dot{I} был направлен по вещественной оси и было учтено, что напряжение на резистивном элементе \dot{U}_r совпадает с током, напряжение на индуктивном элементе \dot{U}_L опережает ток на 90° . Вектор входного напряжения получен путем суммирования векторов \dot{U}_r и \dot{U}_L .

Разделив уравнение (4.1) на ток, получают соотношение для полных комплексных сопротивлений:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_r}{\dot{I}} + \frac{\dot{U}_L}{\dot{I}} = r + j X_L = Z. \quad (4.2)$$

где $\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z e^{j\varphi}$ — полное комплексное сопротивление электрической цепи;

$Z_r = \frac{\dot{U}_r}{\dot{I}} = r = r e^{j0}$ — полное комплексное сопротивление резистивного элемента;

$Z_L = \frac{\dot{U}_L}{\dot{I}} = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$ — полное комплексное сопротивление индуктивного элемента.

Умножив уравнение (4.1) на сопряженный вектор тока \dot{I}^* , получают соотношение для полной комплексной мощности

$$\dot{U}\dot{I} = \dot{U}_r \dot{I} + \dot{U}_L \dot{I} = r\dot{I}^2 + jX_L \dot{I}^2$$

или

$$\dot{S} = P + jQ = Se^{j\varphi}, \quad (4.3)$$

где $\dot{S} = \dot{U}\dot{I} = Se^{j\varphi}$ — полная комплексная мощность электрической цепи;

$P = U_r I^2$ — активная мощность электрической цепи;

$Q = U_L I^2$ — реактивная мощность электрической цепи.

На рисунках 4.3, б, в показана геометрическая реализация уравнений (4.2) и (4.3).

Треугольник на рисунке 4.3, б называется *треугольником сопротивлений*, треугольник на рисунке 4.3, в — *треугольником мощностей*.

Основные соотношения треугольников напряжений, сопротивлений и мощности для цепи r-L:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2}; \quad U_r = U \cos\varphi;$$

$$U_L = U \sin\varphi;$$

$$r = Z \cos\varphi; \quad X_L = Z \sin\varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad P = S \cos\varphi; \quad Q = S \sin\varphi;$$

$$\cos\varphi = \frac{U_r}{U} = \frac{r}{Z} = \frac{P}{S};$$

— коэффициент мощности $\cos\varphi$.

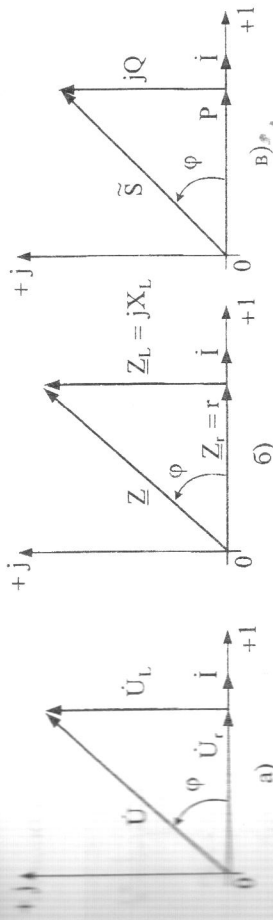


Рис. 4.3. Векторные диаграммы напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи r-L

На рисунке 4.4 представлено последовательное соединение резистивного и емкостного элементов.

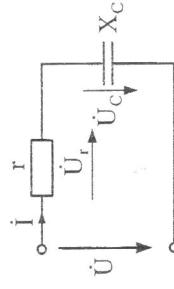


Рис. 4.4. Последовательное соединение элементов r и C

Векторная диаграмма напряжений для цепи рисунка 4.4 строится на основании уравнения:

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_C = r\dot{I} + (-jX_C)\dot{I}, \quad (4.4)$$

где $\dot{U}_r = r\dot{I}$ — падение напряжения на резистивном элементе;

$\dot{U}_C = -jX_C\dot{I} = Z_C\dot{I}$ — падение напряжения на емкостном элементе;

$Z_C = r - jX_C = Ze^{j\varphi}$ — полное комплексное сопротивление электрической цепи.

Полная комплексная мощность всей цепи рисунка 4.4

$$\dot{S} = P - jQ_C = Se^{j\varphi},$$

где $S = UI$ — полная мощность (модуль полной комплексной мощности);

$P = U_r I = rI^2$ — активная мощность;

$Q = U_C I = X_C I^2$ — реактивная мощность;

$$\varphi = \arctg\left(\frac{-U_C}{U_r}\right) = \arctg\left(\frac{-X_C}{r}\right) = \arctg\left(\frac{-Q_C}{P}\right) < 0$$

— сдвиг фаз между входным напряжением и током.

Треугольник напряжений (рис. 4.5, а), а из него треугольники сопротивлений и мощностей (рис. 4.5, б, в) для цепи r-C получаются аналогично.

Варианты задания напряжения и частоты генератора

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
U, В	1	2	3	4	5	1	2	3
f, кГц	6	5	4	3	2	3	2	1

4.4. Порядок проведения работы

4.4.1. Выполнение лабораторной работы на стенде

1. Установить схемную плату в соответствующие гнезда макетной платы NI Elvis II.
2. Открыть измерительную панель приборов, для этого на рабочем столе запустить файл ТОЭ.exe, выбрать «Лабораторная работа № 3а» (рис. 4.7).

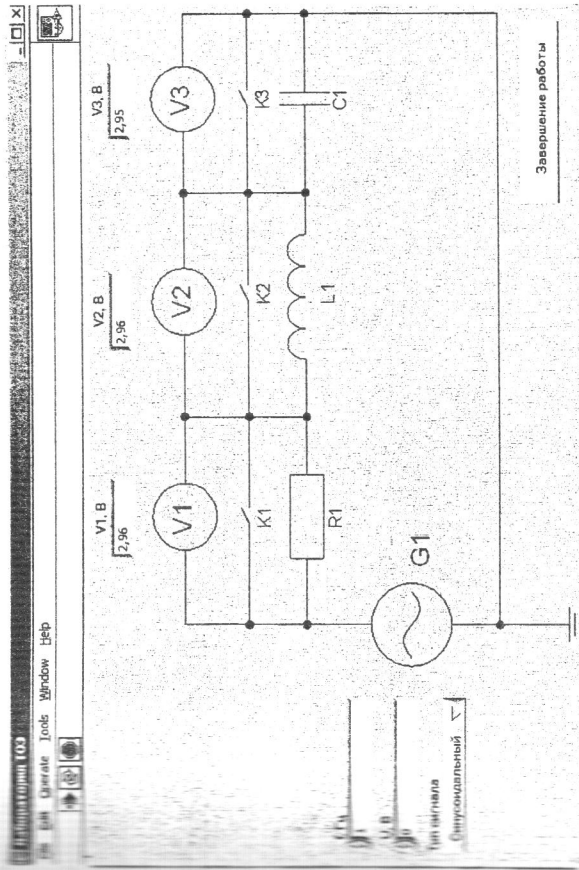


Рис. 4.7. Измерительная панель приборов

3. Установить величину амплитуды и частоты генератора из таблицы 4.2 (вариант указывает преподаватель).
4. Исследовать последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов. Для этого ключ K3 – замкнуть; ключи K1 и K2 – разомкнуть. **Пригласить преподавателя для контроля.** Включить стенд.

но рассмотренному ранее последовательному соединению резистивного и индуктивного элементов.

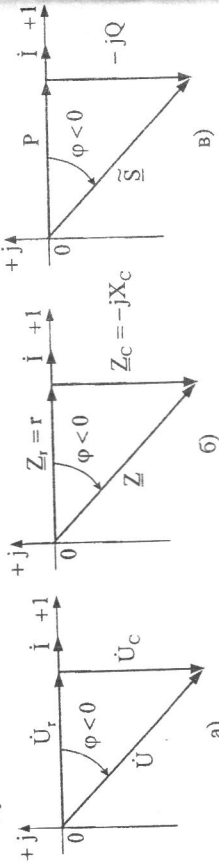


Рис. 4.5. Векторные диаграммы напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи r-C

Основные соотношения треугольников напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи r-C:

– модуль входного напряжения:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_C^2}; \quad U_r = U \cos \varphi; \quad U_C = U \sin \varphi;$$

– модуль полного комплексного сопротивления:

$$Z = \sqrt{r^2 + X_C^2}; \quad r = Z \cos \varphi; \quad X_C = Z \sin \varphi;$$

– полная мощность: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad P = S \cos \varphi; \quad Q = S \sin \varphi; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$.

4.3. Схема компонентной цепи

Схема компонентной цепи для проведения эксперимента представлена на рисунке 4.6.

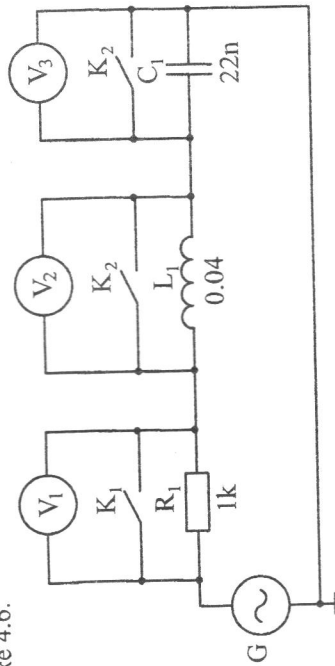


Рис. 4.6. Электрическая схема лабораторной работы (R1 = 1000 Ом, L1 = 0,04 Гн, C1 = 22 нФ)

Провести измерения напряжений и тока на участках исследуемой цепи, занести показания приборов в соответствующие графы таблицы 4.3. Увеличив частоту f на 1 кГц, повторить измерения напряжений и тока. Показания приборов занести в таблицу 4.3.

5. Исследовать последовательное соединение резистивного и емкостного элементов. Для этого ключ **K2** – замкнуть; ключи **K1, K3** – разомкнуть. Провести измерения напряжений и тока на участках исследуемой цепи и занести показания приборов в соответствующие графы таблицы 4. Увеличив частоту f на 1 кГц, повторить измерения напряжений и тока. Показания приборов занести в таблицу 4.4.

6. **Выключить стенд, пригласить преподавателя для контроля.**

Таблица 4.3

Исследование r-L цепи. Выполнение на стенде

Вариант №	Измерено		Вычислено										
	U_m	f	U_1	U_2	U	I	Z	X_L	P	Q_L	S	$\cos\phi$	ϕ
3		Гц	В	В	В	А	Ом	Ом	Вт	ВАр	ВА	-	град
4			1,97	1,14									
5			2,01	1,27									

Таблица 4.4

Исследование r-C цепи. Выполнение на стенде

Вариант №	Измерено		Вычислено										
	U_m	f	U_1	U_2	U	I	Z	X_C	P	Q_C	S	$\cos\phi$	ϕ
3		Гц	В	В	В	А	Ом	Ом	Вт	ВАр	ВА	-	град
6			0,76	1,93									
7			0,87	1,78									

4.4.2. Компьютерное моделирование

Основные измерения

1. Запустить программу Multisim, собрать схему рисунка 4.8 или открыть файл lab4_toe.ms10.
2. Раскрыть панель генератора, установить величину амплитуды и частоты генератора из таблицы 4.2 (вариант указывает преподаватель). Установить режим работы измерительных приборов (mode) – AC.
3. Исследовать **последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов**. Для этого ключ **K3** – замкнуть; ключи **K1, K2** разомкнуть.