

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ



Санкт-Петербург  
2005

Методические указания к  
лабораторным работам по дисциплине  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Санкт-Петербург  
2005

УДК 621.3

*Осипов Ю.М., Петров Е.А., Толмачев В.А., Усольцев А.А* Методические указания к лабораторным работам по дисциплине ЭЛЕКТРОТЕХНИКА /

**Часть 1, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. – СПб: СПб ГУИТМО, 2005 – 41 с.**

Пособие содержит методические указания к шести лабораторным работам по исследованию установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях.

Пособие составлено с учетом проведения лабораторных работ фронтальным методом на универсальных стендах в лаборатории электрических цепей кафедры ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ и ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.

Методические указания рекомендованы студентам всех специальностей, изучающих дисциплины ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ и ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.

Рекомендовано учебно-методической комиссией факультета КТ и У СПб ГУИТМО.

Председатель УМК факультета КТ и У

В.В. Кириллов

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2005

© Осипов Ю.М., Петров Е.А., Толмачев В.А., Усольцев А.А., 2005.

Юрий Михайлович Осипов, Евгений Алексеевич Петров,  
Валерий Александрович Толмачев, Александр Анатольевич Усольцев

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

В авторской редакции  
Компьютерная верстка и дизайн

В. А. Толмачев

Зав. редакционно-издательским отделом

Н. Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 5.11.99

Подписано к печати 25.05.05

Отпечатано на ризографе. Тираж 500 экз. Заказ № 849

**Редакционно-издательский отдел**

Санкт-Петербургского государственного университета  
информационных технологий, механики и опти-  
тики

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

X



## Лабораторная работа 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ПАССИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы – приобретение навыков экспериментального исследования цепей синусоидального тока с помощью наиболее распространенных приборов: амперметра, вольтметра, электронного осциллографа и генератора синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой и частотой.

#### Указания к выполнению работы

К работе следует приступить после изучения раздела “Электрические цепи синусоидального тока” рекомендованной учебной литературы, расположенной в конце настоящего пособия. Выполнить расчеты для указанных преподавателем параметров элементов исследуемых цепей.

#### 1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис.1.1) содержит генератор, усилитель, амперметр, вольтметр, двухканальный осциллограф и коммутационную панель.

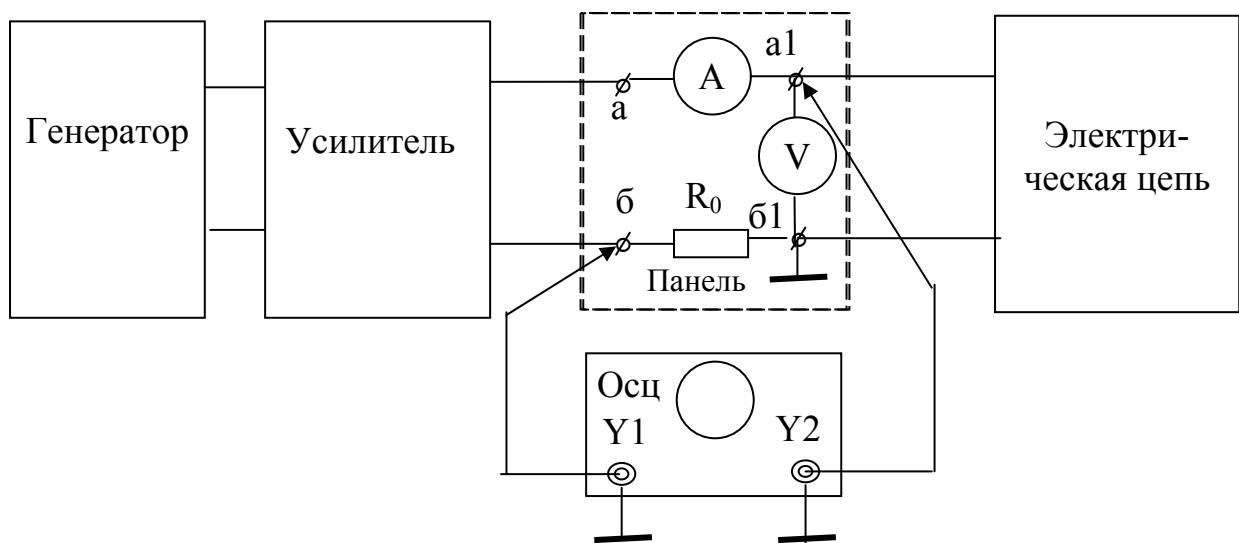


Рис.1.1

Источником синусоидального периодического напряжения в установке служит генератор типа Г6-15. Амплитуду выходного напряжения генератора можно регулировать в пределах от 0,01 до 10 В и частоты от 0,001 Гц до 1000 Гц.

Напряжение с выхода генератора приложено к входным зажимам усилителя типа 100У-101. Выходное напряжение последнего подключается к клеммам "а" и "б" коммутационной панели. К клеммам "а1" и "б1" коммутационной панели подключаются зажимы исследуемых электрических це-

пей (двухполюсников), собранных по схемам 1 ÷ 10, приведенным в левом столбце таблицы 1.1, с использованием магазина сопротивлений Р4830, магазина индуктивностей Р567 и магазина конденсаторов Р5025. К тем же зажимам подключен вольтметр, измеряющий действующее значение напряжения на зажимах двухполюсника. Заданное значение его устанавливается левой рукояткой " " на передней панели усилителя.

Между зажимами "а1" и "а" коммутационной панели последовательно с двухполюсником включен амперметр, измеряющий действующее значение  $I$  синусоидального тока в цепи.

Между зажимами "б" и "б1" коммутационной панели последовательно с двухполюсником включен измерительный резистор с малым сопротивлением  $R_0$ , напряжение на котором пропорционально току двухполюсника.

Для наблюдения синусоидальных кривых напряжения и тока и для измерения фазового сдвига между ними служит двухканальный осциллограф типа С1-83. При указанной на рисунке 1.1 схеме включения входов осциллографа луч канала "Y1" описывает кривую тока  $i(t)$ , а луч канала "Y2" - кривую напряжения  $u(t)$  (рис.1.2).

## 2. Программа работы

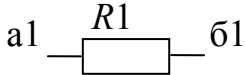
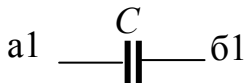
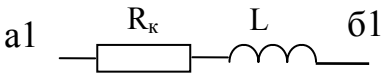
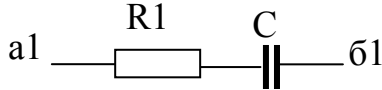
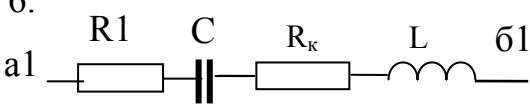
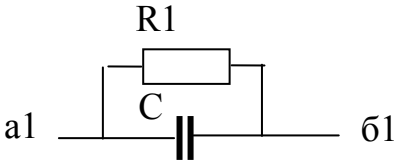
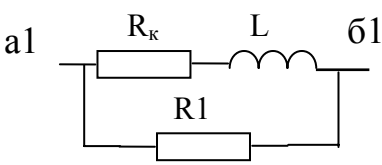
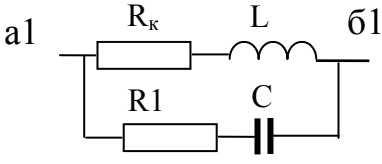
В работе последовательно производится измерение действующего значения тока, протекающего через зажимы и фазового сдвига между напряжением на зажимах и током для двухполюсников, схемы которых представлены в левом столбце таблицы 1.1. Результаты измерения сравниваются с их расчетными значениями, полученными по формулам, представленным в правом столбце таблицы 1.1. Значения параметров элементов исследуемых цепей, амплитуды и частоты выходного напряжения генератора указываются на стенде или задаются преподавателем.

## 3. Методика выполнения работы

Методика выполнения каждого из 9 пунктов работы состоит в следующем.

- Собрать схему двухполюсника в соответствии с таблицей 1.1 и установить на магазинах заданные параметры элементов.
- Установить заданную частоту напряжения генератора рукояткой "Частота" на его передней панели.
- Рукоятками "Амплитуда" генератора и " " усилителя установить заданное действующее значение напряжения  $U$  на зажимах двухполюсника, измеряя его вольтметром.
- Измерить действующее значение тока  $I$  в цепи с помощью амперметра.

Таблица.1.1.

|    |                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. |    | $I = U/z; R = R_1; X = 0; z = R_1;$<br>$\varphi = \arctg(X/R) = 0.$                                                                                                                                                                                                     |
| 2. |    | $I = U/z; R = 0; X = -x_c; x_c = 1/\omega C;$<br>$z = x_c; \varphi = \arctg(-\infty) = -\pi/2.$                                                                                                                                                                         |
| 3. |    | $I = U/z; R = R_k; X = x_L; x_L = \omega L;$<br>$z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{(\omega L)^2 + R_k^2};$<br>$\varphi = \arctg(X/R) = \arctg(\omega L / R_k).$                                                                                                              |
| 4. |    | $I = U/z; R = R_k + R_1; X = x_L; x_L = \omega L;$<br>$z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{(\omega L)^2 + (R_k + R_1)^2};$<br>$\varphi = \arctg(X/R) = \arctg(\omega L / R).$                                                                                                  |
| 5. |    | $I = U/z; R = R_1; X = -x_c; x_c = 1/\omega C;$<br>$z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{(1/\omega C)^2 + R_1^2}$<br>$\varphi = \arctg(X/R) = \arctg(-1 / R\omega C).$                                                                                                          |
| 6. |   | $I = U/z; R = R_1 + R_k; X = x_L - x_c = \omega L - 1/\omega C;$<br>$Z = \sqrt{X^2 + R^2} = \sqrt{(\omega L - 1/\omega C)^2 + (R_k + R_1)^2}$<br>$\varphi = \arctg(X/R) = \arctg[(\omega L - 1/\omega C)/(R_k + R_1)].$                                                 |
| 7. |  | $I = Uy; g = 1/R_1; b = -b_c; b_c = \omega C;$<br>$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(\omega C)^2 + (1/R_1)^2}$<br>$\varphi = \arctg(b/g) = \arctg(-\omega C R_1)$                                                                                                           |
| 8. |  | $I = Uy; y = \sqrt{g^2 + b^2}; g = g_1 + g_k; b = b_1 + b_k;$<br>$g_1 = 1/R_1; g_k = R_k / [R_k^2 + (\omega L)^2];$<br>$b_1 = 0; b_k = \omega L / [R_k^2 + (\omega L)^2];$<br>$\varphi = \arctg(b/g).$                                                                  |
| 9. |  | $I = Uy; y = \sqrt{g^2 + b^2}; g = g_1 + g_k; b = b_1 + b_k;$<br>$g_k = R_k / [R_k^2 + (\omega L)^2]; b_k = \omega L / [R_k^2 + (\omega L)^2];$<br>$g_1 = R_1 / [R_1^2 + (1/\omega C)^2];$<br>$b_1 = -1/\omega C [R_1^2 + (1/\omega C)^2];$<br>$\varphi = \arctg(b/g).$ |



Если ток отстает от напряжения, как показано на рис.1.2, то  $\varphi > 0$ , если опережает - то  $\varphi < 0$ .

### Таблица 1.2

[illegible]

## Содержание отчета

1. Схема измерительной установки и перечень используемых приборов.
2. Расчётные формулы и расчеты.
3. Заполненная таблица 1.2.
4. Треугольники сопротивлений (для двухполюсников последовательного типа), проводимостей (для двухполюсников параллельного типа) и векторные диаграммы напряжений и токов для каждого из двухполюсников.
5. Выводы по работе.

Примечание. Расчет действующего значения тока  $I$  и фазового сдвига  $\varphi$  между напряжением и током на зажимах исследуемых цепей можно проводить по формулам, представленным в правом столбце таблицы 1.1., где используются следующие условные обозначения;  $z, R, X$ - соответственно полное, активное и реактивное сопротивления двухполюсника;  $y, g, b$  - соответственно полная, активная и реактивная проводимости двухполюсника;  $x_c, b_c$  – реактивное сопротивление и проводимость емкостного элемента;  $x_L, b_L$  –сопротивление и проводимость индуктивного элемента.

## Лабораторная работа 2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы – экспериментальное исследование частотных характеристик линейных двухполюсников, содержащих индуктивный и емкостной элементы и анализ резонансных режимов их работы.

#### Указания к выполнению работы

К работе следует приступать после изучения раздела “Резонанс в электрической цепи” рекомендованной учебной литературы, расположенной в конце настоящего пособия. Выполнить расчеты для указанных преподавателем параметров элементов исследуемых цепей.

#### 1. Программа работы

1.1. Исследование частотных характеристик электрической цепи с последовательным соединением резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Анализ режима резонанса напряжений.

1.2. Исследование частотных характеристик электрической цепи с параллельным соединением ветвей с индуктивным и емкостным элементами. Анализ режима резонанса токов.

#### 2. Описание лабораторной установки

Эксперимент проводится на стенде, описанном в работе 1. При выполнении пункта 1 к зажимам "a1" и "б1" коммутационной панели стенда (рис.1.1) подключается электрическая цепь, собранная по схеме, представленной на рисунке 2.1, при выполнении пункта 2 - цепь, представленная на рисунке 2.2.

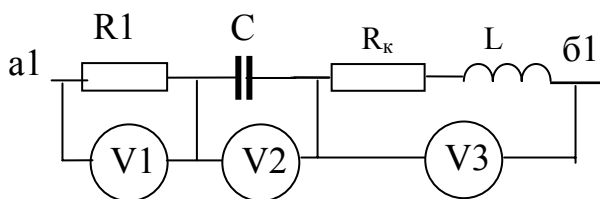


Рис.2.1

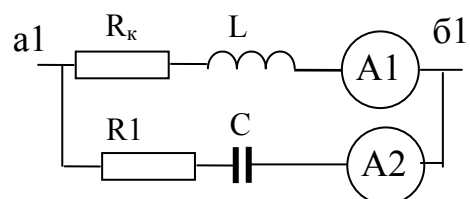


Рис.2.2

#### 3. Методика выполнения работы

### 3.1. Методика выполнения пункта 1 программы.

- Собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 2.1, установить параметры элементов, заданные преподавателем и подключить к зажимам "a1" и "б1" лабораторной установки (рис.1.1). Рекомендуемые параметры элементов цепи:  $R1 = (50 \div 100) \text{ Ом}$ ,  $L = (50 \div 110) \text{ мГн}$ ,  $C = (0.5 \div 1) \text{ мкФ}$ .
- Установить частоту напряжения генератора, соответствующую расчетному значению резонансной частоты  $f_{0p}$  цепи, вычисленному по формуле  $f_{0p} = 1 / 2\pi\sqrt{LC} \text{ Гц}$ .
- Включить тумблеры "Сеть" генератора, усилителя и осциллографа и установить по вольтметру V заданное значение напряжения на зажимах исследуемой цепи в пределах  $10 \div 30 \text{ В}$ .
- Медленно вращая ручку настройки частоты и поддерживая неизменным напряжение на зажимах исследуемой цепи  $U$ , добиться максимального отклонения стрелки амперметра.
- Зафиксировать экспериментальное значение резонансной частоты  $f_{0э}$  по шкале генератора и измерить резонансное значение тока  $I_0$ , напряжение на зажимах магазина сопротивлений  $U_{R10}$ , напряжение на зажимах магазина индуктивностей  $U_{к0}$ , напряжение на зажимах магазина емкостей  $U_{с0}$ . и угол сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi_0$ . Занести результаты измерений в таблицу 2.1. Измерение напряжений производится с использованием вольтметров V1, V2 и V3 ( рис. 2.1), а измерение фазового сдвига - с помощью осциллографа по методике, изложенной в описании к лабораторной работе 1.
- Снять 8-10 точек зависимостей  $I(f)$ ,  $\varphi(f)$ ,  $U_{R1}(f)$ ,  $U_{к}(f)$  и  $U_{с}(f)$  в диапазоне частот от  $0.5 f_0$  до  $1.5 f_0$ , изменяя частоту генератора при неизменном напряжении  $U$  на зажимах цепи и занося показания приборов в соответствующие графы таблицы 2.1.

Таблица 2.1.

| f, Гц              | U=                |                   | R1=              |                  | R <sub>к</sub> =  |                   | L=               |                  | C= |  |
|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|----|--|
|                    | Расчет            |                   |                  |                  | Эксперимент       |                   |                  |                  |    |  |
|                    | f <sub>0p</sub> = |                   | Q <sub>p</sub> = |                  | f <sub>0э</sub> = |                   | Q <sub>э</sub> = |                  |    |  |
|                    | I,A               | U <sub>R1,B</sub> | U <sub>K,B</sub> | U <sub>c,B</sub> | I,A               | U <sub>R1,B</sub> | U <sub>K,B</sub> | U <sub>c,B</sub> |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
| (f <sub>0э</sub> ) |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |
|                    |                   |                   |                  |                  |                   |                   |                  |                  |    |  |

Расчет тока в цепи и фазового сдвига между напряжением и током на зажимах исследуемой цепи при заполнении таблицы следует осуществ-

лять по формулам, представленным в строке 6 таблицы 1.1. Соотношения для расчета действующих значения напряжений на элементах цепи  $U_{R1}$ ,  $U_K$  и  $U_C$  студентам следует выбрать самостоятельно из таблицы 1.1. Расчетное  $Q_p$  и экспериментально  $Q_э$  значения добротности контура можно вычислить как  $Q_p = \rho / (R_1 + R_K)$  и  $Q_э = U_{c0} / U$ , где  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  - характеристическое сопротивление контура.

### 3.2. Методика выполнения пункта 2 программы

- Собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 2.2, установить параметры элементов, заданные преподавателем и подключить к зажимам "а1" и "б1" лабораторной установки (рис.1.1). Рекомендуемые параметры:  $R_1 = (50 \div 100)$  Ом,  $L = (50 \div 110)$  мГн,  $C = (0,5 \div 1)$  мкФ.
- Установить частоту генератора, равную расчетной резонансной частоте

$$f_{0p} = \omega_{0p} / 2\pi, \text{ где } \omega_{0p} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K^2}{\rho^2 - R^2}}.$$

- Включить тумблеры "Сеть" генератора, усилителя и осциллографа и установить по вольтметру заданное значение напряжения на зажимах исследуемой цепи в пределах  $10 \div 30$  В.
- Медленно вращая ручку настройки частоты и поддерживая неизменным напряжение на зажимах исследуемой цепи  $U$ , добиться минимальных показаний амперметра.
- Зафиксировать экспериментальное значение резонансной частоты  $f_{0э}$  по шкале генератора и измерить резонансное значение тока  $I_0$ , тока в ветви с индуктивностью  $I_{10}$ , тока в ветви с конденсатором  $I_{20}$  и угол сдвига фаз  $\varphi_0$  между напряжением и током. Занести результаты измерений в таблицу 2.2. Измерение токов  $I_{10}$  и  $I_{20}$ , осуществляется амперметрами соответственно А1 и А2, а измерение фазового сдвига - с помощью осциллографа по методике, изложенной в описании к лабораторной работе 1.
- Снять 8 - 10 точек зависимостей  $I(f)$ ,  $\varphi(f)$ ,  $I_1(f)$  и  $I_2(f)$  в диапазоне частот от  $0.5 f_0$  до  $1.5 f_0$ , изменяя частоту генератора при неизменном напряжении  $U$  на зажимах цепи и занося показания приборов в соответствующие графы таблицы 2.2.

Расчет тока в цепи и фазового сдвига между напряжением и током на ее зажимах при заполнении таблицы следует осуществлять по формулам, представленным в строке 9 таблицы 1.1. Соотношения для расчета действующих значения токов  $I_1$  и  $I_2$  студентам следует выбрать самостоятельно из таблицы 1.1.

Расчетное значение добротности данной цепи определяется по формуле

$$Q_p = \frac{\omega_{0p} L}{R \sqrt{1 + LC^2 \omega_{0p}^2}}$$

Экспериментальное значение добротности цепи  $Q_3$  следует определить через полосу пропускания частот контура  $2\Delta f$  по графику зависимости  $I(f)$ , полученной экспериментально.

Таблица 2.2

| f, Гц              | U =      R1 =      R <sub>к</sub> =      L =      C = |                    |                    |                   |                    |                    |
|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
|                    | Расчет                                                |                    |                    | Эксперимент       |                    |                    |
|                    | f <sub>0p</sub> =                                     |                    | Q <sub>p</sub> =   | f <sub>03</sub> = | Q <sub>3</sub> =   |                    |
|                    | I, A                                                  | I <sub>1</sub> , A | I <sub>2</sub> , A | I, A              | I <sub>1</sub> , A | I <sub>2</sub> , A |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
| (f <sub>03</sub> ) |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |
|                    |                                                       |                    |                    |                   |                    |                    |

### Содержание отчета

1. Схемы измерений и перечень приборов.
2. Заполненные таблицы. Расчетные формулы и расчеты.
3. Графики характеристик  $I(f)$ ,  $U_k(f)$ ,  $U_c(f)$ ,  $\varphi(f)$  по пункту 1 программы.
4. Графики характеристик  $I(f)$ ,  $I_1(f)$ ,  $I_2(f)$ ,  $\varphi(f)$  по пункту 2 программы.
5. Выполненные в масштабе векторные диаграммы для состояния резонанса.
6. Выводы по работе.

## Лабораторная работа 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы – определение параметров индуктивно связанных катушек опытным путем.

#### Указания по выполнению работы

К выполнению работы следует приступать после изучения раздела “Индуктивно связанные электрические цепи” рекомендованной учебной литературы, расположенной в конце настоящего пособия.

#### 1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 3.1) содержит генератор сигналов специальной формы, усилитель, амперметр, вольтметр и коммутационную панель.

Источником синусоидального напряжения служит генератор Г6-15.

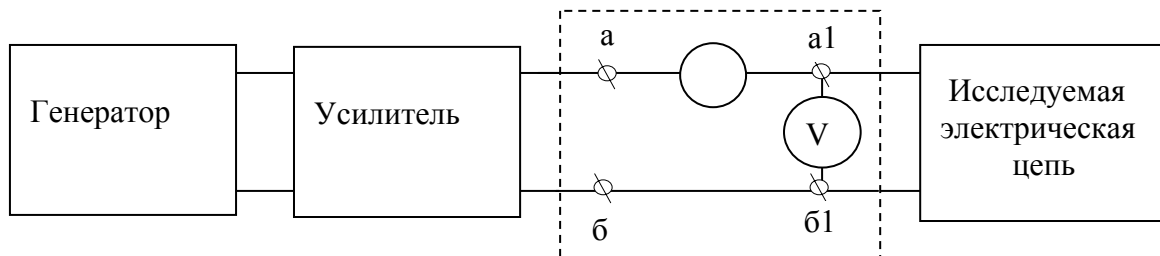


Рис. 3.1

Амплитуду выходного напряжения генератора можно регулировать в пределах  $0,01 \div 10[\text{В}]$  и частоту от  $0,001$  до  $1000[\text{Гц}]$ .

Напряжение с выхода генератора приложено к зажимам усилителя типа 100У-101. Выходное напряжение последнего подается на зажимы “а” и “б” коммутационной панели. К клеммам “а1” и “б1” панели подключаются исследуемые электрические цепи - двухполюсники, собранные по схемам, приведенным на рис. 3.2-3.4 с использованием магазина взаимной индуктивности Р538 и магазина конденсаторов Р5025. К тем же зажимам подключен вольтметр типа ВЗ-10, измеряющий действующее значение напряжения  $U$  на зажимах двухполюсника. Его значение устанавливается левой рукояткой на передней панели усилителя. Между зажимами “а” и “а1” коммутационной панели последовательно с двухполюсником включен амперметр типа Д5014, измеряющий действующее значение тока  $I$  в цепи.

#### 2. Программа работы

2.1. Определение параметров катушек резонансным методом.

2.2. Определение взаимной индуктивности и коэффициента магнитной связи двух индуктивно связанных катушек.

2.3. Исследование цепей с последовательным соединением двух индуктивно связанных катушек.

#### 3. Методика выполнения работы

3.1. Определение параметров катушек резонансным методом

Магазин взаимной индуктивности содержит две катушки, параметры которых  $r_1$ ,  $L_1$  и  $r_2$ ,  $L_2$  подлежат определению. В опыте используется следующее свойство последовательного колебательного контура. На частоте резонанса контура  $f_0$  напряжение на кон-

денсаторе  $U_{C0}$  равно напряжению на индуктивности  $U_{L0}$ , а напряжение на активном сопротивлении катушки  $U_{r0}$  равно напряжению на зажимах контура  $U$ . Значение взаимной индуктивности магазина устанавливается в пределах  $8 \div 10$  мГн и остается неизменным при выполнении всей работы.

### 3.1.1 Определение параметров катушки с зажимами 6-7

- Собрать электрическую цепь, представленную на рис 3.2,а и подключить ее к зажимам лабораторной установки (рис 3.1).

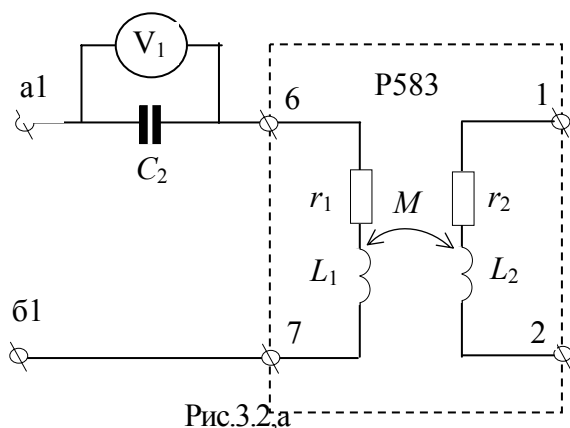


Рис.3.2,а

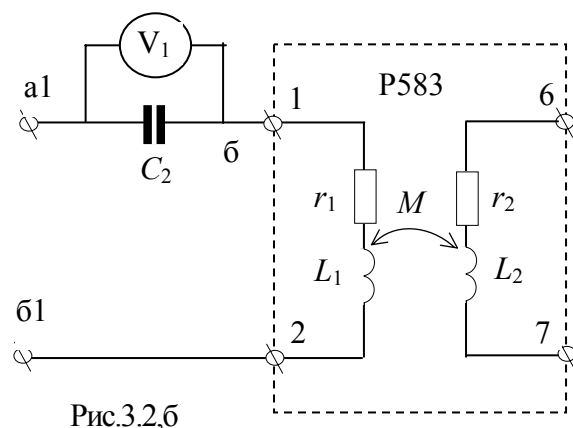


Рис.3.2,б

- Включить генератор и установить по вольтметру заданное напряжение  $U$ .
- Вращая ручку настройки частоты генератора, найти резонансную частоту  $f_0$  цепи по максимуму тока в ней. Напряжение на зажимах цепи необходимо поддерживать неизменным и равным заданному.
- В режиме резонанса измерить ток в цепи и напряжения на зажимах цепи и конденсаторе. Значения напряжений поместить в таблицу 3.1.
- Рассчитать параметры катушек по формулам  $r = U/I_0$ ,  $x_L = U_{C0}/I_0$ ,  $L = x_L / 2\pi f_0$  и поместить результаты в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

| Результаты измерений |                 |                 |                 |                 |          |       | Результаты вычислений |                 |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------|-----------------------|-----------------|
| Катушка              | $\underline{M}$ | $\underline{C}$ | $\underline{I}$ | $\underline{U}$ | $U_{C0}$ | $f_0$ | $r$                   | $\underline{L}$ |
|                      | мГн             | мкФ             | А               | В               | В        | Гц    | Ом                    | мГн             |
| с зажимами 6-7       |                 |                 |                 |                 |          |       |                       |                 |
| с зажимами 1-2       |                 |                 |                 |                 |          |       |                       |                 |

### 3.1.2 Определение параметров катушки с зажимами 1-2

- Собрать электрическую цепь, представленную на рисунке 3.2,б и подключить ее к зажимам лабораторной установки (рис 3.1).
- Произвести измерения и расчеты в последовательности, указанной в пункте 3.1.1 и поместить результаты в таблицу 3.1.

3.2 Определение взаимной индуктивности  $M$  и коэффициента магнитной связи  $K$  выполнить в следующей последовательности.

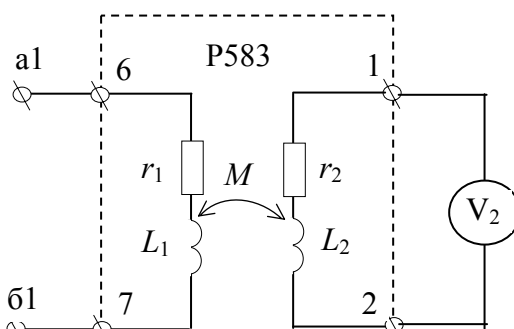




Рис.3.3

- Собрать цепь (рис. 3.3) и подключить ее к зажимам установки (рис. 3.1).
- Включить генератор и установить заданные значения тока и частоты  $f$ .
- Измерить напряжение  $U_2$ .
- Занести показания приборов в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

| Результаты измерений |                 |                 |                   |                   | Результаты вычислений |                 |
|----------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| $\underline{M}$      | $\underline{f}$ | $\underline{I}$ | $\underline{U}_1$ | $\underline{U}_2$ | $\underline{M}$       | $\underline{K}$ |
| мГн                  | Гц              | А               | В                 | В                 | мГн                   | -               |
|                      |                 |                 |                   |                   |                       |                 |

- Произвести вычисления взаимной индуктивности  $M$  и коэффициента связи  $K$  по формулам

$$M = U_2 / 2\pi f \cdot I, \quad K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}.$$

- Поместить результаты в таблицу 3.2.

Примечание. Значения  $L_1$  и  $L_2$  взять из таблицы 3.1. Следует убедиться, что коэффициент связи меньше единицы, а коэффициент взаимной индукции соответствует установленному значению  $M$  на магазине.

3.3 Экспериментальное определение эквивалентных индуктивностей двух последовательно соединенных катушек при согласном и встречном их включении.

При выполнении эксперимента рекомендуется следующая его последовательность.

- Собрать цепь (рис. 3.4,а), в которой индуктивно связанные катушки соединены зажимами 7 и 2 и подключить ее к зажимам а1, б1 установки

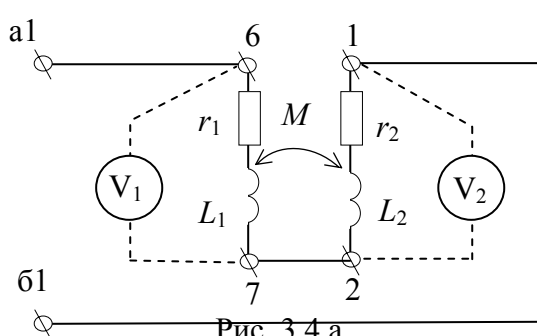


Рис. 3.4,а

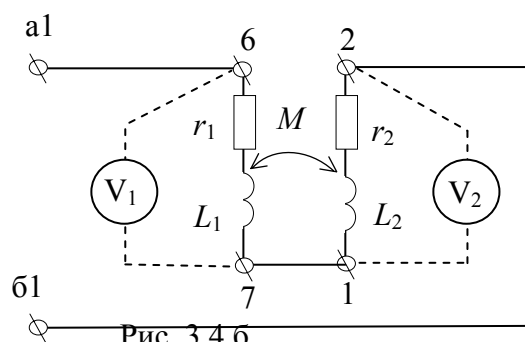


Рис. 3.4,б

- Включить генератор и установить указанные на стенде значения тока  $I$  и частоты  $f$ .
- Измерить напряжение на зажимах цепи  $U$  и напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на зажимах катушек. Записать показания приборов в таблицу 3.4.
- Собрать схему (рис.3.4,б), поменяв местами зажимы 1 и 2 в схеме (рис.3.4,а). Повторить измерения и записать результаты в таблицу 3.4.
- Вычислить значения эквивалентных индуктивностей катушек по результатам измерений, используя формулы

$$z_{\text{эк1}} = U_1 / I; \quad x_{\text{эк1}} = \sqrt{z_{\text{эк1}}^2 - r_1^2}; \quad L_{\text{эк1}} = x_{\text{эк1}} / 2\pi f;$$

$$z_{\text{эк2}} = U_2 / I; \quad x_{\text{эк2}} = \sqrt{z_{\text{эк2}}^2 - r_2^2}; \quad L_{\text{эк2}} = x_{\text{эк2}} / 2\pi f$$

и значения параметров  $r$ ,  $L$ ,  $M$  из таблиц 3-1, 3-2.

- Занести результаты в таблицу 3.4 и сравнить их с теоретическими значениями, рассчитанным по выражениям  $L_{\text{эк1}}^T = L_1 \pm M$ ,  $L_{\text{эк2}}^T = L_2 \pm M$ , где знак плюс соответствует согласному включению катушек, а минус – встречному.

Таблица 3.4

| Результаты измерений |                 |     |       |       |     |                 | Результаты вычислений |                    |                    |                    |
|----------------------|-----------------|-----|-------|-------|-----|-----------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Клеммы катушек       | $\underline{M}$ | $f$ | $U_1$ | $U_2$ | $U$ | $\underline{I}$ | $L_{\text{эк1}}^T$    | $L_{\text{эк2}}^T$ | $L_{\text{эк1}}^B$ | $L_{\text{эк2}}^B$ |
|                      | мГн             | Гц  | В     |       |     | мА              | мГн                   |                    |                    |                    |
| 7-2                  |                 |     |       |       |     |                 |                       |                    |                    |                    |
| 7-1                  |                 |     |       |       |     |                 |                       |                    |                    |                    |

#### Содержание отчета

1. Схемы измерений и перечень приборов.
2. Расчетные формулы и расчеты. Заполненные таблицы.
3. Векторные диаграммы в третьем пункте содержания работы, построенные по опытным данным с соблюдением масштабов.
4. Выводы по каждому пункту и по работе в целом.

## Лабораторная работа 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы – опытная проверка основных соотношений в трехфазной цепи при соединении приемников звездой и треугольником при равномерной и неравномерной нагрузке фаз.

#### Указания к выполнению работы

К работе следует приступать после изучения раздела “Цепи трехфазного тока” рекомендованной учебной литературы, расположенной в конце настоящего пособия. Выполнить расчеты для указанных преподавателем параметров элементов исследуемых цепей

#### 1. Описание лабораторной установки

Схема установки представлена на рисунке 4.1.

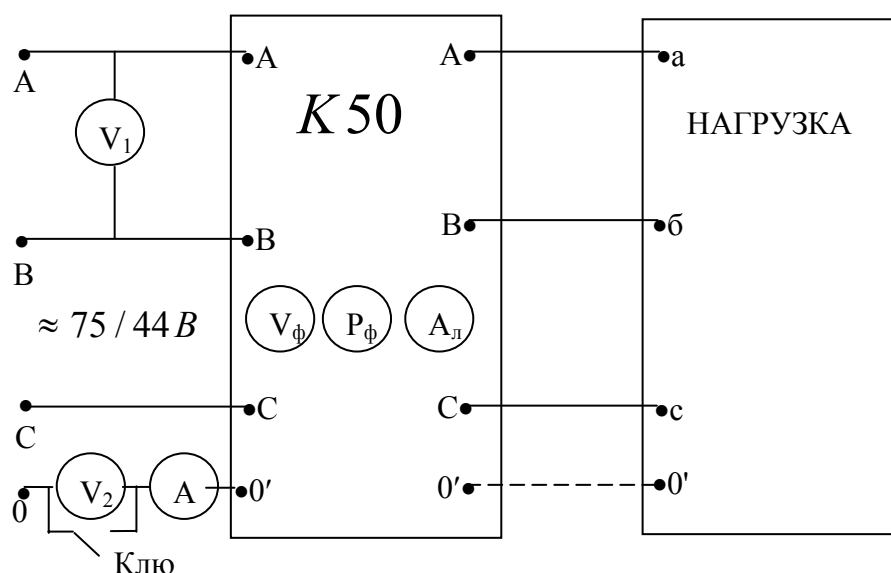


Рис.4.1

Установка содержит трехфазный источник напряжения 75/44 с частотой 50 Гц и соединением фаз по схеме «звезда», трехфазный приемник (нагрузку), измерительный комплект К50 и ряд измерительных приборов – амперметров и вольтметров.

Источник трёхфазного напряжения расположен вне лабораторного стенда. Клеммы источника выведены в лаборатории на силовые щиты. В работе не измеряются начальные фазы напряжений и токов и углы сдвига фаз между ними, а только их действующие значения.

Комплект К-50 используется для измерения линейных токов и фазных напряжений приёмников, а также активных мощностей в фазах приёмника. В зависимости от величин измеряемых токов пределы измерения амперметра, вольтметра, а вместе с ними и ваттметра, могут изменяться. Предел измерения ваттметра определяется перемножением пределов измерения вольтметра и амперметра. На панели комплекта есть указатель, посредством которого определяется последовательность следования фаз источника.

Трёхфазная нагрузка строится либо по схеме "звезда" (рис.4.2) либо по схеме "треугольник" (рис.4.3) на основе магазинов нагрузок НТН-2.

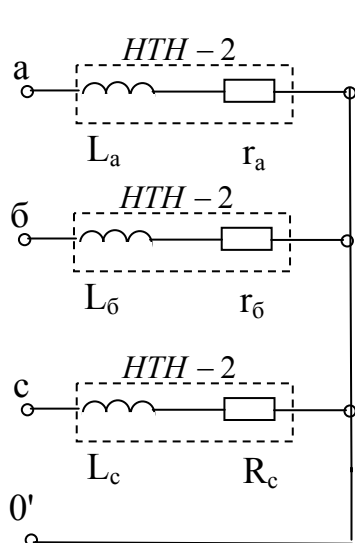


Рис.4.2

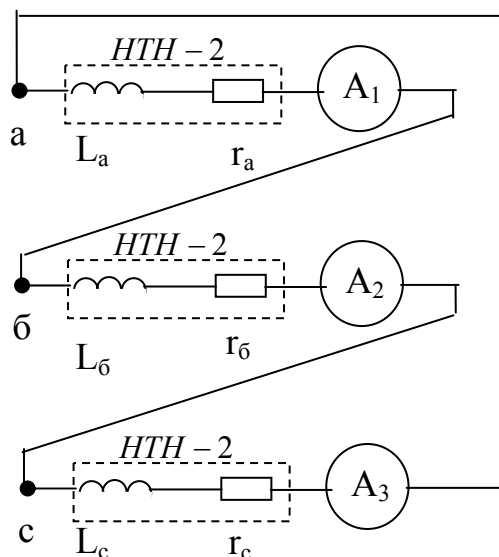


Рис.4.3

Магазин нагрузок типа НТН – 2 имеет наборное поле, где посредством штырьков устанавливается нагрузка, имеющая резистивно – индуктивный характер. Нагрузка указывается в вольтамперах –  $ВА$ , что соответствует полной мощности в нагрузке при номинальном напряжении 58 В на зажимах магазина и при выбранном положении штырька на наборном поле. При любом набранном номинале нагрузки сохраняется неизменным фазовый сдвиг  $37^\circ$  между напряжением и током. Соответствие между положением штырька на наборном поле, комплексным сопротивлением нагрузки  $\underline{Z}$  и ее комплексной проводимостью  $\underline{Y}$  представлено в таблице 4.1.

Вольтметр  $V_1$  типа ВЗ-10 предназначен для измерения линейного напряжения  $U_\Delta$  трехфазного источника, вольтметр  $V_2$  того же типа измеряет напряжение смещения нейтрали  $U_{00'}$  при обрыве нулевого провода  $00'$  в электрической цепи с нагрузкой, построенной по схеме «звезда». Такое состояние имеет место при разомкнутом ключе. Амперметр А типа Д5014 служит для измерения тока  $I_0$  в нулевом проводе  $00'$  при замкнутом ключе. При построении нагрузки по схеме "треугольник" (рис.4.3) после-

довательно с магазинами НТН2 включаются амперметры А1, А2 и А3, служащие для измерения тока в фазах нагрузки.

Таблица 4.1

| S, ВА | $\underline{Z} = z \cdot e^{j\varphi}$ , Ом | $\underline{Y} = y \cdot e^{-j\varphi}$ , См |
|-------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0     | $\infty$                                    | 0                                            |
| 5     | $672 \angle 37^0$                           | $1.49 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 10    | $336 \angle 37^0$                           | $2.98 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 15    | $224 \angle 37^0$                           | $4.46 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 20    | $168 \angle 37^0$                           | $5.95 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 25    | $134 \angle 37^0$                           | $7.44 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 30    | $112 \angle 37^0$                           | $8.92 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 35    | $96 \angle 37^0$                            | $10.4 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 40    | $84 \angle 37^0$                            | $11.9 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 45    | $74.6 \angle 37^0$                          | $13.4 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 50    | $67.1 \angle 37^0$                          | $14.9 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 55    | $60.1 \angle 37^0$                          | $16.4 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |
| 60    | $55.9 \angle 37^0$                          | $17.9 \times 10^{-3} \angle -37^0$           |

## 2. Программа работы

2.1. Опытная проверка основных соотношений в трехфазной цепи с нагрузкой, включенной по схеме " звезда", в следующих режимах.

- 2.1.1. Равномерная нагрузка фаз без нулевого провода.
- 2.1.2. Равномерная нагрузка фаз с нулевым проводом.
- 2.1.3. Неравномерная нагрузка фаз без нулевого провода.
- 2.1.4. Неравномерная нагрузка фаз с нулевым проводом.
- 2.1.5. Обрыв линейного (или фазного) провода без нулевого провода.
- 2.1.6. Обрыв линейного провода с нулевым проводом.
- 2.1.7. Короткое замыкание одной фазы нагрузки без нулевого провода.

2.2. Опытная проверка основных соотношений в трехфазной цепи с нагрузкой, включенной по схеме «треугольник», в следующих режимах.

- 2.2.1. Равномерная нагрузка фаз источника.
- 2.2.2. Неравномерная нагрузка фаз источника.
- 2.2.3. Обрыв одной фазы нагрузки.
- 2.2.4. Обрыв двух фаз нагрузки .

2.2.5. Обрыв линейного провода при симметричной нагрузке.

2.2.6. Обрыв линейного провода при несимметричной нагрузке.

### 3. Методика выполнения работы

#### 3.1. Методика выполнения пункта 2.1.

- Собрать нагрузку по схеме "звезда" (рис. 4.2) и подключить ее к клеммам измерительного комплекта К50, как показано на рис. 4.1.

- Организовать схему цепи и установить параметры нагрузки в соответствии с выполняемым пунктом работы (2.1.1-2.1.7). Параметры фаз приёмника по каждому пункту программы работы указываются на стенде к лабораторной работе. Рекомендуется устанавливать нагрузки фаз приёмников в пределах 20 – 60 ВА. Замыкание и размыкание нулевого провода осуществляется ключом (рис.4.1). Обрыв линейного провода Аа, Вб, или Вс (по заданию преподавателя) осуществляется отключением его от соответствующей клеммы на щите установки при выключенном сетевом рубильнике «~75/44». **Эксперимент по п.2.1.7 выполняется только в присутствии преподавателя или лаборанта.**

- Включить сетевой рубильник «~75/44» и провести измерения токов, напряжений и мощности в цепи, занося результаты в таблицу 4.1. Измерения целесообразно проводить в следующем порядке:  $U_{\text{л}}(V_1) \rightarrow U_{00'}(V_1) \rightarrow I_0(A) \rightarrow U_a, I_a, P_A$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "А")  $\rightarrow U_b, I_b, P_B$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "В")  $\rightarrow U_c, I_c, P_c$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "С").

#### 3.2. Методика выполнения п.2.2.

- Собрать нагрузку по схеме "треугольник" (рис. 4.3) и подключить ее к клеммам измерительного комплекта К50, как показано на рис. 4.1.

- Организовать схему цепи и установить параметры нагрузки в соответствии с выполняемым пунктом работы (2.2.1-2.2.6). Параметры фаз приёмника по каждому пункту программы работы указываются на стенде к лабораторной работе. Рекомендуется устанавливать нагрузки фаз приёмников в пределах 20 – 60 ВА. Замыкание и размыкание нулевого провода осуществляется ключом (рис.4.1). Обрыв линейного провода Аа, Вб, или

Вс ( по заданию преподавателя ) осуществляется отключением его от соответствующей клеммы на щите установки при выключенном сетевом рубильнике «~75/44».

- Включить сетевой рубильник «~75/44» и провести измерения токов, напряжений и мощности в цепи, занося результаты в таблицу 4.2. Измерения целесообразно проводить в следующем порядке:  $U_{\text{л}}(V_1) \rightarrow I_{a\delta}(A_1) \rightarrow I_{\delta c}(A_2) \rightarrow I_{ca}(A_3) \rightarrow U_{a\delta}, I_A, P_{a\delta}$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "А")  $\rightarrow U_{\delta c}, I_B, P_{\delta c}$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "В")  $\rightarrow U_{ca}, I_C, P_{ca}$  (К50 при положении переключателя фаз в положении "С").

#### 4. Методические указания к выполнению вычислений

Измеренным действующим значениям напряжений и токов в таблице 4.2 следует ставить в соответствие модули комплексов напряжений и токов, рассчитанных по формулам , приведенным в левой части таблицы 4.4. Рассчитав указанные комплексы для различных вариантов нагрузок, легко построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Измеренным действующим значениям напряжений и токов в таблице 4.3 следует ставить в соответствие модули комплексов напряжений и токов, рассчитанных по формулам , приведенным в правой части таблицы 4.4. При выполнении расчётов в качестве комплексов фазных напряжений источника следует принять  $\underline{E}_A = 44 \cdot e^{j0^\circ}$ ;  $\underline{E}_B = 44 \cdot e^{-j120^\circ}$ ;  $\underline{E}_C = 44 \cdot e^{j120^\circ}$ .

Таблица 4.3.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $\underline{U}_{00'} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} .$ $\underline{U}_{a0'} = \underline{E}_A - \underline{U}_{00'} ; \underline{U}_{60'} = \underline{E}_B - \underline{U}_{00'} ;$ $\underline{U}_{c0'} = \underline{E}_C - \underline{U}_{00'} .$ $\underline{I}_A = \underline{Y}_a \underline{U}_{a0'} ; \underline{I}_B = \underline{Y}_b \underline{U}_{60'} ; \underline{I}_C = \underline{Y}_c \underline{U}_{c0'} .$ $\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ | $\underline{U}_{AB} = \underline{E}_A - \underline{E}_B ; \underline{U}_{BC} = \underline{E}_B - \underline{E}_C ; \underline{U}_{CA} = \underline{E}_C - \underline{E}_A .$ $\underline{I}_{a\delta} = \underline{Y}_{a\delta} \cdot \underline{U}_{AB} ; \underline{I}_{\delta c} = \underline{Y}_{\delta c} \cdot \underline{U}_{BC} ;$ $\underline{I}_{ca} = \underline{Y}_{ca} \cdot \underline{U}_{CA} .$ $\underline{I}_A = \underline{I}_{a\delta} - \underline{I}_{ca} ; \underline{I}_B = \underline{I}_{\delta c} - \underline{I}_{a\delta} ; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{\delta c} .$ |

|                                                                |  |
|----------------------------------------------------------------|--|
| $P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi_{\phi}$ |  |
|----------------------------------------------------------------|--|

### Содержание отчета

1. Схемы измерений и перечень приборов.
2. Заполненные таблицы 4.2 и 4.3.
3. Расчетные формулы и пояснения к ним. Сравнение результатов расчета и эксперимента.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов приёмника для всех пунктов работы, построенные по опытным данным с соблюдением масштаба.
5. Выводы по работе.



Лабораторная работа 5  
**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ  
НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Цель работы:

- освоение методики использования резонансного фильтра для выделения гармонических составляющих несинусоидального напряжения;
- измерение параметров спектра периодических напряжений различной формы;
- оценка влияния индуктивности и емкости на форму тока в цепи при входном периодическом напряжении.

Указания к выполнению работы

К работе следует приступать после изучения раздела “Цепи периодического несинусоидального тока” рекомендованной литературы, расположенной в конце настоящего пособия, Выполнить расчеты для указанных преподавателем параметров элементов электрических цепей и форме несинусоидальных напряжений.

1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 1) содержит генератор сигналов специальной формы, усилитель, анализатор гармоник, набор преобразовательных звеньев и двухканальный осциллограф.

Источником несинусоидальных периодических напряжений в установке служит генератор типа Г6-15. Напряжение на его выходе имеет синусоидальную, прямоугольную, пилообразную и треугольную формы. Амплитуду выходного напряжения генератора можно варьировать от 0.01 до 10 В и частоту от  $10^{-3}$  Гц до 1000 Гц.

Напряжение с выхода генератора приложено к входным зажимам усилителя типа 100У-101. Выходное напряжение усилителя поступает на входные гнезда анализатора гармоник или преобразовательных звеньев.

Анализатор гармоник позволяет выделить и с помощью двухканального осциллографа типа С1-83 наблюдать гармоники входного напряжения с частотой  $f_0 = 1000$  Гц.

Для выделения  $k$ -ой гармонической составляющей исследуемого несинусоидального напряжения в анализаторе используется параллельный резонансный контур, состоящий из индуктивности  $L_k$  и емкости  $C$ . На частоте резонанса очередной гармоники  $f_k = k f_0$  контур имеет большое эквивалентное сопротивление. Избирательность по напряжению обеспечивается включением последовательно с контуром резистора  $R_k$ .

Резонансный контур и резистор  $R_k$  образуют делитель, коэффициент передачи которого  $K_U = 0,1$ . Из этого следует, что значение напряжения любой гармоники на выходе анализатора на порядок более измеренного.

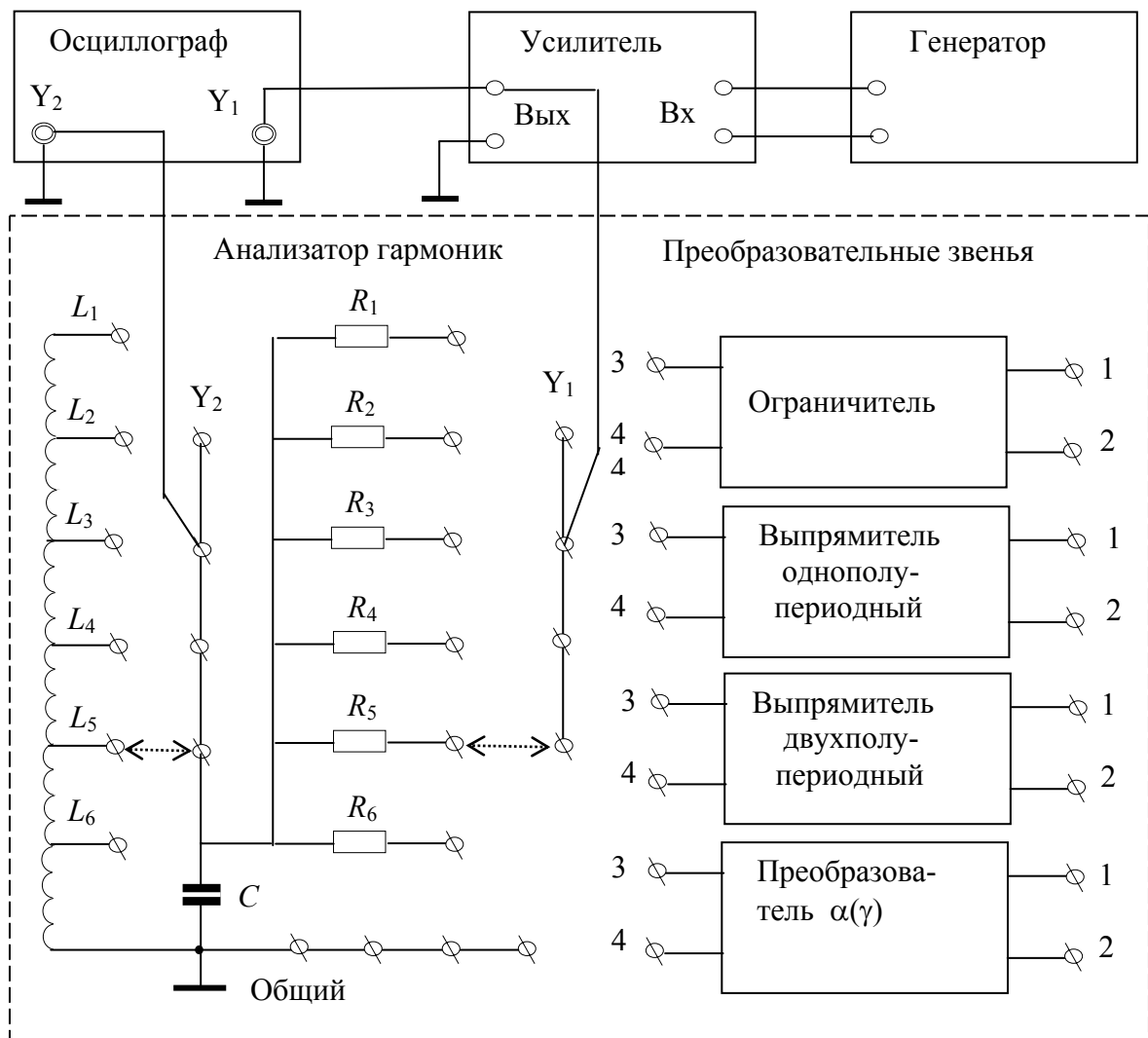


Рис.1

## 2. Получение несинусоидального напряжения заданной формы

Генератором и преобразовательными звеньями создаются исследуемые сигналы различных форм. Схемы установок для их формирования и составляющие ряда Фурье помещены в приложение.

Сигналы прямоугольный  $u_1(\omega t)$ , пилообразный  $u_2(\omega t)$  и треугольный  $u_3(\omega t)$  формируются генератором. Для формирования других сигналов использованы преобразовательные звенья и им соответствующие напряжения генератора. Стоит обратить внимание на следующее. При формировании сигнала  $u_4(\omega t)$  трапецевидного, величина угла  $\alpha$  регулируется левой ручкой “ ” усилителя. Напряжения  $u_5(\omega t)$  и  $u_6(\omega t)$ , формируются звеньями, выполняющими функции широтно-импульсного преобразователя и однополупериодного управляемого выпрямителя. Регулирование длительности импульсов  $\gamma$  для широтно-импульсного преобразователя или угла отпирания вентилей  $\alpha$  осуществляется поворотом ручки “ $\alpha(\gamma)$ ”.

## 3. Методика проведения гармонического анализа

Анализ выполняется на лабораторной установке (рис.1). Все исходные регулировки генератора, усилителя и осциллографа устанавливаются преподавателем или лаборантом. При любой форме исследуемого напряжения значение его амплитуды на выходе генератора должно быть равным 10 В, амплитуда выходного напряжения усилителя  $10 \pm 30$  В.

Последовательность измерения амплитуд гармоник несинусоидального напряжения следующая. Исследуемое напряжение частотой  $f_0 = 1000$  Гц подводится к гнездам “Y1” и “Общий” анализатора. Соединяем перемычками гнездо “Y1” с гнездом  $R_1$  и гнездо “Y2” с гнездом  $L_1$ . Подстройкой частоты генератора добиваемся максимума амплитуды гармоники на выходе анализатора и измеряем ее значение с помощью осциллографа или вольтметра соответственно в миллиметрах или вольтах; истинное значение гармоники напряжения более измеренного в десять раз.

#### 4. Программа работы

К лабораторной работе выполняется следующее.

4.1. Раскладывается в ряд Фурье несинусоидальное периодическое напряжение заданной преподавателем формы, амплитуды и частоты. Постоянная составляющая, амплитуды и фазы гармоник вычисляются по формулам приложения. Оценивается соотношение  $U_{mk}/U_M$  амплитуд гармоник и заданной функции.

4.2. Определяются составляющие напряжения на входе и тока в одной из двух цепей. В цепи  $RL$  при входном напряжении прямоугольной формы или  $RC$  при напряжении треугольной формы на ее входе. Оценивается соотношение  $k$ -ой гармоники к первой. Цепь и ее параметры задаются преподавателем. Порядок расчета показан в приложении.

В лабораторной работе выполняется следующее.

4.3. Экспериментально исследуется спектральный состав несинусоидальных периодических напряжений различных форм.

4.4. Анализируется спектр тока в последовательной  $RL$  – цепи при входном напряжении прямоугольной формы.

4.5. Исследуется спектр тока в последовательной  $RC$  – цепи при входном напряжении треугольной формы.

Для выполнения пунктов 4.4 и 4.5 на вход анализатора гармоник подается не ток, а напряжение с резистора  $R$  цепей  $RL$  и  $RC$ . Используется свойство этого элемента: спектр его напряжения и тока идентичны.

#### 5. Порядок выполнения работы

Работу следует выполнять после проведения расчетов и записи их результатов в графы таблиц 1 и 2. Данные для расчета задает преподаватель. Содержание расчетов приведено в пунктах 4.1 и 4.2 программы.

Для выполнения пункта 4.3 программы необходимо следующее.

Используя методику, изложенную в разделе 2, получить несинусоидальное напряжение заданной преподавателем амплитуды и формы с частотой 1000 Гц и подать его на входные гнезда “Y1” и “Общий” анализатора гармоник.

Измерить амплитудные значения 1, 2,...,6 гармоник исследуемого напряжения по методике, изложенной в разделе 3.

Результаты измерений занести в таблицу 1.

Все указанное повторить для других форм заданных напряжений.

Для выполнения пункта 4.4 необходимо выполнить следующее.

Собрать цепь  $RL$ , выделенную пунктиром, и включить ее в лабораторную установку девятого фрагмента приложения. Установить на выходе генератора напряжение частотой 1000 Гц.

Зарисовать осциллограмму напряжения между точками DE электрической цепи при значении индуктивности  $L = 20 \div 100$  [мГн], указанной преподавателем, и сопротивления  $R = 400$  [Ом].

Выполнить гармонический анализ этого напряжения, пользуясь методикой раздела 3. Т.к. форма напряжения на резисторе  $R$  повторяет форму тока в цепи, то  $I_{mk} = U_{mk}/R$ . Результаты измерений занести в таблицу 2.

Собрать цепь  $RC$ , выделенную пунктиром, и включить ее в лабораторную установку десятого фрагмента приложения. Установить на выходе генератора напряжение частотой 1000 Гц.

Зарисовать осциллограмму напряжения между точками DE электрической цепи при значениях емкости  $C = 0,5$  [мкФ] и сопротивления  $R = 200 \div 1200$  [Ом], указанных преподавателем.

Выполнить гармонический анализ этого напряжения, пользуясь методикой раздела 3. Т.к. форма напряжения на резисторе  $R$  повторяет форму тока в цепи, то  $I_{mk} = U_{mk}/R$ . Результаты измерений занести в таблицу 2.

#### Приборы и оборудование

Генератор сигналов специальной формы Г6-15.

Усилитель напряжения 100У-101.

Лабораторный анализатор гармоник АГ.

Осциллограф двухлучевой С1-83.

Магазин сопротивлений Р 4830.

Магазин емкостей Р5025.

Магазин индуктивностей Р 567.

Таблица 1

| Исследуемое напряжение |            |               | № гарм. | Расчет        |              | Эксперимент   |              |
|------------------------|------------|---------------|---------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| Форма                  | $U_M$<br>В | Частота<br>Гц | $k$     | $U_{mk}$<br>В | $U_{mk}/U_M$ | $U_{mk}$<br>В | $U_{mk}/U_M$ |
|                        |            |               | 1       |               |              |               |              |
|                        |            |               | 2       |               |              |               |              |
|                        |            |               | 3       |               |              |               |              |
|                        |            |               | 4       |               |              |               |              |
|                        |            |               | 5       |               |              |               |              |
|                        |            |               | 6       |               |              |               |              |

$U_M$  – амплитуда несинусоидального напряжения

Таблица 2

| № гарм | Входное напряжение электр. цепи |                 | Ток в цепи $RL$<br>$L =$ [мГн] |                 |                |                 | Ток в цепи $RC$<br>$C =$ [мкФ] |                 |                |                 |
|--------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|
|        |                                 |                 | Расчет                         |                 | Эксперимент    |                 | Расчет                         |                 | Эксперимент    |                 |
| $k$    | $U_{mk}$<br>В                   | $U_{mk}/U_{m1}$ | $I_{mk}$<br>мА                 | $I_{mk}/I_{m1}$ | $I_{mk}$<br>мА | $I_{mk}/I_{m1}$ | $I_{mk}$<br>мА                 | $I_{mk}/I_{m1}$ | $I_{mk}$<br>мА | $I_{mk}/I_{m1}$ |
| 1      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |
| 2      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |
| 3      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |
| 4      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |
| 5      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |
| 6      |                                 |                 |                                |                 |                |                 |                                |                 |                |                 |

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Расчет составляющих ряда Фурье напряжений заданной преподавателем формы, амплитуды и частоты. Постоянную составляющую, амплитуды и фазы гармоник рекомендуем определить по формулам приложения.

В таблице 1 должны быть приведены:

- значения амплитуд гармоник  $U_{mk}$ , полученные расчетным путем и экспериментально;
- соотношение амплитуд гармоник и исходной функции  $U_{mk}/U_M$ .

Расчет амплитуд гармоник  $U_{mk}$  входного напряжения и тока  $I_{mk}$  в цепях  $RL$  или  $RC$ . Оценка соотношения первой гармоники к остальным во входном напряжении  $U_{mk}/U_{m1}$  и токе цепи  $I_{mk}/I_{m1}$ .

В таблице 2 должны быть приведены:

- результаты расчета и измерения гармоник напряжения и тока  $I_{mk}$  в цепи;
- оценка  $U_{mk}/U_{m1}$  входного напряжения тока  $I_{mk}/I_{m1}$  в цепи.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

В приложении приведены схемы установок, показаны напряжения, которые формируются генератором и преобразовательными звеньями. Помещены формулы для расчета параметров составляющих ряда Фурье этих напряжений. Постоянная составляющая -  $A_0$ , амплитуды синусной  $B_{mk}$  и косинусной  $C_{mk}$  составляющих. В эксперименте и расчете отдано предпочтение ряду в виде суммы постоянной и гармонических составляющих. Амплитуды и фазы каждой из них рассчитываются следующим образом:

$$U_{mk} = \sqrt{B_{mk}^2 + C_{mk}^2} \quad \text{и} \quad \Psi_k = \arctg\left(\frac{C_{mk}}{B_{mk}}\right)$$

Тогда, полагая  $U_0 = A_0$ , можем записать любое из восьми напряжений

$$u(\omega t) = U_0 + \sum_k U_{mk} \sin(k \cdot \omega \cdot t + \Psi_k);$$
$$u(\omega t) = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \Psi_1) + U_{m2} \sin(2\omega t + \Psi_2) + \dots + U_{mk} \sin(k\omega t + \Psi_{ki}) + \dots$$

Выполняя пункт 4.2 программы, необходимо рассчитать амплитуды гармоник токов: в цепи  $RL$  при входном напряжении  $u_1(\omega t)$  и в цепи  $RC$  при входном напряжении  $u_3(\omega t)$ . Их составляющие  $B_{mk}$ ,  $C_{mk}$  и  $U_{mk}$  вычисляются по формулам приложения. Расчет гармоник токов выполняется по формулам:

где  $R_k = 30[\text{Ом}]$  – резистивное сопротивление катушки индуктивности.

$$I_{mk} = \frac{U_{mk}}{\sqrt{(R + R_k)^2 + (\omega L)^2}}, \quad I_{mk} = \frac{U_{mk}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

Результаты расчета помещаются в таблицу 2.

## Лабораторная работа 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы – экспериментальное исследование переходных процессов в простейших электрических цепях первого и второго порядков с источником постоянного напряжения.

Указания к выполнению работы

Перед выполнением работы следует изучить раздел "Переходные процессы" в рекомендованной литературе, указанной в конце настоящего пособия. Провести необходимые расчеты при заданных преподавателем параметрах электрических цепей и выходном напряжении генератора.

Краткие пояснения

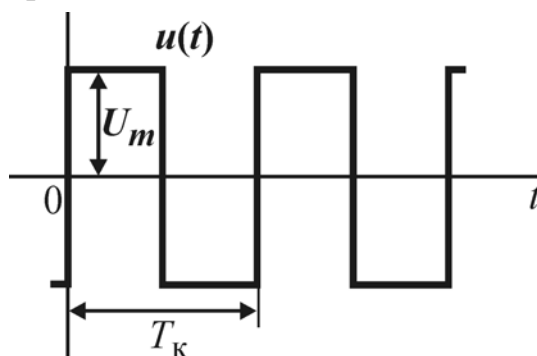
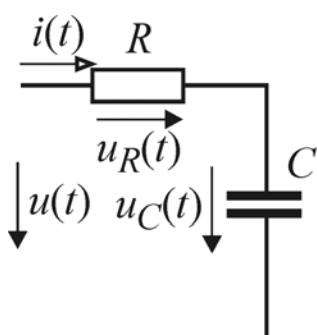


Рис. 6.1. Напряжение на входе цепи.

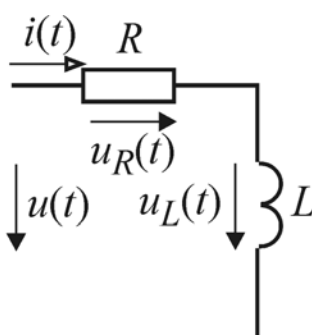
Исследование переходных процессов в данной работе проводится при подключении электрической цепи к источнику постоянного напряжения, скачкообразно изменяющегося от  $+U_m$  до  $-U_m$  с периодом коммутации  $T_k$  (рис. 6.1).

Цепи RC и RL. Электрические цепи с одним реактивным элементом называются цепями первого порядка. Простейшими примерами таких це-

пей являются последовательные соединения резистивного и емкостно-



а)



б)

Рис. 6.2. Простейшие электрические цепи первого порядка

го или индуктивного элементов (рис. 6.2). При подключении цепи к источнику постоянного напряжения токи и напряжения на ее элементах будут изменяться по экспоненциальным зависимостям, приведенным в таблице 6.1.

Скачкообразное изменение входного напряжения RC-цепи вызывает

скачкообразное изменение тока и напряжения на резистивном элементе с

последующим уменьшением их до нуля по экспоненте, в то время как напряжение на емкостном элементе при скачках входного напряжения изменяется экспоненциально и непрерывно в момент коммутации.

В  $RL$ -цепи в момент коммутации происходит скачок напряжения на индуктивном элементе, а ток и напряжение на резисторе изменяются непрерывно.

Постоянная времени экспоненты переходного процесса  $\tau$  является важнейшим параметром, определяющим длительность переходного процесса, а также скорость изменения тока в цепи и напряжений на ее элементах.

Экспериментально ее можно определить по любой точке с известным уровнем сигнала. Относительные уровни экспоненциальных сигналов вида

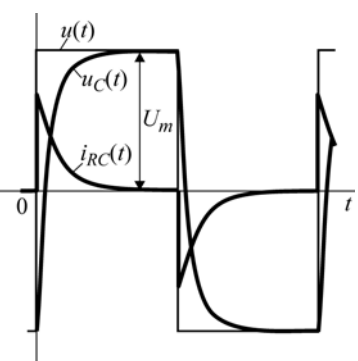
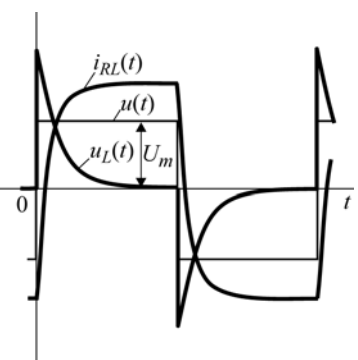
$$a(t) = Ae^{-t/\tau} \text{ и } a(t) = A(1 - e^{-t/\tau}) \text{ равны соответственно}$$

$$d = \frac{a(t_d)}{A} = e^{-t/\tau} \text{ и } d = 1 - \frac{a(t_d)}{A} = e^{-t/\tau} \quad (6.1)$$

где  $0 \leq d \leq 1,0$  – относительный уровень сигнала в момент времени  $t_d$ . Отсюда можно определить значение  $\tau$ , например, по времени  $t_{0,5}$ , т.е. по времени когда ток или напряжение на любом элементе цепи достигают половины своего амплитудного значения

$$\tau = \frac{t_{0,5}}{\ln 2} \approx 1,44 \cdot t_{0,5} \quad (6.2)$$

Таблица 6.1

|      | Переходные функции                                                                                                                                                                                                  | Начальные и установившиеся значения                                                                                                                                              |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $RC$ |  $i_{RC}(t) = \frac{2U_m}{R} e^{-t/\tau}$ $u_R(t) = 2U_m e^{-t/\tau}$ $u_C(t) = U_m(1 - 2e^{-t/\tau})$ $\tau = RC$               | $i_{RC}(0_+) = \frac{2U_m}{R};$ $i_{RC}(\infty) = i_{RC}(0_-) = 0$ $u_R(0_+) = 2U_m;$ $u_R(\infty) = u_R(0_-) = 0$ $u_C(0_+) = u_C(0_-) = -U_m;$ $u_C(\infty) = U_m$             |
| $RL$ |  $i_{RL}(t) = \frac{U_m}{R}(1 - 2e^{-t/\tau})$ $u_R(t) = U_m(1 - 2e^{-t/\tau})$ $u_L(t) = 2U_m e^{-t/\tau}$ $\tau = \frac{L}{R}$ | $i_{RL}(0_+) = i_{RL}(0_-) = -\frac{U_m}{R};$ $i_{RL}(\infty) = \frac{U_m}{R}$ $u_R(0_+) = -U_m;$ $u_R(\infty) = u_R(0_-) = U_m$ $u_L(0_+) = 2U_m;$ $u_L(\infty) = u_L(0_-) = 0$ |



*Цепь RLC.* Простейшей электрической цепью второго порядка является последовательное соединение резистивного, индуктивного и емкостного элементов (рис. 6.3). Переходные функции тока и напряжений на элементах цепи (см. таблицу 6.2) могут иметь аperiодический или колебательный характер, т.е. эти функции могут иметь один или несколько экстремумов. Математически тип переходного процесса полностью определяется корнями характеристического уравнения

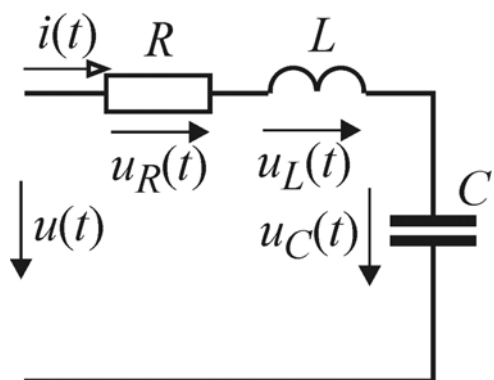


Рис. 6.3. Простейшая электрическая цепь второго порядка

уравнения  $p^2LC + pRC + 1 = 0$ , которые зависят от соотношения параметров  $R$ ,  $L$  и  $C$ . Изменить характер процесса можно вариацией любого из этих параметров или их сочетаний, однако проще всего это сделать изменением резистивного сопротивления  $R$ .

При аperiодическом процессе переходные функции представляют собой сумму двух экспонент с постоянными времени

$$\tau_1 = \left| \frac{1}{p_1} \right| \text{ и } \tau_2 = \left| \frac{1}{p_2} \right| ,$$

причём  $\tau_1 > \tau_2$ . Пренебрегая влиянием быстро затухающей экспоненты, длительность переходного процесса с достаточной точностью можно определить по первому корню характеристического уравнения:

$$\theta_p = 3\tau_1 = \frac{3}{\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}} , \quad (6.3)$$

где

$$\delta = \frac{R}{2L} , \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} .$$

Пользуясь выражениями (6.1), можно экспериментально определить эту длительность по времени нарастания напряжения на конденсаторе до значения равного 0,9 от установившегося значения –  $t_{0,9}$  как

$$\theta_3 = 3\tau_1 = 3 \frac{t_{0,9}}{\ln 10} \approx 1,3 \cdot t_{0,9}. \quad (6.4)$$

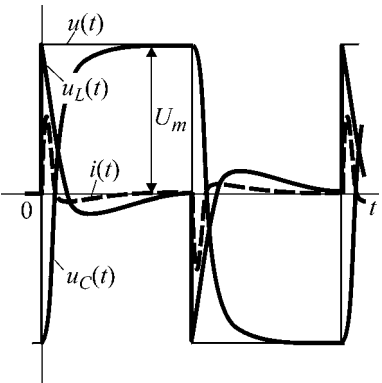
При колебательном процессе затухание  $\delta$  и частоту свободных колебаний  $\omega$  можно определить расчетным путем как

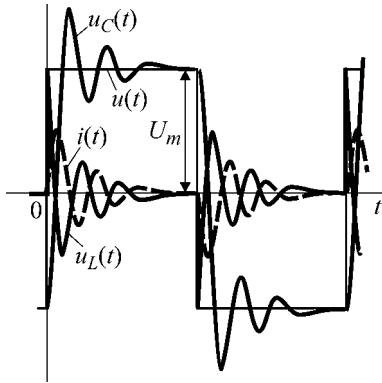
$$\delta_p = \frac{R}{2L} \quad \text{и} \quad \omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}. \quad (6.5)$$

Экспериментально эти параметры определяются по двум соседним амплитудам колебаний тока  $i_{m1}$ ,  $i_{m2}$  и периоду колебаний  $T$ :

$$\delta_3 = \frac{\ln\left(\frac{i_{1m}}{i_{2m}}\right)}{T} \quad \text{и} \quad \omega_3 = \frac{2\pi}{T}. \quad (6.6)$$

Таблица 6.2.

|                        | Переходные функции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Начальные и установившиеся значения                                                                                             |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Апериодический процесс |  <p> <math>p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}</math><br/> где<br/> <math>\delta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}</math><br/> <math>\delta &gt; \omega_0;</math><br/> <math>p_2 &lt; p_1 &lt; 0</math> </p> <p> <math>i(t) = \frac{2U_m}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad u_R(t) = i(t) \cdot R;</math><br/> <math>u_L(t) = \frac{2U_m}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t});</math><br/> <math>u_C(t) = U_m \left[ 1 - \frac{2}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}) \right];</math> </p> | <p> <math>i(0_+) = i(0_-) = i(\infty) = 0;</math><br/> <math>u_R(0_+) = u_R(0_-) =</math><br/> <math>(-U_m) \quad 0</math> </p> |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Колебательный процесс | <div style="display: flex; align-items: flex-start;">  <div style="margin-left: 20px;"> <math display="block">p_{1,2} = -\delta \pm j\omega</math> <p>где</p> <math display="block">\delta = \frac{R}{2L}; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}</math> <math display="block">\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}</math> <math display="block">\omega_0 &gt; \delta</math> </div> </div> <div style="margin-top: 20px;"> <math display="block">i(t) = \frac{2U_m}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t; \quad u_R(t) = i(t) \cdot R;</math> <math display="block">u_L(t) = 2U_m \varpi e^{-\delta t} \cos(\omega t + \beta);</math> <math display="block">u_C(t) = U_m \left[ 1 - 2\varpi e^{-\delta t} \cos(\omega t - \beta) \right]</math> <p>где</p> <math display="block">\varpi = \frac{\omega_0}{\omega}; \quad \beta = \arctg\left(\frac{\delta}{\omega}\right)</math> </div> |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

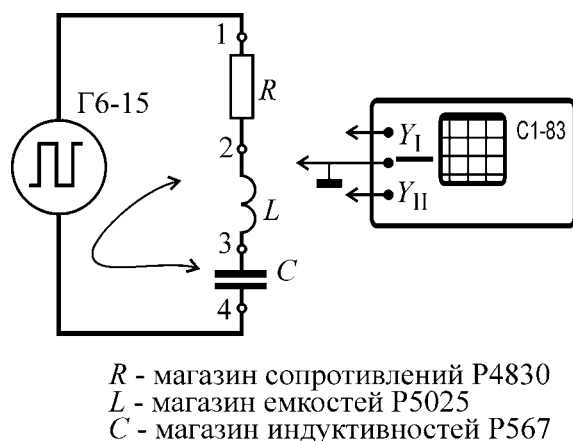
### Программа работы

1. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.
  - 1.1. Исследование переходного процесса в  $RC$ -цепи.
  - 1.2. Исследование переходного процесса в  $RL$ -цепи.
2. Исследование переходных процессов в  $RLC$ -цепи.
  - 2.1. Исследование аperiodического переходного процесса.
  - 2.2. Исследование колебательного переходного процесса.

### Приборы и оборудование

1. Генератор сигналов специальной формы Г6-15
2. Осциллограф двухканальный С1-83
3. Магазин сопротивлений Р4830
4. Магазин емкостей Р5025
5. Магазин индуктивностей Р567

### Порядок выполнения работы

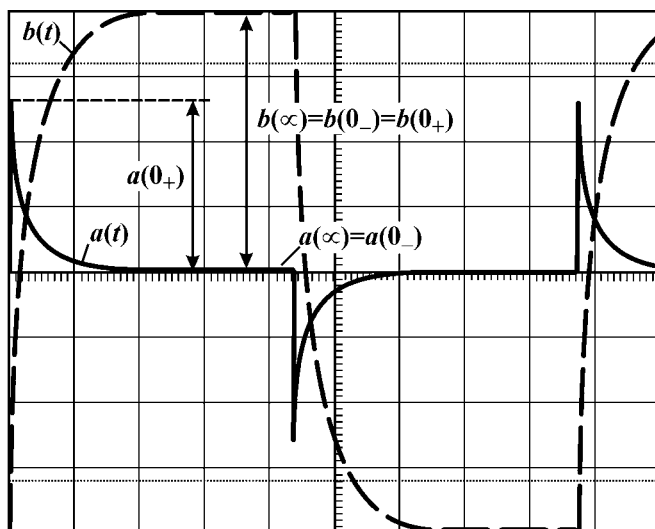


| Точки схемы | Подключение входов осциллографа                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|             | $RC; RL$                                                                          | $RLC$                                                                              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|             |                                                                                   | апериодический                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     | колебательный                                                                       |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|             |                                                                                   | I                                                                                  | II                                                                                  | III                                                                                 | IV                                                                                  | I                                                                                   | II                                                                                  | III                                                                                 | IV                                                                                  |
| 1           | $Y_I$                                                                             |  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |  |  |
| 2           |  | $Y_I$                                                                              |  |                                                                                     | $Y_{II}$                                                                            |                                                                                     |  | $Y_I$                                                                               | $Y_I$                                                                               |
| 3           |                                                                                   |                                                                                    | $Y_I$                                                                               |  |  |  | $Y_I$                                                                               |                                                                                     |                                                                                     |
| 4           | $Y_{II}$                                                                          |                                                                                    |                                                                                     | $Y_I$                                                                               | $Y_I$                                                                               | $Y_I$                                                                               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |

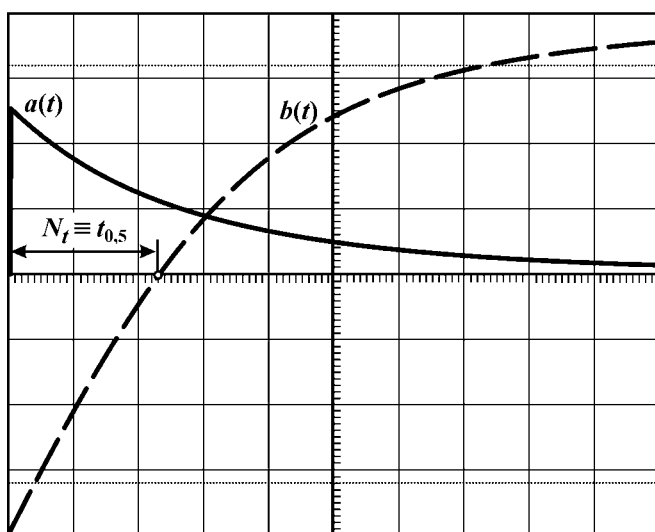
Рис. 6.4. Структурная схема опытов

1. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.

- Для выполнения работы собрать электрическую схему, показанную на рис. 6.4.
- Установить на магазинах сопротивлений, емкостей и индуктивностей значения параметров цепи, заданные преподавателем.
- Установить прямоугольную форму выходного сигнала генератора Г6-15, частоту 1 кГц и амплитуду  $7 \div 8$  В.
- Подключить входы осциллографа в соответствии с таблицей рис. 6.4 и соединить перемычкой точки 3 и 4, замкнув магазин индуктивностей.
- Включить и настроить осциллограф так, чтобы на экране было изображение сигналов приблизительно соответствующее одному периоду коммутации (рис. 6.5 а). При этом ручки плавной настройки вертикального отклонения каналов осциллографа должны быть зафиксированы в крайнем правом положении (по часовой стрелке).
- Если максимальный уровень сигнала напряжения на конденсаторе ( $RC$ -цепь) или тока в индуктивности ( $RL$ -цепь) не совпадает с крайними горизонтальными линиями экрана, подстроить амплитуду генератора Г6-15 так, чтобы совпадение с крайними линиями было точным (сигнал  $b(t)$  на рис. 6.5 а).



а)



б)

Рис. 6.5. Сигналы тока и напряжения  
ния сигнала  $b(t)$  с центральной горизонтальной линией экрана будет располагаться возможно ближе к правому краю.

г) По шкале генератора Г6-15 определить амплитуду сигнала  $U_m$  и зарисовать изображение сигналов.

h) Смещая сигналы по горизонтали к центральной вертикальной линии экрана, измерить отрезки, соответствующие начальным и установившимся значениям тока и напряжения, а затем определить их, пользуясь таблицей 6.3, и сопоставить с расчетными значениями (таблица 6.1), после чего занести в таблицу 6.4.

и) Зафиксировать щелчком ручки плавной регулировки коэффициента развертки в правом положении, а затем переключателем развертки получить такое изображение, при котором точка пересечения

Таблица 6.3

| Цепь | Канал осц. | Сигнал на рис.6.5  | Начальное значение                                                         | Установивш. значение |
|------|------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| RC   | $Y_I$      | $i_{RC}(t) = a(t)$ | $i_{RC}(0_+) = \frac{N_Y \cdot K_{Y_I}}{R}$                                | 0                    |
|      | $Y_{II}$   | $u_C(t) = b(t)$    | $u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(\infty) = N_Y \cdot K_{Y_{II}}$                 |                      |
| RL   | $Y_{II}$   | $u_L(t) = a(t)$    | $u_C(0_+) = N_Y \cdot K_{Y_{II}}$                                          | 0                    |
|      | $Y_I$      | $i_{RL}(t) = b(t)$ | $i_{RL}(0_+) = i_{RL}(0_-) = i_{RL}(\infty) = \frac{N_Y \cdot K_{Y_I}}{R}$ |                      |

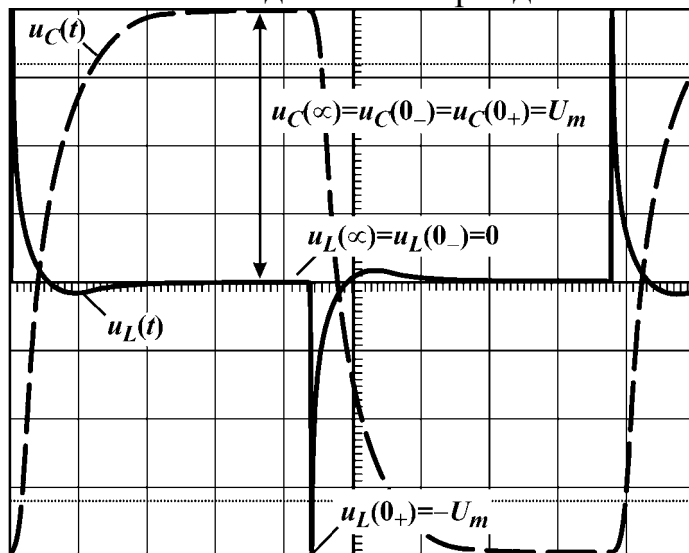
В таблице 6.3:  $N_Y$  – ординаты соответствующих точек сигналов в

делениях (например, на рис. 6.5 а  $a(0_+) = 2,6$  дел.);  $K_{Y_I}$ ,  $K_{Y_{II}}$  – коэффициенты вертикального отклонения каналов  $Y_I$  и  $Y_{II}$ , определяемые по положению ручек переключателей.

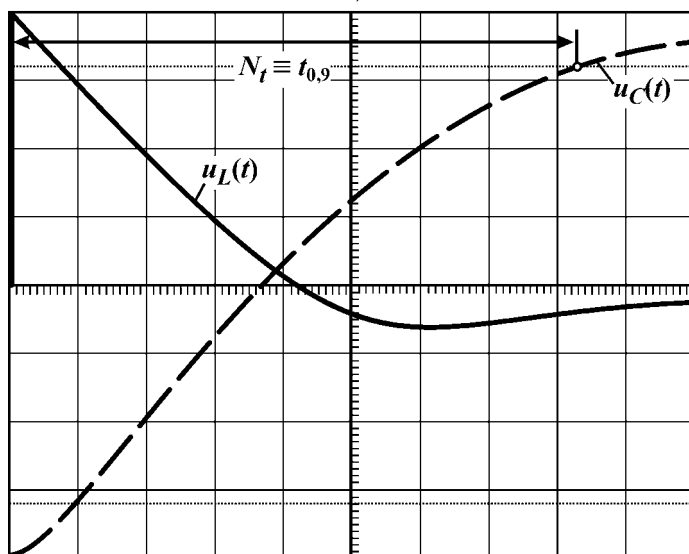
- ж) Измерить отрезок  $N_t$  в делениях (2,3 дел на рис. 6.5 б) и, определив по положению переключателя коэффициент развертки значение  $K_t$ , найти время  $t_{0,5} = N_t \cdot K_t$ , а затем постоянную времени экспоненты  $\tau_3$  по выражению (6.2). Сопоставить полученное значение  $\tau_3$  с расчетным значением  $\tau_p$  из таблицы 6.1 и занести эти данные в таблицу 6.4.
- к) Переключить штекер перемычки из точки 4 в точку 2 (рис. 6.4) и повторить п.п. е-ж для  $RL$ -цепи.

## 2. Исследование переходных процессов в $RLC$ -цепи.

### 2.1. Исследование аperiodического переходного процесса.



а)



б)

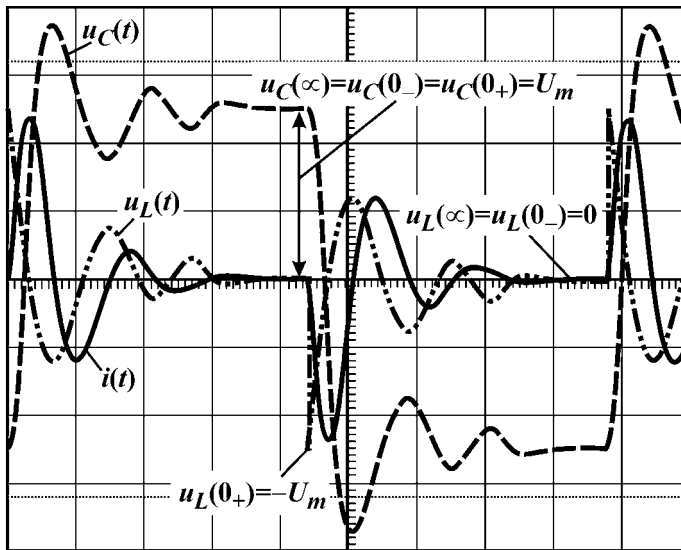
Рис. 6.6. Сигналы при аperiodическом переходном процессе

- а) Для выполнения работы собрать электрическую схему, показанную на рис. 6.4.
- б) Установить на магазине сопротивлений значение 6000 Ом, а на магазинах емкостей и индуктивностей значения, заданные преподавателем.
- в) Установить прямоугольную форму выходного сигнала генератора Г6-15, амплитуду  $7 \div 8$  В и заданную частоту.
- г) Подключить вход осциллографа  $Y_I$  к выходу генератора Г6-15 и настроить его так, чтобы изображение на экране приблизительно соответствовало одному периоду коммутации.
- е) Переключая вход  $Y_I$  в соответствии с таблицей (рис. 6.4) и подстраивая при этом коэффициент вертикального отклонения так, чтобы изображение сигнала занимало возможно большую часть экрана, зарисовать сигналы напряжений на сопротивлении, индуктивности и емкости цепи.

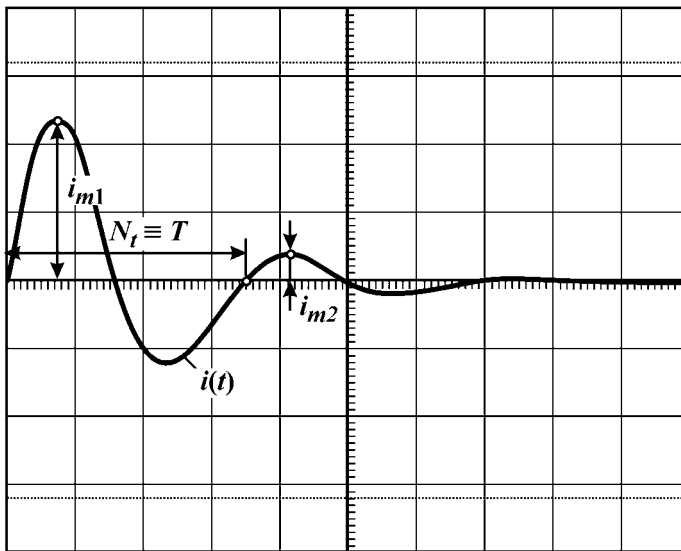
- f) Подключить входы осциллографа  $Y_I$  и  $Y_{II}$  к зажимам катушки и конденсатора в соответствии с режимом IV таблицы (рис. 6.4).
- g) Убедиться в том, что ручки плавной настройки вертикального отклонения обоих каналов зафиксированы в крайнем правом положении (по часовой стрелке). После чего, регулятором амплитуды генератора Г6-15 подстроить напряжение  $U_m$  так, чтобы максимальные значения сигналов  $Y_I$  и  $Y_{II}$  в точности соответствовали крайним горизонтальным линиям экрана (рис. 6.6 а) и записать полученное значение  $U_m$ .
- h) Вычислить начальные значения напряжений на индуктивности и конденсаторе  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = u_C(\infty) = \pm 4 \cdot K_{Y_I}$ ;  $u_L(0_+) = \mu 4 \cdot K_{Y_{II}}$  и, сопоставив с расчетными значениями, полученными по таблице 6.2, занести их в таблицу 6.5.
- i) Зафиксировать щелчком ручку плавной регулировки коэффициента развертки в крайнем правом положении (по часовой стрелке), а затем переключателем развертки получить такое изображение, при котором точка пересечения сигнала  $u_C(t)$  (канал  $Y_I$ ) с верхней горизонтальной пунктирной линией экрана будет располагаться возможно ближе к правому краю (рис. 6.6 б).
- j) Измерить отрезок  $N_t$  в делениях (8,3 деления на рис. 6.6 б) и, определив по положению переключателя коэффициента развертки значение  $K_t$ , найти время  $t_{0,9} = N_t \cdot K_t$ , а затем длительность переходного процесса  $\theta_3$  по выражению (6.4). Сопоставить полученное значение с расчетным значением  $\theta_p$  по выражению (6.3) и занести эти данные в таблицу 6.5.

## 2.2. Исследование колебательного переходного процесса.

- a) Для выполнения работы собрать электрическую схему, показанную на рис. 6.4.
- b) Установить на магазине сопротивлений значение 600 Ом, а на магазинах емкостей и индуктивностей значения, заданные преподавателем.
- c) Установить прямоугольную форму выходного сигнала генератора Г6-15, амплитуду 6÷7 В и частоту в соответствии с заданием.
- d) Подключить вход осциллографа  $Y_I$  к выходу генератора Г6-15 и настроить его так, чтобы изображение на экране приблизительно соответствовало одному периоду коммутации.
- e) Переключая вход  $Y_I$  в соответствии с таблицей (рис.6.4) и подстраивая при этом коэффициент вертикального отклонения так, чтобы изображение сигнала занимало возможно большую часть экрана, зарисовать сигналы напряжений на емкости, индуктивности и сопротивлении цепи.
- f) Подключить вход осциллографа  $Y_I$  к сопротивлению  $R$  в соответствии с режимом IV таблицы (рис. 6.4). При этом сигнал на экране осциллографа будет соответствовать току в цепи, т.к. падение напряжения на резистивном сопротивлении всегда пропорционально току.



а)



б)

Рис. 6.7. Сигналы при колебательном переходном процессе

- г) Убедиться в том, что нулевой уровень сигнала соответствует центральной горизонтальной линии экрана.
- h) Подстроить коэффициент вертикального отклонения канала  $Y_I$  так, чтобы изображение сигнала занимало возможно большую часть экрана (рис. 6.7 б)
- и) Зафиксировать щелчком ручку плавной регулировки коэффициента развертки в крайнем правом положении (по часовой стрелке), а затем переключателем развертки получить такое изображение, при котором две первые волны колебаний будут занимать возможно большую часть экрана (рис. 6.7 б).
- j) Измерить отрезок  $N_t$  в делениях (3,5 деления на рис. 6.7 б) и, определив по положению переключателя коэффициента развертки значение  $K_t$ , найти период колебаний  $T = N_t \cdot K_t$ , а затем частоту  $\omega_s$  по выражению (6.6). Сопоставить полученное значение с расчетным значением  $\omega_p$  по выражению (6.5) и занести эти данные в таблицу 6.6.
- к) Смещая сигнал по горизонтали к центральной вертикальной линии экрана, измерить отрезки  $N_1$  и  $N_2$ , соответствующие двум соседним амплитудам колебаний  $i_{m1}$  и  $i_{m2}$  (рис. 6.7 б). Полученные длины отрезков пропорциональны амплитудам, а т.к. для вычисления коэффициента затухания  $\delta$  используется отношение значений  $i_{m1}/i_{m2}$ , то вместо него в выражение (6.6) можно подставить отношение  $N_1/N_2$  и определить  $\delta_s$ .
- л) Сопоставить полученное значение  $\delta_s$  с расчетным значением  $\delta_p$  по выражению (6.5) и занести эти данные в таблицу 6.6.



Таблица 6.4

| $R$<br>[Ом] | $C$<br>[мкФ] | $L$<br>[мГн] | Тип<br>данных     | $i(0_+)$<br>[мА] | $i(\infty)$<br>[мА] | $u_C(\infty)$<br>[В] | $u_L(0_+)$<br>[В] | $\tau$<br>[мкс] |
|-------------|--------------|--------------|-------------------|------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|             |              |              | эксп.             |                  |                     |                      |                   |                 |
|             |              |              | расч.             |                  |                     |                      |                   |                 |
|             |              |              | $\varepsilon$ [%] |                  |                     |                      |                   |                 |
|             |              |              | эксп.             |                  |                     |                      |                   |                 |
|             |              |              | расч.             |                  |                     |                      |                   |                 |
|             |              |              | $\varepsilon$ [%] |                  |                     |                      |                   |                 |

Таблица 6.5

| Параметры<br>элементов<br>цепи<br>$R=6000$ Ом |              | $u_C(0_+)$  |             |                      | $u_L(0_+)$  |             |             | $\theta$      |               |                      |
|-----------------------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------------|
| $L$<br>[мГн]                                  | $C$<br>[мкФ] | расч<br>[В] | эксп<br>[В] | $\varepsilon$<br>[%] | расч<br>[В] | эксп<br>[В] | погр<br>[%] | расч<br>[мкс] | эксп<br>[мкс] | $\varepsilon$<br>[%] |
|                                               |              |             |             |                      |             |             |             |               |               |                      |

Таблица 6.6

| Параметры<br>элементов цепи<br>$R=600$ Ом |              | $\delta$                   |                            |                      | $\omega$                   |                         |                      |
|-------------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|
| $L$<br>[мГн]                              | $C$<br>[мкФ] | расч<br>[с <sup>-1</sup> ] | эксп<br>[с <sup>-1</sup> ] | $\varepsilon$<br>[%] | расч<br>[с <sup>-1</sup> ] | эксп [с <sup>-1</sup> ] | $\varepsilon$<br>[%] |
|                                           |              |                            |                            |                      |                            |                         |                      |

Погрешность  $\varepsilon$  в таблицах рассчитывается как  $\varepsilon = 100 \cdot (\text{расч} - \text{эксп}) / \text{расч}$ .

### Содержание отчета

1. Перечень приборов и оборудования.
2. Схемы проведения опытов.
3. Расчетные формулы и результаты.
4. Заполненные таблицы 6.4 ÷ 6.6.
5. Выводы по работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть1, Линейные электрические цепи. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. - М.: Энергия, 1978.
2. Общая электротехника /Под редакцией А.Т. Блажкина. Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергия, 1979.
3. Прянишников В.А., Петров Е.А., Осипов Ю.М. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.
4. Усольцев А.А. Электротехника: учебное пособие для вузов. СПб.:ИТМО, 1999.– [www.de.ifmo.ru](http://www.de.ifmo.ru)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть1, Линейные электрические цепи. Учебник для студентов высших технических учебных заведений. - М.: Энергия, 1978.
2. Общая электротехника /Под редакцией А.Т. Блажкина. Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергия, 1979.
3. Прянишников В.А., Петров Е.А., Осипов Ю.М. Электротехника и ТОО в примерах и задачах: Практическое пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.
4. Усольцев А.А. Электротехника: учебное пособие для вузов. СПб.:ИТМО, 1999.– [www.de.ifmo.ru](http://www.de.ifmo.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

- Лабораторная работа 1. Исследование линейных пассивных двухполюсников в цепи синусоидального тока.....
- Лабораторная работа 2. Исследование частотных характеристик резонансных электрических цепей.....
- Лабораторная работа 3. Исследование индуктивно связанных электрических цепей.....
- Лабораторная работа 4. Исследование трехфазных цепей.....
- Лабораторная работа 5. Исследование спектров несинусоидальных напряжений и токов электрической цепи.....
- Лабораторная работа 6. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях.....

# ПРИЛОЖЕНИЕ

1

Исследуется выходное напряжение генератора

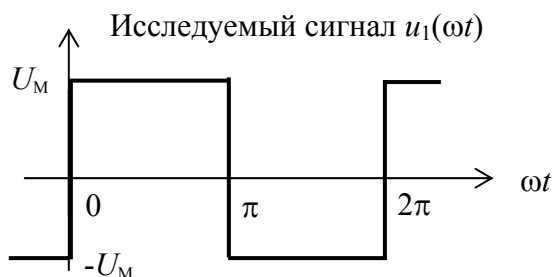


Схема установки



Составляющие ряда Фурье

$$A_0 = 0, \quad B_{mk} = \begin{cases} 0 & \text{при } k = 2, 4, 6, \dots \\ \frac{4U_M}{k\pi} & \text{при } k = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad C_{mk} = 0.$$

2

Исследуется выходное напряжение генератора

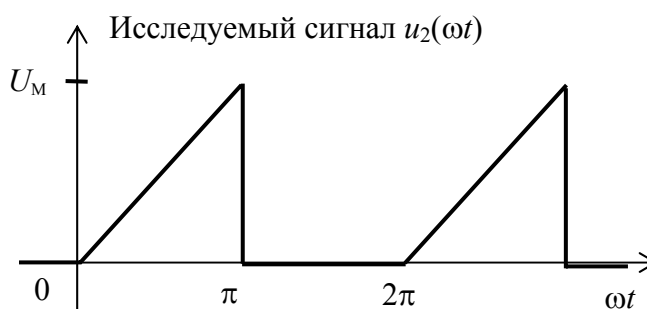
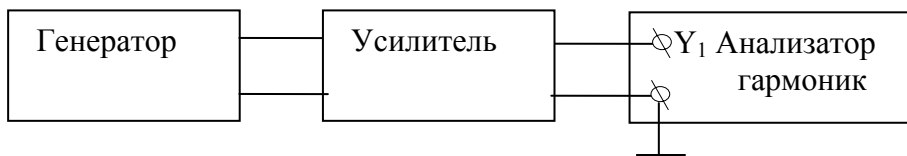


Схема установки



Составляющие ряда Фурье

$$A_0 = \frac{U_M}{4}, \quad B_{mk} = \frac{U_M}{k\pi} (-1)^{k+1} \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots$$

$$C_{mk} = \frac{U_M}{(k\pi)^2} [(-1)^k - 1] \quad \text{при } k = 1, 2, 3, \dots$$

3

Исследуется выходное  
напряжение генератора

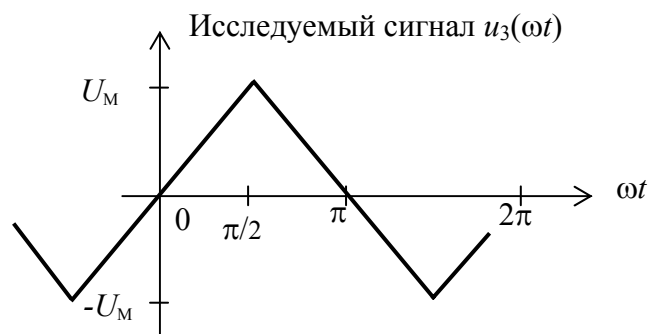


Схема установки



Составляющие  
ряда Фурье

$$A_0 = 0, \quad B_{mk} = \begin{cases} 0 & \text{при } k = 2, 4, 6, 8, \dots \\ \frac{8U_M}{(\pi k)^2} & \text{при } k = 1, 5, 9, 13, \dots \\ -\frac{8U_M}{(\pi k)^2} & \text{при } k = 3, 7, 11, 15, \dots \end{cases}$$

$$C_{mk} = 0.$$

4

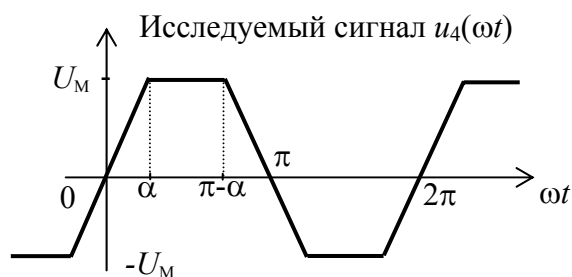
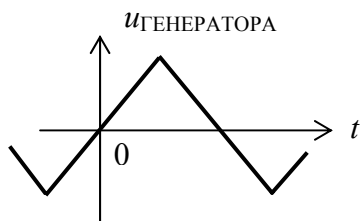
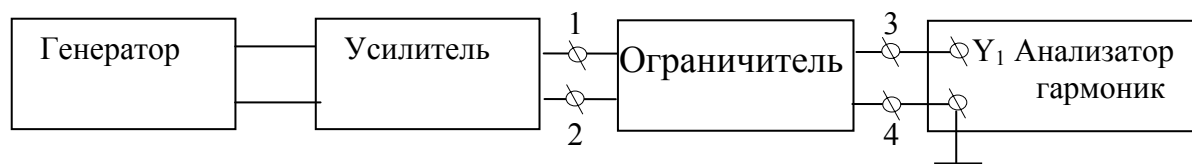


Схема установки



Составляющие  
ряда Фурье

$$A_0 = 0, \quad \alpha - [\text{радиан}]$$

$$B_{mk} = \begin{cases} 0 & \text{при } k = 2, 4, 6, \dots \\ \frac{4U_M}{k\pi} \cdot \frac{\sin(k\alpha)}{k\alpha} & \text{при } k = 1, 3, 5, \dots \end{cases}$$

$$C_{mk} = 0.$$

5

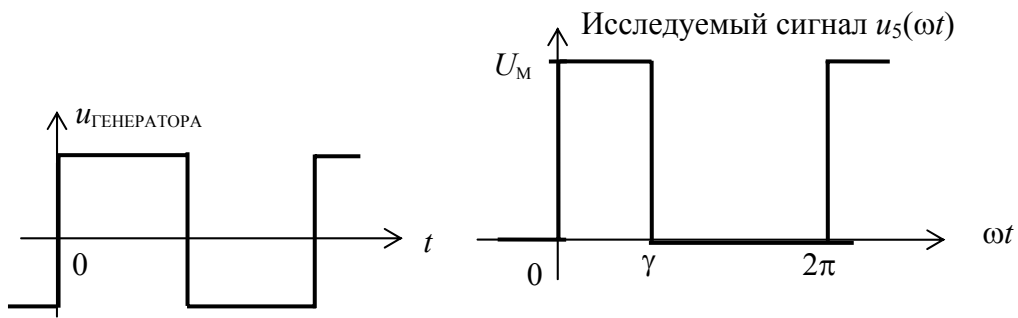
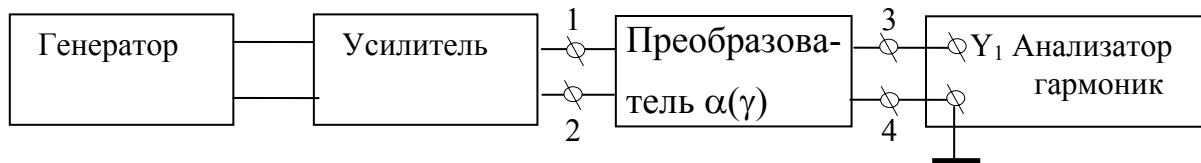


Схема установки

Составляющие  
ряда Фурье

$$A_0 = U_M \frac{\gamma}{2\pi}, \quad \gamma - [\text{радиан}]$$

$$B_{mk} = \frac{U_M}{k\pi} [1 - \cos(k\gamma)] \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$C_{mk} = \frac{U_M}{k\pi} [\sin(k\gamma)] \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

6

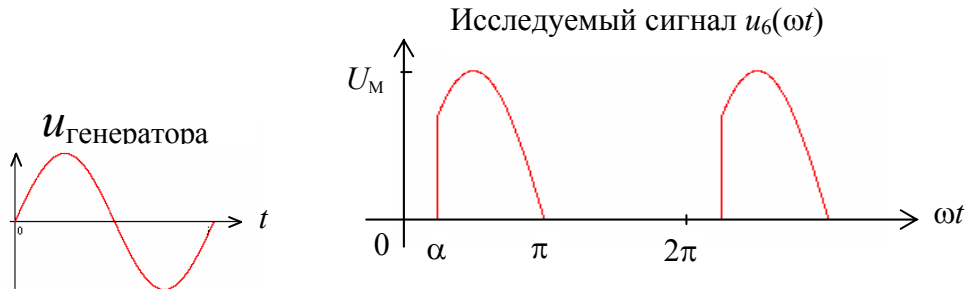
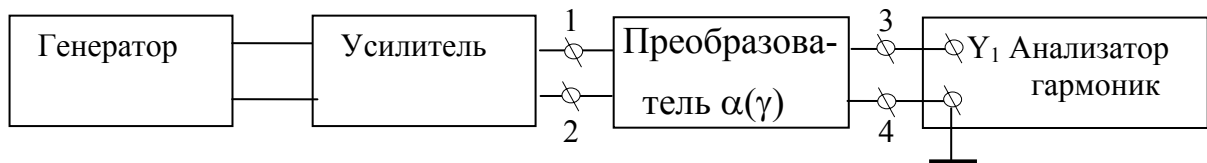


Схема установки

Составляющие  
ряда Фурье $\alpha$  - [радиан]

$$B_{mk} = \begin{cases} \frac{U_M}{2\pi} \left[ \pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] & \text{при } k = 1, \\ \frac{U_M}{2\pi} \left\{ \frac{\sin[(1-k)\alpha]}{k-1} + \frac{\sin[(1+k)\alpha]}{k+1} \right\} & \text{при } k=2,3,4,\dots, \end{cases}$$

$$A_0 = \frac{U_m}{2\pi} [1 + \cos(\alpha)], \quad \begin{cases} \frac{-U_M}{2\pi} \cdot \sin^2(\alpha) & \text{при } k = 1, \\ \frac{U_M}{2\pi} \left\{ \frac{\cos[(1+k)\alpha]}{k+1} - \frac{\cos[(1-k)\alpha]}{k-1} - \frac{2(-1)^k}{(k+1)(k-1)} \right\} & \text{при } k=2,3,4,\dots, \end{cases}$$

7

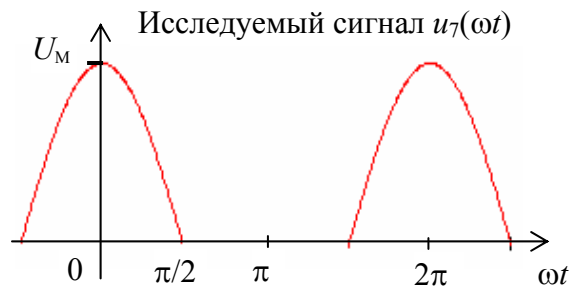
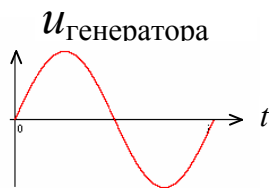
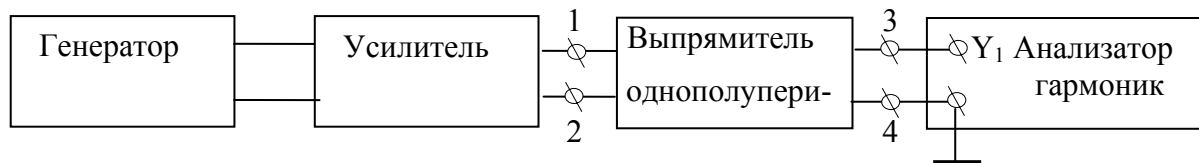


Схема установки

Составляющие  
ряда Фурье

$$A_0 = \frac{U_M}{\pi} \quad B_{mk} = 0 \quad C_{mk} = \begin{cases} 0,5 U_M & \text{при } k = 1 \\ 0 & \text{при } k = 3, 5, 7, \dots \\ \frac{2U_M}{\pi(k-1)(k+1)} (-1)^{\frac{k}{2}+1} & \text{при } k=2,4,6,\dots \end{cases}$$

8

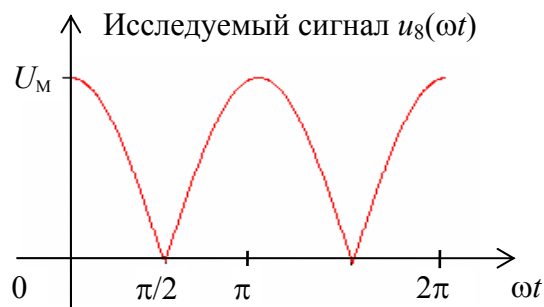
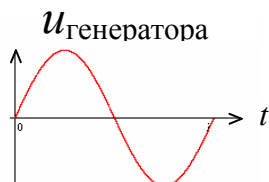
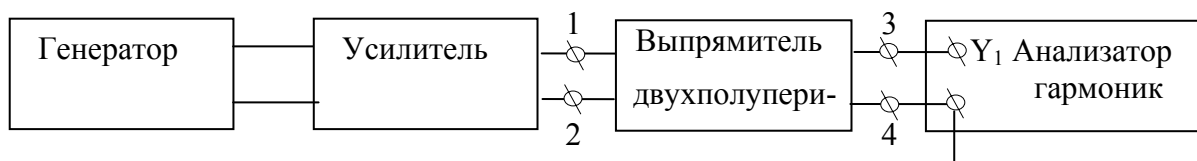


Схема установки

Составляющие  
ряда Фурье

$$A_0 = \frac{2U_M}{\pi}, \quad B_{mk} = 0, \quad C_{mk} = \begin{cases} 0 & \text{при } k = 1, 3, 5, \dots \\ \frac{4U_M}{\pi(k-1)(k+1)} (-1)^{\frac{k}{2}+1} & \text{при } k=2,4,6,\dots \end{cases}$$

9

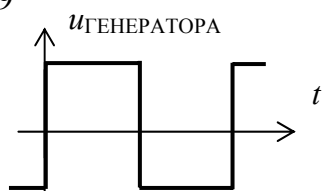
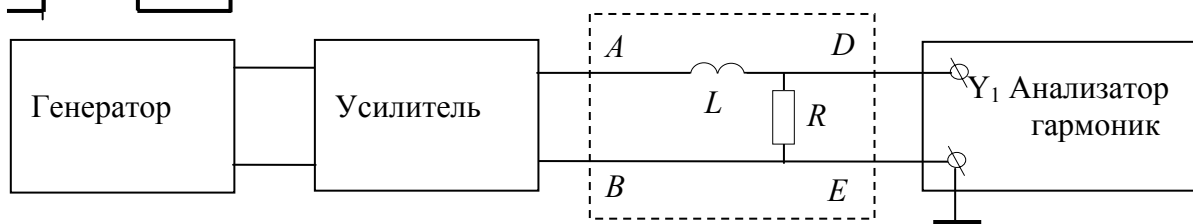


Схема установки



10

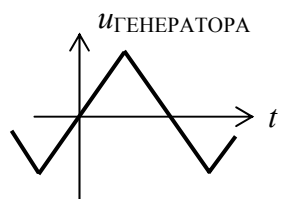
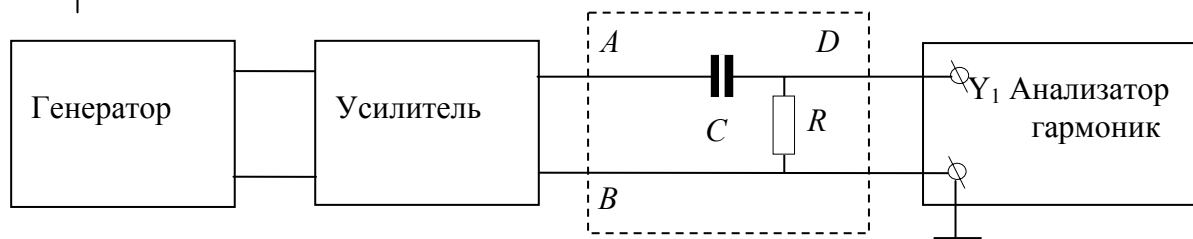


Схема установки







## **ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

Ю.А. Климов, В.С. Томасов

В 1930 году техникум точной механики и оптики был реорганизован в учебный комбинат, состоящий из института, техникума и ФЗУ в системе Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности.

В те годы электротехническую подготовку в нашем институте проводили кафедры «Электротехники» и «Электроизмерительных приборов». Кафедрой «Электротехники» руководил проф. Салтыков Л.Н., а кафедрой «Электроизмерительных приборов» проф. Шишелов Л.П.

С сентября 1933 года исполнять обязанности заведующего кафедрой «Электротехники» нашего института начинает Рукавишников Н. Н., а с ноября 1937 года, на заведование кафедрой назначается Солодовников А. А., известный специалист в области электротехники, электроизмерительных приборов и оборудования.

Во время войны при эвакуации ЛИТМО в г. Черепаново кафедрой руководил доц., к.т.н. Березниковский С. Ф.; штатное расписание кафедры в те годы насчитывало всего 4 человека.

После возвращения ЛИТМО из эвакуации в 1944 году кафедрой заведует Березниковский С.Ф., которого 25 января 1945 года освобождают от обязанностей заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» и назначают заведующим этой кафедрой профессора Зилитенкевича С.И.

В послевоенные годы в целом по стране и в Ленинграде ощущался дефицит опытных преподавателей высшей школы и руководство институтом пригласило в качестве заведующего кафедрой «Общей и специальной электротехники» известного ученого, педагога и методиста Пиотровского Л. М. Большинство учебников по электрическим машинам в ту пору было написано либо лично Пиотровским Л.М., либо в соавторстве с другими видными учеными.

В 1948 году на базе кафедры «Общей и специальной электротехники» образуются кафедры: «Общей электротехники и электрических машин» зав.каф. доц. Березниковский С.Ф., «Теоретических основ электротехники» зав. каф. проф. Слепян Л.Б. и «Электроизмерительных приборов» исполняющий обязанности зав. каф. проф. Слепян Л.Б.

В 1951 году кафедры «Электротехники» и «ТОЭ» объединяют в единую кафедру «Электротехники и ТОЭ» под руководством доц. Березниковского С.Ф. в составе Радиотехнического факультета,

В 1956 году на Радиотехническом факультете вновь образуются две кафедры – «ТОЭ» зав. каф. доц. Сочнев А.Я. и «Электрических машин» зав. каф. доц. Березниковский С.Ф.

В июле 1958 года доц Сочнева А.Я. освобождают от обязанностей зав. каф. «ТОЭ», а доц. Фунтова Н.М. назначают в.и.о. зав. каф. и избирают по конкурсу на должность заведующего в 1960 году.

В 1961 году в ЛИТМО на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» приглашают профессора Сахарова А.П.

В 1965 году на должность заведующего кафедрой «Электрических машин» избирается доц., к.т.н. Глазенко Т.А.

В 1968 году кафедры «ТОЭ» и «Электрических машин» объединяются в единую кафедру «Электротехники» под руководством Т.А. Глазенко.

Татьяна Анатольевна Глазенко в 1948 году с отличием закончила энергетический факультет Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. В 1953 году она защитила кандидатскую диссертацию и в 1966 году докторскую диссертацию. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, почетный член Электротехнической академии России проф. Глазенко Т.А. двадцать пять лет возглавляла кафедру. Она являлась видным, творчески активным ученым, автором более 200 опубликованных научных работ.

В 1990 году на должность заведующего кафедрой избирается проф., д.т.н. Герман - Галкин С.Г.

В 1996 году кафедра «Электротехники» была переименована в кафедру «Электротехники и прецизионных электромеханических систем».

С 1991 года кафедрой руководит доцент кандидат технических наук Томасов Валентин Сергеевич.

Сегодня в составе кафедры: заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, действительный член Международной Энергетической академии, профессор, д.т.н. Сабинин Ю.А., проф., д.т.н. Овчинников И.Е., доц., к.т.н. Толмачев В.А., доц., к.т.н. Губанов Н.Н., доц., к.т.н. Кротенко В.В., доцент, к.т.н. Кардонов Г.А., доц., к.т.н. Осипов Ю.М., доц., к.т.н. Петров Е.А., доцент, к.т.н. Сеницын В.А., доц., к.т.н. Усольцев А.А., доцент, к.т.н. Шалин В.М., доцент, к.т.н. Соловьев В.И. ст. преп., к.т.н. Махин И.Е., доц. Гурьянов В.А., асс. Денисов К.М. асс., к.т.н. Денисова А.В., асс. Осипов Д.В., ассистент Никитина М.В., асс. Серебряков С. А.