

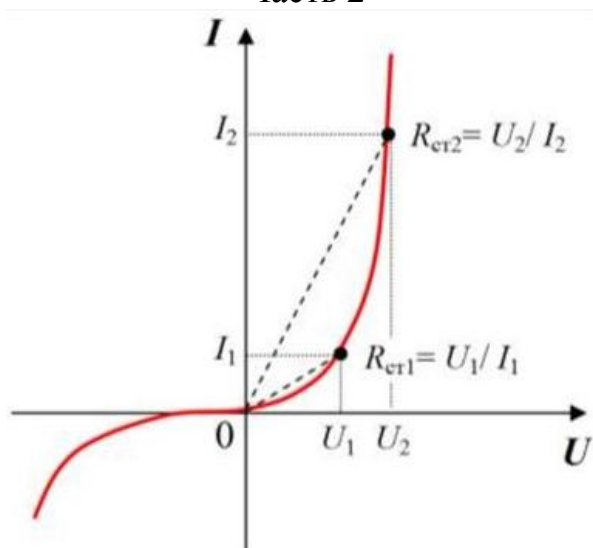
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Амурский государственный университет»

П.П. Проценко, Н.С. Бодруг

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Методические указания  
к лабораторным работам*

по направлению «Электроэнергетика и электротехника»  
Часть 2



Благовещенск  
Издательство АмГУ  
2021

ББК 31.21  
УДК 621.3.01

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
Амурского государственного  
университета*

*Рецензент:*

*Соловьева Татьяна Георгиевна – руководитель группы рабочего проектирования филиала АО «ДРСК» «Амурские ЭС»*

*Проценко П.П., Бодруг Н.С.*

Теоретические основы электротехники : метод. указания к лабораторным работам Ч. 2 / П.П. Проценко, Н.С. Бодруг. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2021.- 75 с.

Методические указания предназначены для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Даны методические указания к выполнению лабораторных работ по теоретическим основам электротехники, часть 2 с описанием теоретической части и требованиями к отчетности.

В авторской редакции.

©Амурский государственный университет, 2021

© Проценко П.П., 2021

© Бодруг Н.С., 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Лабораторная работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА .....	10
Лабораторная работа № 12. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В R–L И R–C ЦЕПИ.....	18
Лабораторная работа № 13. РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА С НА ЦЕПЬ R–L ....	24
Лабораторная работа № 14. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ А-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ТОКА .....	31
Лабораторная работа № 15. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА.....	37
Лабораторная работа № 16. ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ .....	42
Лабораторная работа № 17. ЛИНИЯ КАК УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ .....	49
Лабораторная работа № 18. НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	58
Лабораторная работа № 19. НЕЛИНЕЙНАЯ РЕЗИСТИВНАЯ ЦЕПЬ .....	65
Лабораторная работа № 20. ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА.....	68
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	74

## ВВЕДЕНИЕ

### 1.1 Общие указания правила выполнения лабораторных работ

Выполнение лабораторных работ – важная часть учебного процесса, преследующая цель более глубокого усвоения теоретических положений изучаемой дисциплины и приобретения навыков исследовательской работы.

Перед началом лабораторных работ студенты должны изучить правила и технику безопасности работы в лаборатории.

Для успешного проведения лабораторных занятий каждая лабораторная работа выполняется бригадой в составе 2-3 человека. Бригада обязана проделать все лабораторные работы, предусмотренные учебным планом кафедры.

До начала очередной лабораторной работы студент должен ознакомиться с соответствующими указаниями и рекомендованной литературой. Перед выполнением работы необходимо иметь заранее заготовленную форму протокола измерений.

Прежде чем приступить к выполнению работы, студент должен твердо знать теоретический материал темы, к которой принадлежит данная работа, ясно представлять поставленную в работе задачу, способы ее разрешения и ожидаемые результаты.

Вся экспериментальная часть работы выполняется в полном объеме и той последовательности, как это предусмотрено данными методическими рекомендациями, под наблюдением преподавателя.

Электрические схемы для проведения лабораторных работ следует собирать по рисунку, предварительно вычерченному на бумаге. Это ускоряет сборку схемы и предохраняет от возможных ошибок. При вычерчивании схемы особое внимание должно быть обращено на правильность условных обозначений элементов схемы.

Сборка схемы является ответственной частью каждой лабораторной работы, так как от правильности сборки схемы рекомендуется подключать к клеммам измерительных приборов и элементов блоков не более двух провод-

ников.

Если составляются сложные схемы, следует придерживаться определенного порядка: сначала соединяются последовательно цепи всех приборов с соответствующей аппаратурой, а затем – все параллельные цепи приборов и аппаратура, относящаяся к ним.

Соединяя схемы, следует обратить внимание на правильное включение генераторных зажимов приборов (фазометра, ваттметра).

В работах на постоянном токе, необходимо также следить за правильным включением приборов, поскольку показания их зависят от направления тока.

**Включать напряжение для производства опыта можно только после проверки схемы преподавателем или лаборантом.**

Приступая к работе, нужно наметить порядок проведения отдельных операций и измерений, придерживаться установленного порядка в продолжение всей работы. Во всех случаях, когда возникает сомнение в правильности полученных результатов измерений, необходимо их повторить.

**Обращение с приборами и оборудованием требует большой осторожности и внимательности!**

## **1.2 Составление протокола измерений**

Протокол измерений должен вестись с особой тщательностью, так как он является единственным документом, остающимся в распоряжении экспериментаторов. В протоколе должны отмечаться содержание соответствующего пункта лабораторной работы по программе, электрическая схема, по которой производились измерения.

Запись измерений необходимо вести карандашом в таблицах, указывая в заголовках граф таблиц наименование измеряемых величин и единицы измерения.

Запись результатов измерений по приборам необходимо производить в

такой форме, как они получены (например, в делениях шкалы) без каких-либо пересчетов в уме, хотя бы простейших, иначе при обработке результатов измерения нельзя будет установить, является ли неправильная запись результатом ошибки при подсчете или при наблюдении. Записывая результат измерений в делениях шкалы, необходимо указать постоянную прибора (цену деления).

Ошибочные записи, промахи и сомнительные наблюдения зачеркиваются, но так, чтобы зачеркнутое можно было разобрать.

Если проведение опыта требует выполнения предварительных расчетов, то в протоколе должны быть указаны формулы, по которым они производились и числовые значения, подставленные в формулы.

Рекомендуется после выполнения каждого пункта работы производить, хотя бы ориентировочно, требуемые программой расчеты и построения. Это дает возможность установить правильность проведения опыта.

Результаты измерений предъявляются для просмотра преподавателю до разборки схемы, затем обводятся чернилами.

Если результаты наблюдений оказываются неудовлетворительными, то опыт необходимо повторить. Удовлетворительные результаты подписываются преподавателем.

### **1.3 Составление отчета**

На основании протокола измерений составляется отчет о работе, который включает все данные, занесенные в протокол наблюдений, а также все вычисления и построения, требуемые программой.

Вся графическая часть выполняется на миллиметровой бумаге и подклеивается в соответствующем месте отчета. При построении кривых следует выбирать масштабы, которые давали бы возможность легко пользоваться графиком. Рекомендуется применять шкалы, масштаб которых выражается числами 1, 2, 5, умноженными на  $10^n$ , где  $n$ -целое число. Координатные оси должны быть обозначены с указанием единиц измерения.

На графиках экспериментальных зависимостей обязательно должны

быть отмечены точки кривой, полученные в результате эксперимента. Пример построения графика дан на рисунке 1. На расчетных кривых точки не ставятся (пунктирные линии на рис. 1).

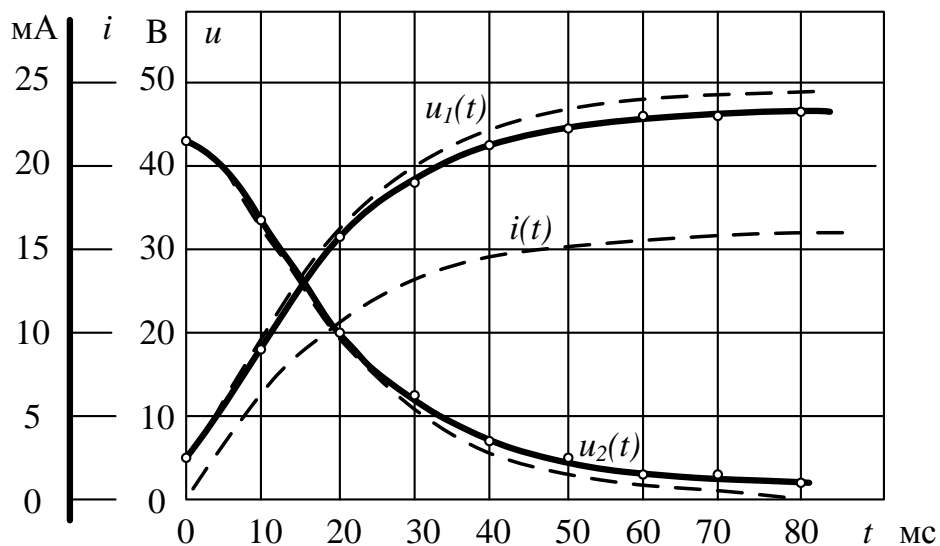


Рис. 1. Пример построения графика

Если на одном поле графика требуется нанести несколько кривых, причем размерность величин, откладываемых по оси ординат, различная, то для каждой величины должна быть дана шкала с условным обозначением величины (рис. 1).

Векторные и круговые диаграммы должны быть построены в масштабе с указанием его на диаграмме.

Масштаб на векторных и круговых диаграммах обозначается указанием масштабного коэффициента. Так, если 1 см на диаграммах соответствует 5 В, то следует писать  $m_u = 5 \text{ В/см}$ . Аналогично для тока, если 1 мм на диаграмме соответствует 0,1 А, то следует писать  $m_i = 0,1 \text{ А/мм}$ .

Отчет представляется преподавателю к следующему лабораторному занятию отдельно каждым студентом. Без сдачи отчета студент не допускается к выполнению очередной работы.

Кроме того, вместе с отчетами каждая бригада представляет протокол

измерений, подписанный ранее преподавателем.

#### 1.4 Компьютерный измерительный комплекс

Компьютерный измерительный комплекс состоит из модуля **ВВОД-ВЫВОД** лабораторного стенда и компьютера с установленным программным обеспечением *DeltaProfi*. Компьютер подключается к модулю **ВВОД-ВЫВОД** посредством стандартного кабеля USB.




Модуль ввода-вывода содержит восемь аналоговых входов («Вход 1»... «Вход 8») и два аналоговых выхода («Выход 1» и «Выход 2»).

Входы 1...4 служат для измерения и осциллографирования напряжений. Гнезда X1-X8 предназначены для измерения напряжений до 300 В, гнезда X9-X16 – для измерения напряжений до 30 В.

Входы 5...8 (гнезда X17-X32) служат для измерения и осциллографирования токов 1 А.

Аналоговые выходы в данном стенде не используются. При измерениях напряжений соответствующие входы модуля **ВВОД- ВЫВОД** подключаются к схеме электрической цепи параллельно исследуемому участку. Для измерения тока в ветвь электрической цепи необходимо включить токовый вход модуля **ВВОД-ВЫВОД**. Входы напряжения и тока при их совместном использовании измеряют активную мощность  $P$ , и величину угла сдвига фаз  $\varphi$  между мгновенными значениями синусоидальных напряжения  $u$  и тока  $i$ .

Запуск информационно-измерительного комплекса *DeltaProfi* осуществляется следующим образом:

- включить компьютер, дождаться окончания загрузки Windows;
- запустить программу *DeltaProfi*. Появится окно программы;
- Выбрать требуемую работу в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор работы...» . На экране появится схема лабораторной работы (на вкладке «Мнемосхемы»). Переход между вкладками осуществляется с помощью кнопок «Стоп»  и «Пуск »  ;



- запустить программу в работу нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5.

Для окончания работы информационно-измерительного комплекса ***DeltaProfi*** необходимо:

- остановить программу, нажатием кнопки в «Стоп» или командой главного меню «Управление – Стоп» или горячей клавишей F6;
- закрыть программу.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТОКА

*Цель работы:* экспериментальное подтверждение метода расчета цепи несинусоидального периодического тока.

#### 1. Общие сведения

Периодическую несинусоидальную функцию, например напряжения  $u(t) = u(t + T)$ , где  $T$  - период, можно представить тригонометрическим рядом Фурье

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (B_k \cdot \sin k\omega t + C_k \cdot \cos k\omega t),$$

где  $U_0$  – постоянная составляющая;

$B_k \cdot \sin k\omega t$ ,  $C_k \cdot \cos k\omega t$  – гармонические составляющие.

Гармоническая составляющая, период  $T$  которой равен периоду  $u(t)$ , называется основной. Остальные гармоники называются высшими.

Расчет линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока основан на принципе наложения. Расчет цепи ведут отдельно для постоянной составляющей, основной и двух-трех высших гармоник.

Для расчета токов и напряжений гармонических составляющих используют комплексный метод расчета. При этом следует иметь в виду, что комплексные сопротивления индуктивности

$$\underline{Z}_L(k\omega) = jk\omega L = jX_L(k\omega)$$

и емкости

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{jk\omega C} = -jX_C(k\omega)$$

зависят от номера  $k$  гармоники. Принцип наложения справедлив только для мгновенных значений несинусоидальных токов и напряжений. Ток и напряжение ветви:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n i_k(k\omega t);$$

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^n u_k(k\omega t);$$

где  $n$  - номер последней высшей гармоники, принятой в расчете.

Действующее значение (например, тока  $i(t)$ ) рассчитывается по формуле

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^n I_k^2}$$

где  $I_0$  - постоянная составляющая,

$I_k$  - действующее значение  $k$ -й гармоники.

Активная мощность цепи равна сумме активных мощностей постоянной и гармонических составляющих

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_k^n U_k \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k.$$

Реактивная и полная мощность определяется по формулам

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k;$$

$$S = U \cdot I,$$

где  $U = \sqrt{\sum_{k=0}^n U_k^2}$ ;  $I = \sqrt{\sum_{k=0}^n I_k^2}$  - действующие значения напряжения и тока.

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I}.$$

Для оценки степени отличия несинусоидальной кривой от синусоиды используют коэффициенты:

$$\text{- формы } k_\phi = \frac{I}{I_{cp}},$$

где  $I_{cp}$  - среднее выпрямленное значение;

- амплитуды  $k_{ам} = I/I_{max}$ ,

где  $I_{max}$  - максимальное значение несинусоидального тока;

- искажения  $k_{ис} = I_1/I$ ,

где  $I_1$  - действующее значение тока основной гармоники.

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе экспериментально подтверждается метод расчета цепи несинусоидального тока, основанный на принципе наложения. Проводится два опыта. Источником несинусоидального напряжения в форме знакопеременных импульсов является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Этот модуль также позволяет получить необходимые синусоидальные напряжения.

Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ** и **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**. Рекомендуемые значения:  $L = 50, 60, 70$  или  $80$  мГн;  $C = 56, 68$  или  $82$  мкФ. Активное сопротивление  $R_K$  катушки измеряют мультиметром. Шунт  $R_{ш1}$  — резистор канала **A1** из блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ**.

Измерения выполняются компьютерным измерительным комплексом (смотри п. 1.4 введения). Ввод данных в компьютер выполняет блок **ВВОД-ВЫВОД**. **Вход 1** и **Вход 5** при их совместном использовании измеряют активную мощность  $P$  цепи и угол сдвига фаз  $\varphi$  между мгновенными значениями синусоидальных напряжения  $u$  и тока  $i$ . При емкостном характере цепи в окне  $\varphi$  на экране монитора появляется величина угла  $0...-90^0$ .

Для получения зависимостей от времени используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

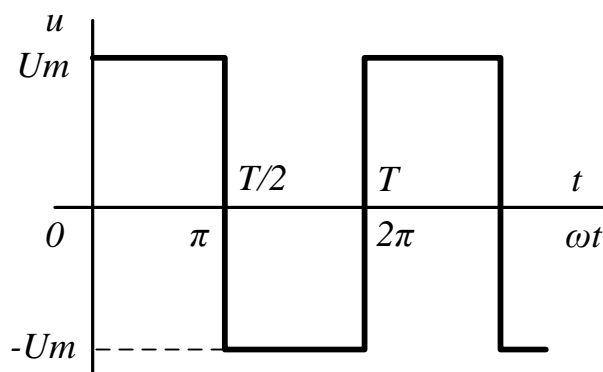


Рис. 11.1

В первом опыте исследуют электрическую цепь с напряжением на входе в форме знакопеременных импульсов (рис. 11.1). Ряд Фурье для такого напряжения имеет вид

$$u(t) \cdot \frac{4U_m}{\pi} \cdot \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5\omega t) + \dots \right).$$

Во втором опыте на вход цепи подают напряжение синусоидальной формы, равное первой, третьей и пятой гармонике разложения исходного напряжения в ряд Фурье.

- Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1П протокола измерений.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Установить в модуле **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** заданные преподавателем величины индуктивности  $L$  катушки и емкости  $C$  конденсатора. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_K$  катушки. Записать эти значения в протокол измерений.

Запустить информационно-измерительный комплекс *DeltaProfi*. Для этого:

- Включить компьютер, дождаться окончания загрузки *Windows*;
- Запустить программу *DeltaProfi*. Появится окно программы.
- Выбрать работу «Работа №11 - Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока» в меню «Работы» или нажав

кнопку «*Выбор работы...*». На экране появится схема лабораторной работы

- Запустить программу в работу, нажатием кнопки «*Пуск*» или командой главного меню «*Управление - Пуск*» или горячей клавишей F5.

### **Первый опыт**

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**, тумблеры **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель **Форма** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение  $\square$ . Регулятором *Частота* установить частоту  $f = 50$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения напряжения  $U = 7$  В.

- По осциллограмме убедиться, что амплитуда входного напряжения составляет  $U_m = 7$  В.

- Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $i(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_i$ .

- Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_C(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

- Выполнить измерения действующих значений напряжений  $u$ ,  $u_C$  и тока  $i$ , активной мощности  $P$ . Измеренные значения занести в табл. 1П протокола измерений.

### **Второй опыт**

- В протоколе измерений рассчитать действующие значения гармонических составляющих входного напряжения.

- Переключатель *Форма* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить в положение  $\sim$ .

- Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения основной гармоники  $U_{(1)}$  входного напряжения.

- Выполнить измерения действующих значений напряжения  $u$  и  $u_C$ , тока  $i$ , активной мощности  $P$  и угла сдвига фаз  $\varphi$ . Измеренные значения занести в табл. 1П. Указанный порядок измерений использовать в следующих опытах

- Регулятором *Частота* установить на выходе модуля **ФУНКЦИО-**

**НАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f = 150$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения третьей гармоники  $U_{(3)}$  входного напряжения.

- Выполнить измерения. Измеренные значения занести в табл. 1П.

Регулятором *Частота* установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f = 250$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения пятой гармоники  $U_{(5)}$  входного напряжения.

- Выполнить измерения. Измеренные значения занести в табл. 1П.

- Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

- Выключить тумблеры **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

Окончить работу программы *DeltaProfi*. Для этого:

- Остановить программу, нажатием кнопки «*Stop*» или командой главного меню «*Управление - Stop*» или горячей клавишей F6.

- Закрыть программу.

## Протокол измерений к лабораторной работе № 11

### «Исследование линейной электрической цепи несинусоидального периодического тока»

Схема исследуемой цепи показана на рис. 1П.

Параметры элементов цепи:  $C = \underline{\hspace{1cm}}$  мкФ;  $L = \underline{\hspace{1cm}}$  мГн;  $R_K = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом,

Амплитуда несинусоидального напряжения  $U_m = 7$  В.

Амплитуды гармоник напряжения:

$$U_{m(1)} = \frac{4U_m}{\pi} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ В};$$

$$U_{m(3)} = \frac{4U_m}{3\pi} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ В};$$

$$U_{m(5)} = \frac{4U_m}{5\pi} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ В}.$$

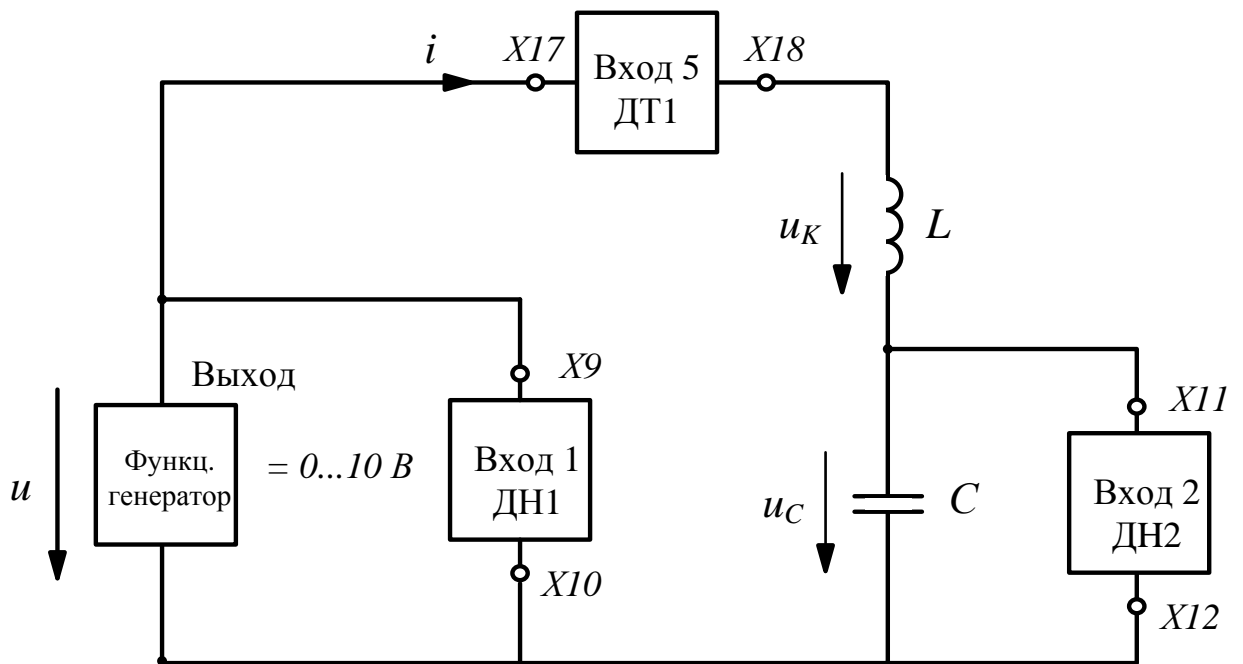


Рис. 1П

Таблица 1П

Эксперимент	$U_m$ , В	$I$ , мА	$U_C$ , В	$P$ , Вт	$\varphi$ , град
Опыт 1					
Несинусоидальное напряжения $u(t)$	7				--
Опыт 2					
Синусоидальное напряжения $u_{(1)}$					
Синусоидальное напряжения $u_{(3)}$					
Синусоидальное напряжения $u_{(5)}$					

По данным опыта 2:

$$\text{ток } I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(3)}^2 + I_{(5)}^2} = \text{---А};$$

$$\text{напряжение } U_C = \sqrt{U_{C(1)}^2 + U_{C(3)}^2 + U_{C(5)}^2} = \text{---В};$$

$$\text{мощность } P = P_{(1)} + P_{(3)} + P_{(5)} = \text{---Вт}.$$

Работу выполнил: \_\_\_\_\_



Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схему замещения электрической цепи. Перенести данные из протокола наблюдений.
2. Рассчитать коэффициенты искажения  $k_{uCb}$ ,  $k_{uCU}$  и коэффициент мощности.
3. По данным опыта 2 записать мгновенные значения входного напряжения, тока и напряжения на конденсаторе как суммы первой и высших гармоник
4. Рассчитать методом наложения мгновенные и действующие значения тока и напряжения на конденсаторе, а также активную мощность. Расчет выполнить в комплексной форме для 1-й и 3-й гармоник. Результаты расчета представить в таблице и сравнить с экспериментом.
5. Нарисовать зависимости  $i(t) = i_{(1)}(t) + i_{(3)}(t)$  и  $u_C(t) = u_{C(1)}(t) + u_{C(3)}(t)$ . На этом же рисунке показать экспериментальные зависимости  $i(t)$  и  $u_C(t)$ .

### 4. Контрольные вопросы

1. Какие методы применяются для расчета цепей несинусоидального тока?
2. Что представляет собой коэффициент амплитуды несинусоидальных колебаний?
3. Как определяется коэффициент формы несинусоидально изменяющейся величины?
4. Как определяется действующее значение тока гармонически изменяющейся величины?
5. Какая составляющая гармонически изменяющейся величины является основной?
6. Что представляют собой и как определяются высшие гармоники несинусоидально изменяющейся величины?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В R–L И R–C ЦЕПИ

*Цель работы:* экспериментальное исследование переходных процессов в цепи с одним накопителем энергии электрического или магнитного полей.

#### 1. Общие сведения

Процесс перехода режима работы электрической цепи от одного к другому называется переходным.

В общем случае в электротехнике принято, что возникновение переходного процесса связано с явлением коммутации. Принимается допущение, что коммутация начинается в момент времени  $t = 0$  и совершается мгновенно:  $\Delta tk = 0$ . При этом различают два момента времени: момент времени непосредственно предшествующий коммутации  $t(-0)$ , или  $t(0-)$  и момент времени непосредственно после коммутации  $t(+0)$ , или  $t(+0)$ . Предположение  $\Delta tk = 0$  приводит к законам коммутации.

В момент коммутации ток в ветви с индуктивностью не изменяется, т. е.

$$i_L(+0) = i_L(-0) = i_L(0).$$

Напряжение на емкости в момент коммутации не изменяется, т. е.

$$u_C(+0) = u_C(-0) = u_C(0).$$

Значения  $u_C(0)$  и  $i_L(0)$  называются независимыми начальными условиями.

Для идеальных элементов  $R$ ,  $C$  ток в момент коммутации может меняться скачком, т. е.

$$i_R(-0) \neq i_R(+0); i_C(-0) \neq i_C(+0).$$

Для идеальных элементов  $R$  и  $L$  в момент коммутации скачком могут меняться напряжения, т. е.

$$u_R(-0) \neq u_R(+0); u_L(-0) \neq u_L(+0).$$

Значения  $i_R(+0)$ ;  $i_C(+0)$ ;  $u_R(+0)$ ;  $u_L(+0)$  называются зависимыми начальными условиями.

В переходном процесса мгновенные значения напряжений и токов не яв-

ляются периодическими функциями времени. Если положительные направления напряжения и тока на элементе одинаковы, то уравнения идеальных элементов имеют вид:

$$u_R(t) = Ri_R(t); u_L(t) = L(di_L/dt); i_C(t) = C(du_C/dt).$$

Переходный процесс в цепи с одним накопителем энергии и источником постоянного напряжения (тока) описывают линейным неоднородным ( $F \neq 0$ ) дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dx(t)}{dt} + ax(t) = bF.$$

В этом уравнение  $x(t) = u_C(t)$  для  $R-C$  цепи,  $x(t) = i_L(t)$  для  $R-L$  цепи.  $F$  – постоянная, зависящая от величин напряжения или тока источников,  $a$  и  $b$  – не зависящие от времени коэффициенты.

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$x(t) = x_{св}(t) + x_{нр}.$$

Свободная составляющая решения  $x_{св}(t)$  определяется как общее решение однородного дифференциального уравнения

$$\frac{dx_{св}(t)}{dt} + ax_{св}(t) = 0.$$

и имеет вид

$$x_{св}(t) = A \cdot e^{pt},$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p = -a$  – корень характеристического уравнения  $p + a = 0$ .

Величина  $\tau = 1/|p|$  имеет размерность времени и называется постоянной времени. За интервал времени  $\Delta t = \tau$  свободная составляющая решения уменьшается в  $e$  раз. Выражение  $x_{св}(t) = A \cdot e^{pt}$  позволяет определить длительность  $T_{mn}$  переходного процесса. Можно принять  $T_{mn}$  от  $4\tau$  до  $5\tau$ .

Величина  $x_{нр}$  является частным решением уравнения

$$\frac{dx_{нр}}{dt} + ax_{нр} = bF.$$

Величина  $x_{нр} = \frac{b}{a} \cdot F$  не зависит от времени и может быть рассчитана в

установившемся режиме после коммутации.

Общее решение приобретает вид

$$x(t) = A \cdot e^{pt} + x_{\text{пр.}}$$

Постоянная интегрирования  $A$  определяется из независимых начальных условий. При  $t = 0$

$$A + x_{\text{пр.}} = x(0) \quad \text{и} \quad A = x(0) - x_{\text{пр.}}$$

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Для наблюдения зависимостей от времени используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ** и **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**. Рекомендуемые значения  $C = 10, 22$  или  $33$  мкФ (для цепи  $R-C$ );  $L = 30, 40$ , или  $50$  мГн (для цепи  $R-L$ ). Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром. Электронный осциллограф позволяет наблюдать периодические процессы. Поэтому в работе исследуется переходный процесс при включении цепи на напряжение в форме знакопеременных импульсов прямоугольной формы (рис. 12.1). Если интервал времени  $0,5T = T_{\text{ин}}$  и принять  $T_{\text{ин}} = 5\tau$ , то частота следования импульсов  $f = 1/T = 1/10\tau$ .

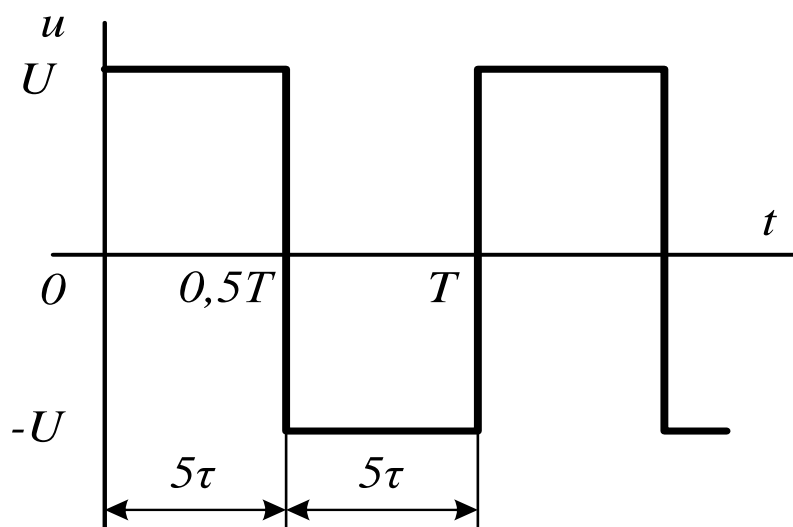


Рис. 12.1

### Переходный процесс в $R-C$ цепи

•Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П протокола измерений. Подключить к выходу модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** цепь  $R-C$ .

•Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

•Занести в протокол заданное преподавателем включение исследуемых цепей на напряжение  $+U$  или  $-U$ .

•Установить заданные преподавателем параметры элементов. Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе наблюдений.

•Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер *Сеть* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель *Форма* включить в положение  $\square$ . Регулятором *Частота* установить на выходе модуля рассчитанную в протоколе частоту  $f$ . Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения напряжения  $U = 5$  В.

•Включить **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Настроить линию нуля. Ручку регулятора вертикальной развертки повернуть по ходу часовой стрелке до упора.

•Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб  $m_U$  на переключателе усиления по напряжению убедиться, что амплитуда входного напряжения  $U_m = 5$  В. В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

•Подключить **Вход 1** осциллографа к конденсатору  $C$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_C(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

### Переходный процесс в $R-L$ цепи

•Подключить к выходу модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** цепь  $R-L$ .

Измерить мультиметром сопротивление  $R_k$  катушки. Резистор  $R_m = 10$  Ом взять из блока **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**.

•Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Установить заданные преподавателем параметры элементов. Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений.

- Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору  $R_{ш}$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_{ш}(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

- Прикрепить осциллограммы сигналов к протоколу измерений.

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

- Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**, тумблер *Сеть* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

### Протокол наблюдений к лабораторной работе № 12

#### «Переходные процессы в R–L и R–C цепи»

Схема для наблюдения переходного процесса показана на рис. 1П.

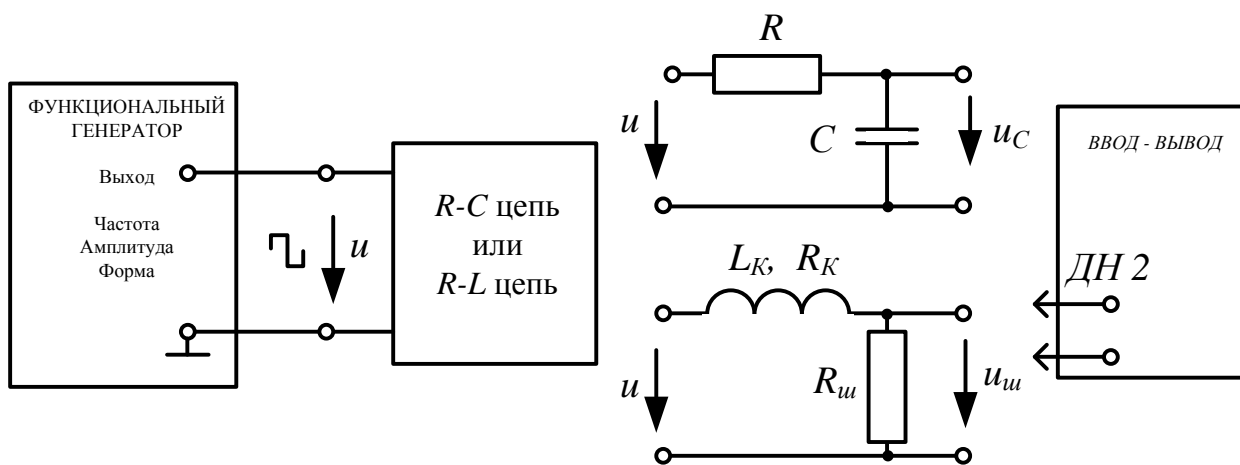


Рис. 1П

#### Предварительные расчеты

##### Переходный процесс в цепи R–C.

Цепь включается на напряжение  $U = \underline{\hspace{2cm}}$  В. Напряжение  $u_C(0) = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

Параметры цепи:  $R = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом,  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ.

Постоянная времени цепи  $\tau_{RC} = RC = \underline{\hspace{2cm}}$  с.

Частота следования знакопеременных импульсов  $f_{RC} = \underline{\quad}$  Гц.

Переходный процесс в  $R-L$  цепи.

Цепь включается на напряжение  $U = \underline{\quad}$  В.

Ток  $i(0) = \underline{\quad}$  А.

Параметры цепи:  $L = \underline{\quad}$  мГн,  $R_K = \underline{\quad}$  Ом,  $R_{ин} = \underline{\quad}$  Ом.

Постоянная времени цепи  $\tau_{RL} = L/(R_K + R_{ин}) = \underline{\quad}$  с.

Частота следования знакопеременных импульсов  $f_{RL} = \underline{\quad}$  Гц.

Осциллограммы напряжений  $u_C(t)$  и  $u_{ин}(t)$ .

Работу выполнили \_\_\_\_\_

Работу проверил \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схемы исследуемых цепей. Перенести данные из протокола.
2. Классическим методом рассчитать переходные процессы.
3. Построить графики рассчитанных величин и сравнить их с зависимостями, полученными экспериментально.

### 4. Контрольные вопросы

1. Что называется переходным режимом?
2. Сформулировать первый закон коммутации.
3. Сформулировать второй закон коммутации.
4. Каков порядок определения постоянной интегрирования?
5. Что называется постоянной времени переходного режима?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

### РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА С НА ЦЕПЬ R–L

*Цель работы:* экспериментальное исследование свободного процесса в цепи с двумя независимыми накопителями энергии электрического и магнитного полей.

#### 1. Общие сведения

Общие сведения о переходных процессах изложены в работе № 12. Свободный процесс в цепи с двумя независимыми накопителями энергии (рис. 13.1) возникает при отключении цепи от источника напряжения.

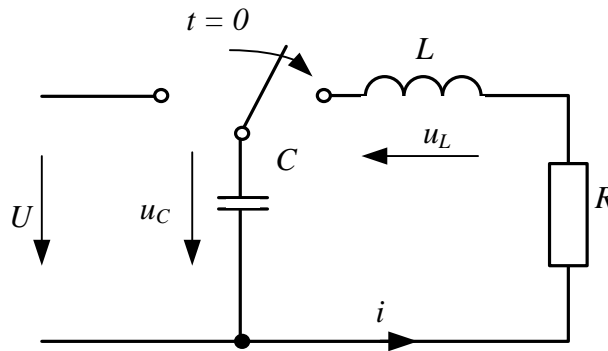


Рис. 13.1

Уравнение Кирхгофа  $u_C + u_L + iR = 0$  и уравнения элементов:

$$i = C \cdot \frac{du_C}{dt}; \quad u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

определяют однородную систему двух линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} \cdot i - \frac{1}{L} \cdot u_C \\ \frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i \end{cases}; \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i \\ u_C \end{pmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{pmatrix} i \\ u_C \end{pmatrix}.$$

Общее решение однородной системы имеет только свободные составляющие  $i = i_{св}(t)$ ,  $u_C = u_{св}(t)$ . Для определения их вида необходимо найти корни характеристического уравнения



$$\det(A - p1) = 0,$$

где 1 – единичная матрица.

В результате получаем

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2},$$

где  $\delta = \frac{R}{2L},$

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  - резонансная частота контура R-L-C.

Характер свободного процесса зависит от вида корней  $p_{1,2}$ , которые могут быть:

1) отрицательными вещественными разными, если  $\delta^2 > \omega_0^2;$

2) комплексными сопряженными с отрицательной вещественной частью, если

$$\delta^2 < \omega_0^2: p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_c,$$

где  $\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  - частота затухающих колебаний;

3) отрицательными вещественными равными, если  $\delta^2 = \omega_0^2.$

В случае разных корней общее решение имеет вид:

$$i_{св}(t) = B_1 \cdot e^{p_1 t} + B_2 \cdot e^{p_2 t},$$

$$u_{св}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}.$$

При  $\delta^2 > \omega_0^2$  процесс называется аperiodическим;  $\delta^2 < \omega_0^2$  – колебательным.

Смена характера переходного процесса происходит при  $R_{кр} = 2p$ , где  $p = L/C$  характеристическое сопротивление контура.

Корни характеристического уравнения позволяют оценить продолжительность переходного процесса. Временем переходного процесса обычно считают промежуток, в течение которого свободная составляющая уменьшается в  $e^3 \dots e^5$  раз. Время аperiodического процесса можно оценить как  $T = 3 / |p_{min}|$ , где  $p_{min}$  – модуль меньшего из корней характеристического уравнения. Время

колебательного переходного процесса  $T \approx 3/(|Re(p_1)|)$ .

Зависимости токов и напряжений показаны на рис. 13.2 для апериодического и на рис. 13.3 для колебательного переходного процесса.

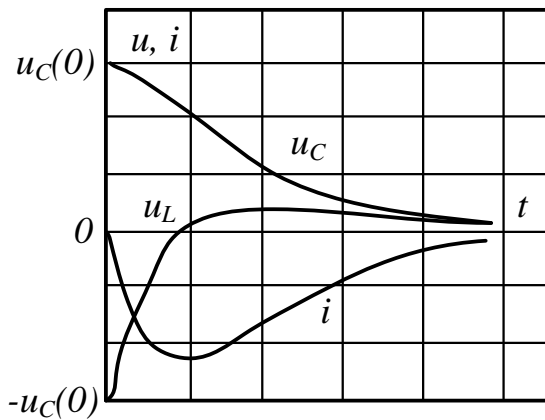


Рис. 13.2

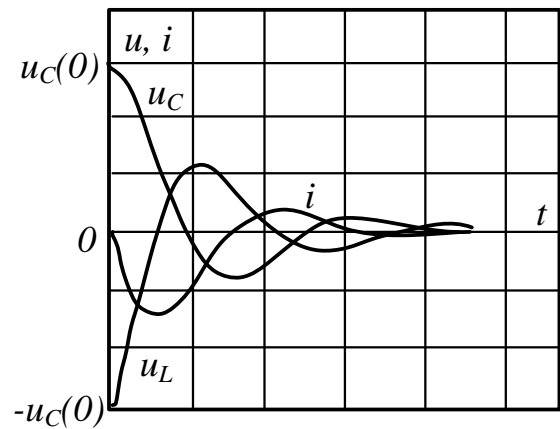


Рис. 13.3

При расчете постоянных интегрирования используют начальные условия. Для расчета двух постоянных  $A_1, A_2$  необходимо два уравнения, в которых присутствуют значение функции и ее производной в момент коммутации:

$$u_C(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} ;$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C(A_1 \cdot p_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot p_2 \cdot e^{p_2 t})$$

При  $t = 0$  получаем

$$u_C(0) = A_1 + A_2,$$

$$i(0) = C(A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2) .$$

Учитывая, что  $u_C(0) = U_m$  (рис. 13.4),  $i(0) = 0$ , получаем

$$A_1 = \frac{U_m \cdot p_2}{p_2 - p_1}; \quad A_2 = -\frac{U_m \cdot p_1}{p_2 - p_1}.$$

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

Процесс разряда конденсатора  $C$  на цепь  $R-L$  в лабораторной работе исследуют в цепи по схеме, приведенной на рис. 13.1.

В лабораторной работе используют модули **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ**

**ГЕНЕРАТОР, НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.** Для наблюдения зависимостей от времени используют **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Пассивные элементы электрической схемы выбирают из блоков **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ** и **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**. Рекомендуемые значения  $L = 20, 30, 40$  или  $50$  мГн;  $C = 10$  мкФ. Активное сопротивление  $R_k$  катушки измеряют мультиметром.

Конденсатор  $C$  в интервале времени от  $0$  до  $T/2$  заряжается через диод VD1 модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** и резистор  $R_I$  до напряжения  $U_m$  с выхода модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. В момент времени  $t = T/2$  напряжение на выходе модуля становится равным  $-U_m$  и диод VD1 закрывается. Емкость  $C$  разряжается на цепь  $R-L$  (рис. 13.4). Далее процесс повторяется, что дает возможность наблюдать временные зависимости на экране осциллографа.

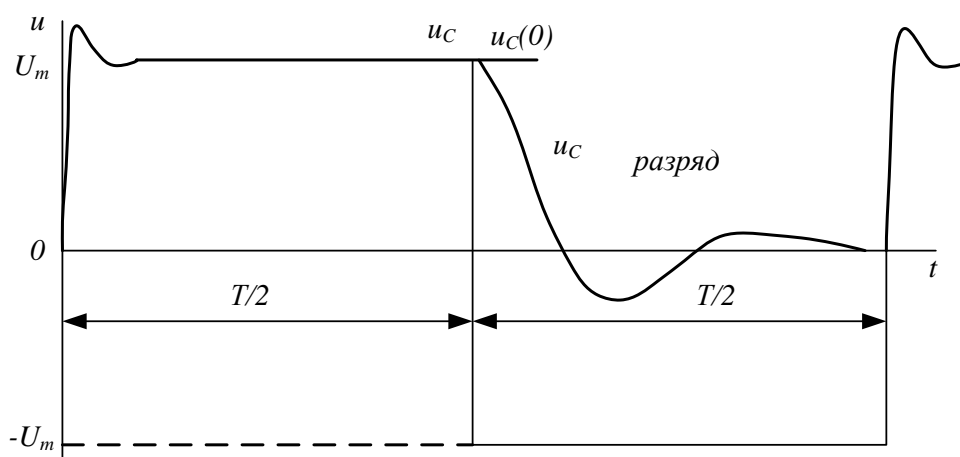


Рис. 13.4

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П протокола измерений. Конденсатор  $C$  и индуктивность  $L$  взять из блоков **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**, резисторы  $R, R_I$  – из блока **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**, диод VD1 – из блока **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Установить в модуле **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** заданные преподавателем величины. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_k$  ка-

тушки. Записать значения в протокол измерений.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер *Сеть* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель *Форма* включить в положение  $\square$ . Регулятором *Частота* установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f=50$  Гц. Регулятором *Амплитуда* установить величину действующего значения напряжения  $U = 5$  В. Значение  $f$  и  $U$  записать в протокол измерений.

- Включить **ОСЦИЛЛОГРАФ**. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки до упора по ходу часовой стрелки.

- Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана. Используя масштаб  $m_U$  на переключателе усиления по напряжению убедиться, что амплитуда входного напряжения  $U_m = 5$  В. В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.

#### **Апериодический разряд емкости $C$ на цепь $R-L$**

- Установить величину сопротивления  $R = 100$  Ом в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**. Рассчитать в протоколе измерений величину сопротивления  $R_{кр}$ . Убедиться, что  $R + R_k > R_{кр}$ .

- Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору  $R$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_R(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

- Подключить **Вход 1** осциллографа к конденсатору  $C$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_C(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .

#### **Колебательный разряд емкости $C$ на цепь $R-L$**

- Установить величину сопротивления  $R = 10$  Ом в блоке **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**. Убедиться, что  $R + R_k < R_{кр}$ .

- Подключить **Вход 1** осциллографа к резистору  $R$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_R(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .
- Подключить **Вход 1** осциллографа к конденсатору  $C$ . Срисовать на кальку с экрана **ОСЦИЛЛОГРАФА** кривую зависимости  $u_C(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$ .
- Выполнить указанные в протоколе измерений расчеты.
- Прикрепить осциллограммы сигналов к протоколу измерений.
- Протокол измерений утвердить у преподавателя.
- Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**, тумблер *Сеть* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ОСЦИЛЛОГРАФ**.

### Протокол измерений к лабораторной работе № 13

#### «Разряд конденсатора $C$ на цепь $R-L$ »

Схема исследуемой цепи представлена на рис. 1П.

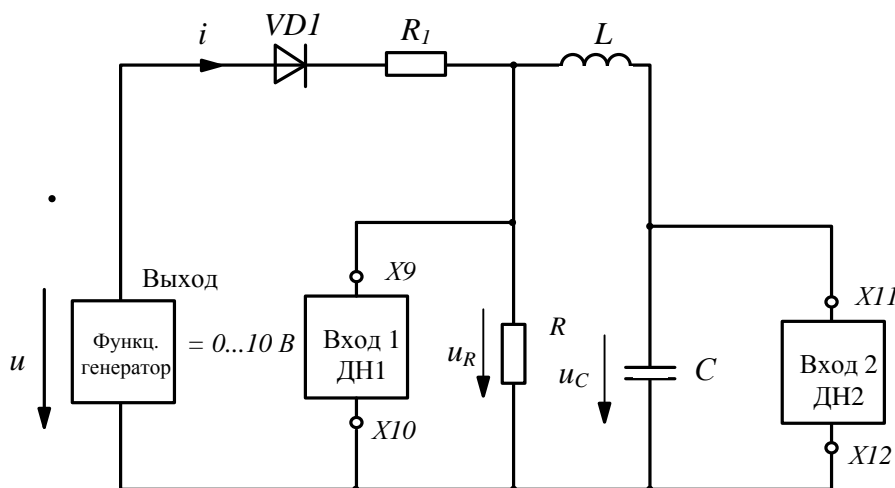


Рис. 1П

Входное напряжение:  $U_m = \underline{\hspace{2cm}}$  В,  $f = 50$  Гц.

Параметры элементов:  $C = \underline{\hspace{2cm}}$  мкФ;  $L = \underline{\hspace{2cm}}$  мГн;  $R_k = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом.

Критическое сопротивление  $R_{кр} = 2L/C = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом

Для процесса разряда конденсатора через катушку индуктивности:

<i>Апериодический разряд</i>	<i>Колебательный разряд</i>
Сопrotивления $R = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом $R + R_k = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом	Сопrotивления $R = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом $R + R_k = \underline{\hspace{1cm}}$ Ом
Расчет корней характеристического уравнения: $\delta = \frac{R + R_k}{2L} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $\omega_c = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $p_1 = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $p_2 = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1}.$	Расчет корней характеристического уравнения: $\delta = \frac{R + R_k}{2L} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $\omega_c = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $p_1 = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1};$ $p_2 = \underline{\hspace{1cm}} c^{-1}.$

Работу выполнили: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схему исследуемой цепи. Перенести данные из протокола.
2. Рассчитать переходный процесс при апериодическом и колебательном разряде конденсатора классическим методом.
3. Построить графики напряжений на конденсаторе и на шунте и сравнить их с зависимостями, полученными экспериментально.

### 4. Контрольные вопросы

1. Что называется резонансной частотой?
2. От чего зависит характер свободного процесса?
3. Какой процесс называется апериодическим?
4. Какой процесс называется колебательным?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ А-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

*Цель работы:* экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника в установившемся режиме синусоидальных токов и напряжений; определение параметров схемы замещения четырехполюсника.

#### 1. Общие сведения

Четырехполюсником называется электрическая цепь, в которой выделены два входных и два выходных зажима (порта). Направления токов и напряжений на входе  $U_1, I_1$  и на выходе  $U_2, I_2$  указаны на рис. 14.1.

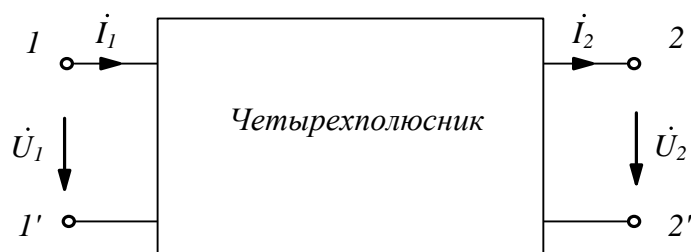


Рис. 14.1

Уравнения пассивного четырехполюсника в форме А имеют вид:

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2.$$

Выполняется равенство  $\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1$ .

Достоинством представления уравнений четырехполюсника в форме А является простота определения его параметров опытным путем. Достаточно провести опыты, в которых измеряемые напряжения и токи относятся к одной паре зажимов. В опытах холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны зажимов 1-1' измеряются действующие значения напряжения, тока и угол сдвига фаз между ними. Комплексные сопротивления рассчитываются по

выражениям:

$$\underline{Z}_{1X} = \frac{U_{1X}}{I_{1X}} \cdot e^{j\varphi_{1X}};$$

$$\underline{Z}_{1K} = \frac{U_{1K}}{I_{1K}} \cdot e^{j\varphi_{1K}}.$$

В этих выражениях индекс 1X относится к величинам опыта холостого хода, а 1К - короткого замыкания.

При обратном включении четырехполюсника (напряжение  $u_1$  на зажимах 2-2') определяются комплексные сопротивления:

$$\underline{Z}_{2X} = \frac{U_{2X}}{I_{2X}} \cdot e^{j\varphi_{2X}};$$

$$\underline{Z}_{2K} = \frac{U_{2K}}{I_{2K}} \cdot e^{j\varphi_{2K}}.$$

Параметры А четырехполюсника находятся по выражениям:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1X}}{\underline{Z}_{2X} - \underline{Z}_{2K}}};$$

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2K};$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1X}};$$

$$\underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1K}}.$$

Пассивный четырехполюсник можно заменить эквивалентной схемой замещения, содержащей три комплексных сопротивления. На рис. 14.2 приведена Т-образная схема замещения.

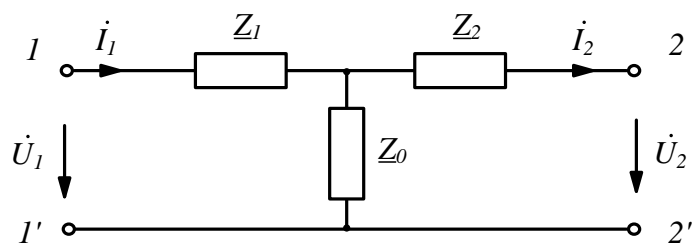


Рис. 14.2



Сопrotивления схемы замещения выражаются через А-параметры четырехполюсника:

$$\underline{Z}_1 = \frac{A - 1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{D - 1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_0 = \frac{1}{\underline{C}}.$$

Схема замещения обычно не реализуется физическими элементами, а используется как расчетная.

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Рекомендуемое значение частоты 100...300 Гц. Измерения выполняются компьютерным измерительным комплексом (смотри п 1.4 введения). Ввод данных в компьютер выполняет блок **ВВОД-ВЫВОД**. **Вход 1** и **Вход 5** при их совместном использовании измеряют угол сдвига фаз  $\varphi$  между мгновенными значениями синусоидальных напряжения  $u$  и тока  $i$ . При емкостном характере цепи в окне  $\varphi$  на экране монитора появляется величина угла 0...-90°. Четырехполюсник собирают из элементов блоков **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** и **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**. Рекомендуемые значения: сопротивления  $R_1 = 47$  или 68 Ом;  $R_2 = 47, 68$  или 100 Ом; индуктивность  $L = 30, 40, 50$  или 60 мГн; конденсатор емкостью  $C = 10$  мкФ. Рекомендуемое сопротивление нагрузки  $R_H = 47, 68$  или 100 Ом.

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П протокола.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Установить заданные преподавателем величины  $R, L, C$  в блоках **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** и **МОДУЛЬ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**.

Запустить информационно-измерительный комплекс *DeltaProfl*. Для этого:

- Включить компьютер, дождаться окончания загрузки *Windows*;
- Запустить программу **DeltaProfl**. Появится окно программы.

- Выбрать работу «Работа №13 - Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника» в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор работы...». На экране появится схема лабораторной работы.

- Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры *Сеть* модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**.

- Настроить генератор на синусоидальное напряжение заданной преподавателем частоты  $f$  и напряжения  $U_1 = 5-7$  В. Записать данные в протокол.

- Выполнить опыты прямого холостого хода и короткого замыкания. Опытные данные занести в табл. 1П протокола измерений.

- Подключить к выходу 2-2' четырехполюсника сопротивление  $R_H = 47, 68$  или 100 Ом. Выполнить измерения напряжения и тока на входе четырехполюсника и напряжения на выходе. Измеренные значения занести в табл. 1П.

- Поменять местами входные 1-1' и выходные 2-2' зажимы. Выполнить опыты обратного холостого хода и короткого замыкания. Измеренные значения занести в табл. 1П.

- Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений.

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

- Выключить тумблеры *Сеть* модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**.

- Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

Окончить работу программы *DeltaProfi*. Для этого:

- Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп» меню «Управление - Стоп» или горячей клавишей F6.

- Закрыть программу.

**Протокол измерений к лабораторной работе № 14**  
**«Экспериментальное определение А-параметров четырехполюсника»**

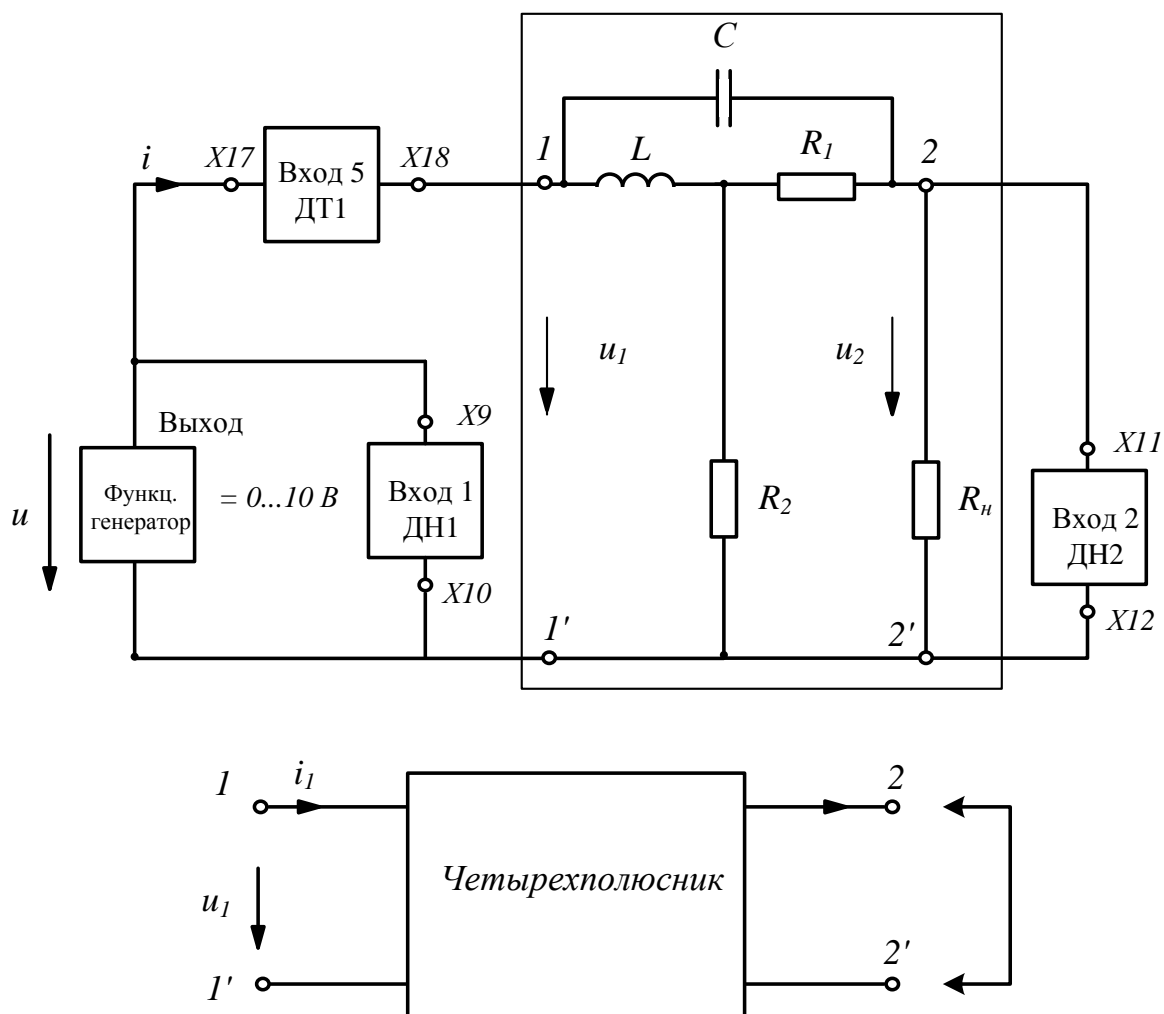


Рис. 1П

Опытные данные при  $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  В и  $f = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц внесены в табл. 1П.

Таблица 1П

Режим	I, мА	$\varphi$ , град.	Примечания	
Холостой ход			Прямое включение	Индексы 1Х
Короткое замыкание				Индексы 1К
Нагрузка				$U_2 = \text{В}$
Холостой ход			Обратное включение	Индексы 2Х
Короткое замыкание				Индексы 2К

Предварительный расчет комплексных сопротивлений:

$$\underline{Z}_{1X} = \frac{U_1}{I_{1X}} \cdot e^{j\varphi_{1X}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{1K} = \frac{U_1}{I_{1K}} \cdot e^{j\varphi_{1K}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$$

$$\underline{Z}_{2X} = \frac{U_2}{I_{2X}} \cdot e^{j\varphi_{2X}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{2K} = \frac{U_2}{I_{2K}} \cdot e^{j\varphi_{2K}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Ом}.$$

Проверка отношений  $\frac{\underline{Z}_{1X}}{\underline{Z}_{1K}} = \frac{\underline{Z}_{2X}}{\underline{Z}_{2K}} \underline{\hspace{2cm}}$ .

Работу выполнил: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схему исследуемой цепи.
2. По экспериментальным данным рассчитать А-параметры четырехполюсника. Выполнить проверку  $\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1$ .
3. Рассчитать параметру Т-образной схемы замещения четырехполюсника.
4. Провести расчет четырехполюсника с нагрузкой. Сравнить с экспериментальными данными.

### 4. Контрольные вопросы

1. Что называется четырехполюсником?
2. В чем различие пассивного и активного четырехполюсников?
3. Как определяются параметры уравнений пассивного четырехполюсника?
4. Какие формы записи уравнений четырехполюсника можно выделить?
5. Что представляет собой схема замещения пассивного четырехполюс-

ника?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

### ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

*Цель работы:* экспериментальное определение амплитудно-частотной (АЧХ), фазочастотной (ФЧХ) и амплитудно-фазовой (АФХ) характеристик четырехполюсника.

#### 1. Общие сведения

Передачными функциями называются отношения изображений по Лапласу выходного сигнала не возбужденного четырехполюсника ( $i_L(0) = 0$  и  $u_C(0) = 0$ ) к изображениям по Лапласу входного сигнала (рис. 15.1).

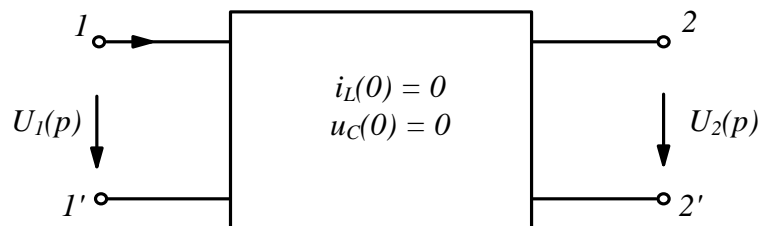


Рис. 15.1

Так, передаточная функция четырехполюсника по напряжению имеет вид

$$K_U(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}.$$

При замене  $p$  на  $j\omega$  получают выражение передаточных функций в комплексной форме

$$K_U(p)/_{p=j\omega} = \underline{K}_U(j\omega) = K_U(\omega) \cdot e^{j\alpha(\omega)} = K_1(\omega) + jK_2(\omega),$$

где  $\underline{K}_U(j\omega)$ - комплексный коэффициент передачи или амплитудно-фазовая характеристика (АФХ);

$K_U(\omega)$ ,  $K_1(\omega)$  и  $K_2(\omega)$  - амплитудно-частотная, вещественная и мнимая частотные характеристики,

$\alpha(\omega)$  - фазо-частотная характеристика четырехполюсника.

Частотные характеристики удобно строить в функции частоты  $f = \omega/2\pi$ :

$$\underline{K}_U(f); K_U(f); K_1(f); jK_2(f).$$

Геометрическое место концов вектора  $\underline{K}_U(f)$  называется годографом амплитудно-фазовой характеристики (рис.15.2).

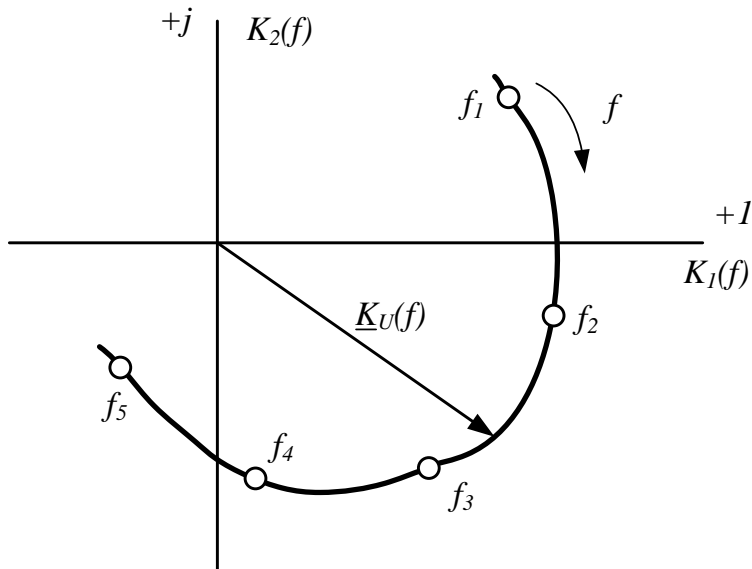


Рис. 15.2

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Электрическую цепь четырехполюсника собирают из пассивных элементов блоков **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ** и **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Рекомендуемые значения параметров элементов четырехполюсника: для  $C = 47$  мкФ,  $L = 30, 40$  или  $50$  мГн; для  $C = 33$  мкФ,  $L = 50, 60$  или  $70$  мГн; для  $C = 22$  мкФ,  $L = 80, 90$  или  $100$  мГн;  $R_1 = 47$  Ом.

Измерения выполняются компьютерным измерительным комплексом (смотри п 1.4 введения). Ввод данных в компьютер выполняет модуль **ВВОД-ВЫВОД**.

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П протокола

измерений. При указанном на рис. 1П способе включения модуля **ВВОД-ВЫВОД** измеряется угол ( $-\alpha$ ).

Запустить информационно-измерительный комплекс **DeltaProfi**. Для этого:

- Включить компьютер, дождаться окончания загрузки *Windows*;
- Запустить программу *DeltaProfi*. Появится окно программы.
- Выбрать работу «Работа №15 - Передаточные функции и частотные характеристики четырехполюсника» в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор работы...». На экране появится схема лабораторной работы.

- Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей *F5*.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Установить заданные преподавателем величины пассивных элементов четырехполюсника. Измерить мультиметром активное сопротивление  $R_K$  катушки. Значения  $L$ ,  $R_K$ ,  $C$  и  $R_1$  записать в протокол измерений.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **Сеть** модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**.

- Переключатель **Форма** установить в положение  $\sim$ . Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения напряжения  $U_1 = 5$  В

- Регулятором **Частота** установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f = 20$  Гц. Выполнить с шагом  $\Delta f = 20$  Гц до частоты  $f = 200$  Гц измерения напряжения  $U_2$  и угла ( $-\alpha$ ) фазочастотной характеристики.

Измеренные значения записать в таблицу 1П, изменив знак показания фазометра.

- Выключить тумблеры **Сеть** модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**.

- Выключить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТА-**



**НИЯ.**

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

Окончить работу программы **DeltaProfi**. Для этого:

- *Остановить программу, нажатием кнопки «Стоп» или командой главного меню «Управление — Стоп» или горячей клавишей F6.*
- *Заккрыть программу.*

### Протокол измерений к лабораторной работе № 15

#### «Передаточные функции и частотные характеристики четырехполюсника»

Схема исследуемой цепи показана на рисунке 1П.

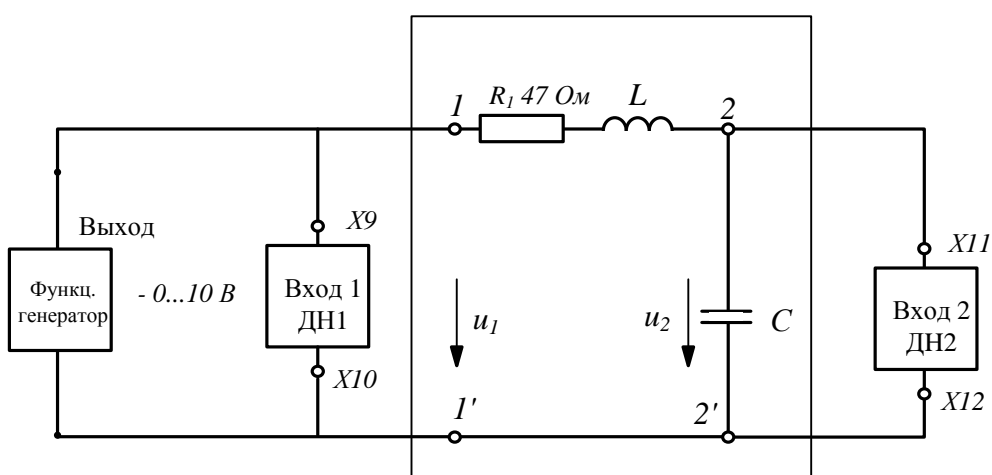


Рис. 1П

Параметры четырехполюсника:  $L = \underline{\hspace{1cm}}$  мГн;  $R_k = \underline{\hspace{1cm}}$  Ом;  $C = \underline{\hspace{1cm}}$  мкФ;  
 $R_1 = 47$  Ом. Напряжение  $U_1 = 5$  В.

Экспериментальные данные представлены в таблице 1П.

Таблица 1П

$f$ , Гц										
$U_2$ , В										
$\alpha$ , град										

Работу выполнил: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схему исследуемой цепи.

2. По данным таблицы 1П рассчитать: амплитудно-частотную  $K_U(f)$ , вещественную  $K_1(f)$ , мнимую  $K_2(f)$  частотные характеристики и фазо-частотную  $\alpha(f)$  характеристику четырехполюсника. Результаты расчета представить в таблице.

3. Построить графики частотных характеристик и определить полосу пропускания по линии  $K_U(f) = 1/\sqrt{2} = 0,707$ .

### 4. Контрольные вопросы

1. Что называется передаточной функцией?

2. Как строится передаточная функция?

3. Что относится к частотным характеристикам четырехполюсника?

4. Какая зависимость называется амплитудно-частотной характеристикой?

5. Дайте понятие и принцип построения годографа амплитудно-частотной характеристики.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

### ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Цель работы:* экспериментальное исследование распределения напряжения и тока вдоль однородной линии при различных режимах работы.

#### 1. Общие сведения

При передаче энергии или сигнала на расстояния, соизмеримые с длиной волны  $\lambda$ , необходимо учитывать, что электрическая емкость, индуктивность и сопротивление распределены по всей длине цепи. В связи с этим используют погонные параметры цепи: индуктивность  $L_0$  Гн/км; емкость  $C_0$  Ф/км; активное сопротивление  $R_0$  Ом/км; активная проводимость утечки  $G_0$  (1/Ом)/км. Линии, в которых погонные параметры сохраняются неизменными по длине линии, называются однородными. На рисунке 16.1 показан участок линии.

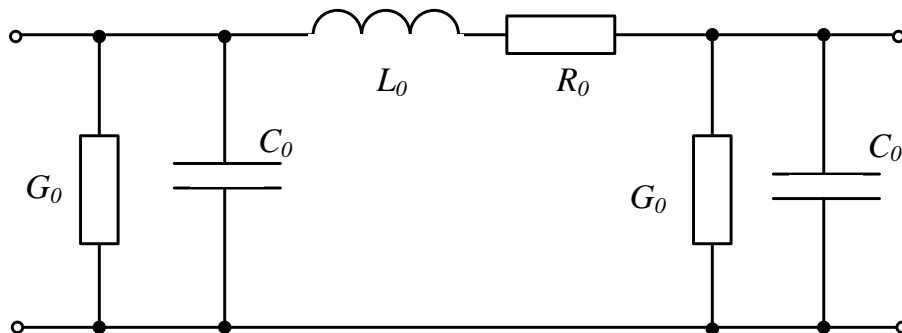


Рис. 16.1

Задача изучения электромагнитных процессов в цепях с распределенными параметрами упрощается, если считать линию идеальной, т. е. не имеющей потерь ( $R_0 = G_0 = 0$ ).

Напряжения и токи в длинной линии без потерь при установившемся синусоидальном режиме работы связаны уравнения:

$$\dot{U}(x') = \dot{U}_2 \cos \beta x' + jZ_C \cdot \dot{I}_2 \sin \beta x';$$

$$\dot{i}(x') = j \frac{\dot{U}_2}{Z_C} \cdot \sin \beta x' + \dot{I}_2 \cos \beta x',$$

где  $\dot{U}_2, \dot{I}_2$  - комплексные действующие значения напряжения, тока в конце линии;

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 \cdot C_0} = 2\pi f - \text{коэффициент фазы в рад/км,}$$

$$Z_C = \sqrt{L_0/C_0} - \text{волновое сопротивление;}$$

$\dot{U}(x'), \dot{i}(x')$  - комплексные действующие значения напряжения, тока на расстоянии  $x'$  от конца линии (рис. 16.2).

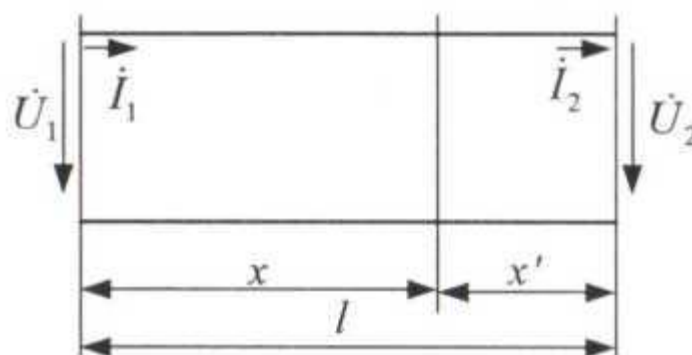


Рис. 16.2

Распределения действующих значений напряжения  $U(x')$  в линии зависит от нагрузки линии:

- при холостом ходе  $U_{\text{хх}}(x') = U_2 |\cos(\beta x')|$ ;
- при коротком замыкании  $U_{\text{кз}}(x') = I_2 Z_C |\sin(\beta x')|$ ;
- при согласованной нагрузке  $R = Z_C$ :  $U_{\text{нр}}(x') = U_2$ .

Графики  $U(x')$  в режимах холостого хода, короткого замыкания и согласованной нагрузки показаны на рисунке 16.3.

При холостом ходе и коротком замыкании в линии возникает режим стоячих волн. Точки, в которых напряжение равно нулю, называют узлами. Точки, в которых напряжение максимально, называют пучностями.

Режим работы линии, при котором сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии, называется натуральным.

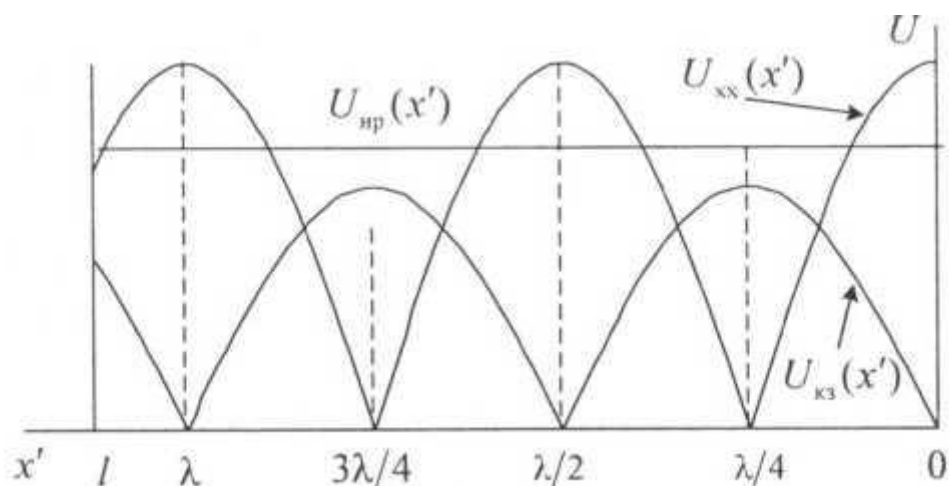


Рис. 16.3

Полагая в уравнениях линии  $x' = l$ , получаем

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \beta l + j Z_C \cdot \dot{I}_2 \sin \beta l,$$

$$\dot{I}_1 = j \frac{\dot{U}_2}{Z_C} \sin \beta l + \dot{I}_2 \cos \beta l.$$

Эти уравнения представляют собой уравнения симметричного четырехполюсника в **A**-параметрах:

$$A = D = \cos \beta l,$$

$$\underline{B} = j Z_C \sin \beta l,$$

$$\underline{C} = j \frac{1}{Z_C} \sin \beta l.$$

Разделив линию на отрезки равной длины и заменив каждый отрезок симметричным четырехполюсником, можно создать модель линии.

В лабораторной работе десятью П-образными четырехполюсниками (звеньями) моделируется коаксиальная кабельная линия длиной  $l = 10$  км. Погонные параметры кабельной линии:  $L_0 = 0,25$  мГн/км,  $C_0 = 0,09$  мкФ/км. Потери в кабеле можно пренебречь  $R_0 = G_0 = 0$ .

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником синусоидального напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Измерительные приборы

расположены в блоке МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ. Модель линии представлена модулем ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.

- Собрать электрическую цепь по схеме на рисунке 1П протокола измерений.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Записать заданную преподавателем частоту  $f$  в протокол измерений. Рекомендуемые значения частоты  $f$  от 12 до 16 кГц.
- Выполнить предварительные расчеты, указанные в протоколе измерений.
- Установить регулятор **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в положение 0. Включить тумблер *Сеть*. Переключатель **Форма** установить в положение  $\sim$ . Регулятором **Частота** установить на выходе модуля заданную частоту  $f$ .
- Подключить вольтметр PV блока МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ к клеммам  $U_{ВХ}$  модуля ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. Регулятором **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** установить напряжение  $U_{ВХ} = 7$  В.
- **Холостой ход.** Поочередно подключая вольтметр PV блока МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ к клеммам 0 км, 1 км, ... 10 км, измерить распределение напряжения  $U_{ХХ}(x')$  вдоль модели линии в режиме холостого хода. Измеренные значения занести в таблицу 1П протокола измерений. Указанный порядок применять в других режимах.
- **Короткое замыкание.** Закоротить клеммы  $Z_c$ . Измерить распределение напряжения  $U_{кз}(x')$  вдоль модели линии в режиме короткого замыкания и занести значения в таблицу 1П. Измерить и записать в протокол входное напряжение источника  $U_{вх}$ .
- **Натуральный режим.** Подключить к клеммам  $Z_c$  волновое сопротивление линии. Для этого рекомендуется из блока МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ два резистора по 100 Ом соединить параллельно. Измерить распределение напря-

жения  $U_{\text{нр}}(x')$  вдоль модели линии в режиме близком к натуральному. Измеренные значения занести в таблицу 1П.

- Разомкнуть клеммы  $Z_C$  и подключить к ним вольтметр PV блока МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ. Установить регулятор Амплитуда модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в положение 0.

- Регулятором **Частота**, установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f_{\lambda/4}$ . Регулятором **Амплитуда** модуля установить на клеммах **Zc** напряжение  $U_2 = 5 \dots 7$  В.

- Подключить вольтметр PV блока МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ к клемме  $U_1$  (клемма 10 км) модуля ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. Убедиться, что напряжение  $U_1 \cong 0$ .

- Измерить распределение напряжения  $U_{\lambda/4}(x')$  вдоль модели линии в режиме холостого хода четверть волновой линии. Измеренные значения занести в таблицу 1П.

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

- Выключить тумблер *Сеть* модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

## Протокол измерений к лабораторной работе № 16

### «Цепь с распределенными параметрами»

Электрическая схема цепи представлена на рисунке 1П.

Частота  $f = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц. Длина линии  $l = 10$  км.

Погонные параметры линии  $L_0 = 0,25$  мГн/км,  $C_0 = 0,09$  мкФ/км.

Волновое сопротивление  $Z_C = \sqrt{L_0/C_0} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом.

Коэффициент фазы  $\beta = 2\pi\sqrt{L_0 \cdot C_0} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$  рад/км.

Длина волны  $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$  км.

Четверть волновая линия:  $\lambda = 4l = 40$  км;  $\beta_{\lambda/4} = 2\pi/4l = \text{рад/км}$ ;

$$f_{\lambda/4} = \frac{\beta_{\lambda/4}}{2\pi \cdot \sqrt{L_0/C_0}} = \text{_____} = \text{_____} \text{ Гц.}$$

Входное напряжение в опыте короткого замыкания:  $U_{ВХ} = \text{___} \text{ В.}$

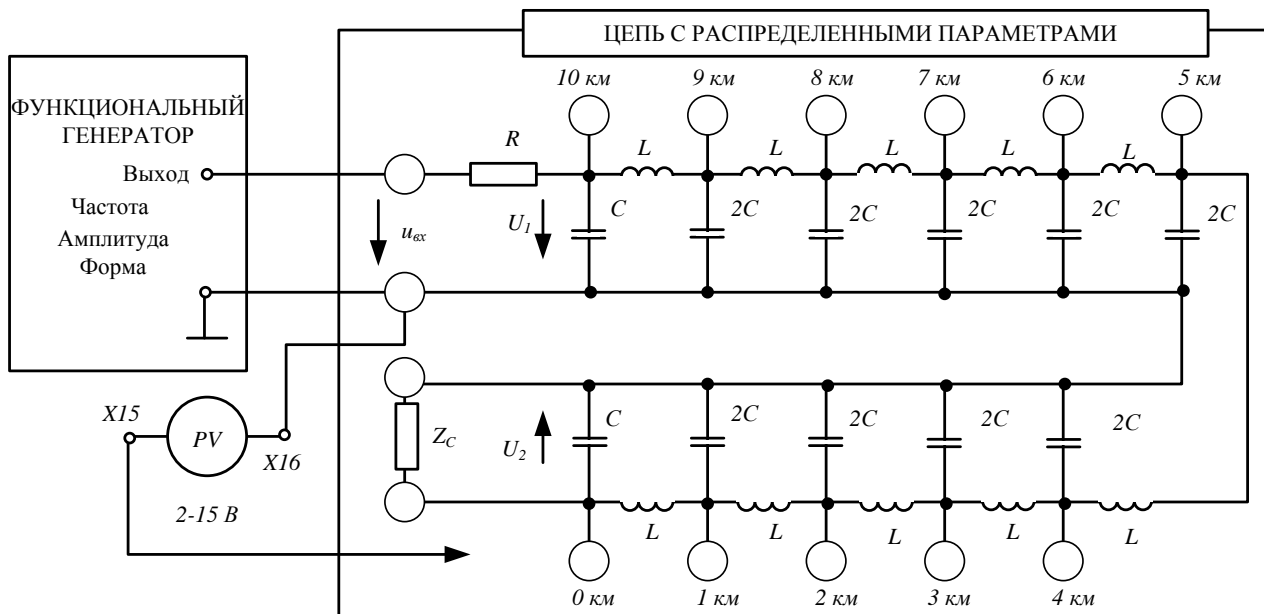


Рис. 1П

Экспериментальные данные представлены в таблице 1П.

Таблица 1П

$x', \text{ км}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{xx}(x')$											
$U_{кз}(x')$											
$U_{нр}(x')$											
$U_{\lambda/4}(x')$											

Работу выполнил: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схему электрической цепи. Перенести данные из протоко-



ла.

2. Рассчитать зависимости действующих значений напряжения в линии от координаты  $x'$  для каждого режима.

3. Построить графики расчетных функций напряжения. Сравнить их с данными, полученными экспериментально.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Какие линии называются однородными?

2. Какими параметрами описываются линии?

3. Какими зависимостями описывается распределение параметров вдоль линии?

4. Как рассчитываются зависимости действующих значений напряжения в линии от координаты  $x'$  для каждого режима?

5. Что представляет собой коэффициент фазы?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

### ЛИНИЯ КАК УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*Цель работы:* исследование передачи сигналов по длинной линии.

#### 1. Общие сведения

Частотный спектр передаваемых по линии сигналов является ограниченным. Поэтому периодический сигнал, например, напряжение на входе линии, можно представить гармоническим рядом, содержащим ограниченное число гармоник

$$u(t) = \sum_{k=1}^n U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_{\alpha k}).$$

Волновое сопротивление линии

$$\underline{Z}_C(k\omega) = \sqrt{\frac{R_0 + jk\omega L_0}{C_0 + jk\omega C_0}} = Z_C(k\omega) \cdot e^{j\theta(k\omega)}$$

и коэффициент распространения  $\underline{\gamma}$  линии

$$\underline{\gamma}(k\omega) = \sqrt{(R_0 + jk\omega L_0) \cdot (G_0 + jk\omega C_0)} = \alpha(k\omega) + j\beta(k\omega)$$

зависят от частоты. Величина вносимого линией затухания  $\alpha(k\omega) \cdot l$  и фазовая скорость  $\underline{v}_\phi(k\omega) = k\omega/\beta(k\omega)$  зависят от номера гармоники  $k$ . Условия распространения гармоник напряжения  $u(t)$  по линии оказываются различными. Таким образом, формы входного и выходного сигналов также будут различными.

Линия, в которой при прохождении сигнала амплитуды гармонических составляющих затухают на частотах  $k\omega$  одинаковым образом, а начальные фазы  $\psi_{uk}$  не зависят от частоты, не искажает форму передаваемого сигнала. Если при этом линия работает в режиме *согласованной* нагрузки, то она называется *неискажающей*. При прохождении сигнала по такой линии формы сигнала на входе и выходе линии *подобны*.

Для передачи сигнала без искажения необходимо выполнение трех условий:

- коэффициент амплитуды  $\alpha$  не зависит от частоты;
- фазовая скорость  $v_\phi$  не зависит от частоты;
- характеристическое сопротивление  $Z_C$  не зависит от частоты.

Указанные условия выполняются, если  $R_0/L_0 = G_0/C_0$ . В частности, условия выполняются для линии с  $R_0 = 0$  и  $G_0 = 0$ , которую называют линией без потерь. Тогда

$$\alpha = 0,$$

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}},$$

$$Z_C = \sqrt{L_0 \cdot C_0}.$$

В установившемся режиме линию без потерь длиной  $l$  можно рассматривать как симметричный четырехполюсник с  $A$ -параметрами:

$$A = D = \cos\beta l,$$

$$\underline{B} = jZ_C \sin\beta l,$$

$$\underline{C} = j \frac{1}{Z_C} \sin\beta l.$$

Комплексный коэффициент передачи по напряжению при активной нагрузке  $R$  в конце линии:

$$\underline{K}_U(\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\cos\beta l + j \frac{Z_C}{R} \sin\beta l} = \frac{1}{\cos(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l) + j \frac{Z_C}{R} \sin(\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l)}.$$

При согласованной нагрузке  $R = Z_C$  коэффициент передачи

$$\underline{K}_U(\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\cos\beta l + j \sin\beta l} = \frac{1}{\exp j\beta l} = \exp(-j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l).$$

Амплитудно-частотная характеристика  $K_U(\omega) = 1$ , а фазо-частотная характеристика  $\alpha(\omega) = -\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0} \cdot l$  является линейной функцией частоты. В этих условиях сигнал передается без искажений.

В режиме с нагрузкой  $R \neq Z_C$  амплитудно-частотная характеристика зависит от частоты, фазо-частотная характеристика не является линейной функцией частоты. Это приводит к искажению выходного сигнала.

В лабораторной работе на вход линии подается напряжение в форме знакопеременных импульсов с амплитудой  $U_m$ . Разложение этого напряжения в ряд Фурье имеет вид

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \cdot \left( \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right).$$

Умножая комплексные амплитуды  $\dot{U}_{m(k)} = 4U_m/(k\pi)$  на комплексные коэффициенты передачи, вычисленные для гармоник сигнала  $\underline{K}_U(k\omega)$ , получим комплексные амплитуды выходного сигнала  $\dot{U}_{2m(k)} = \dot{U}_{1m(k)} \cdot \underline{K}_U(k\omega)$ . По комплексным амплитудам восстанавливаем гармоники выходного сигнала  $u_{2(k)} = I_m(\dot{U}_{2m(k)})$ .

В лабораторной работе расчет выполняется для первой, третьей и пятой гармоник входного сигнала. Выходной сигнал по принципу наложения получается в виде

$$u_2(t) = u_{2(1)}(t) + u_{2(3)}(t) + u_{2(5)}(t).$$

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе источником напряжения является модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Для наблюдения зависимостей от времени используют **осциллограф**. Измерительные приборы расположены в блоке **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** переменного тока. Электрическая цепь представлена модулем **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**. Погонные параметры:  $L_0 = 0,25$  мГн/км,  $C_0 = 0,09$  мкФ/км,  $R_0 = G_0 = 0$ . Нагрузку линии собирают из пассивных элементов блоков **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**.

- Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 1П протокола.
- Рассчитать сопротивление согласованной нагрузки.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Подключить вольтметр **PV** блока **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** к клемме **10 км** модуля **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**.

Установить регулятор **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** положение 0. Включить тумблер **Сеть**. Переключатель **Форма** установить в положение  $\sim$ . Регулятором **Частота** установить на выходе модуля частоту  $f_H = 500$  Гц. Регулятором **Амплитуда** установить напряжение  $U_I = 5$  В.

- Подключить к клеммам  $Z_C$  модуля **ЦЕПЬ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ** волновое сопротивление линии. Для этого рекомендуется соединить параллельно два резистора по 100 Ом из блока **МОДУЛЬ РЕЗИСТОРОВ**.

- Выполнить измерения входного и выходного напряжений с шагом  $\Delta f = 500$  Гц до частоты  $f_g = 2500$  Гц. Измеренные значения записать в таблицу 1П.

- Повторить измерения, подключив к клеммам  $Z_C$  сопротивление 10 Ом.

#### **Наблюдение прохождения сигнала по линии**

- Регулятором **Частота** установить на выходе модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** частоту  $f = 500$  Гц. Переключатель **Форма** установить в положение  $\square$ . Регулятором **Амплитуда** установить напряжение  $U_{Im} = 5$  В.

- Включить **осциллограф**. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки по часовой стрелке до упора.

- Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Настроить переключатель усиления по напряжению. *В остальных опытах использовать указанный порядок настройки осциллографа.*

- Подключить к клеммам  $Z_C$  волновое сопротивление линии. Подключить **Вход 1** осциллографа к выходу линии. Срисовать на кальку с экрана **осциллографа** кривую зависимости  $u_2(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$  усиления по напряжению.

- Повторить измерения, подключив к клеммам  $Z_C$  сопротивление 10 Ом.

- Прикрепить осциллограммы к протоколу измерений. Протокол измере-

ний утвердить у преподавателя.

· Выключить тумблер **Сеть** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

**Протокол измерений к лабораторной работе № 17  
«Линия как устройство для передачи информации»**

Схема электрической цепи представлена на рисунке 1П.

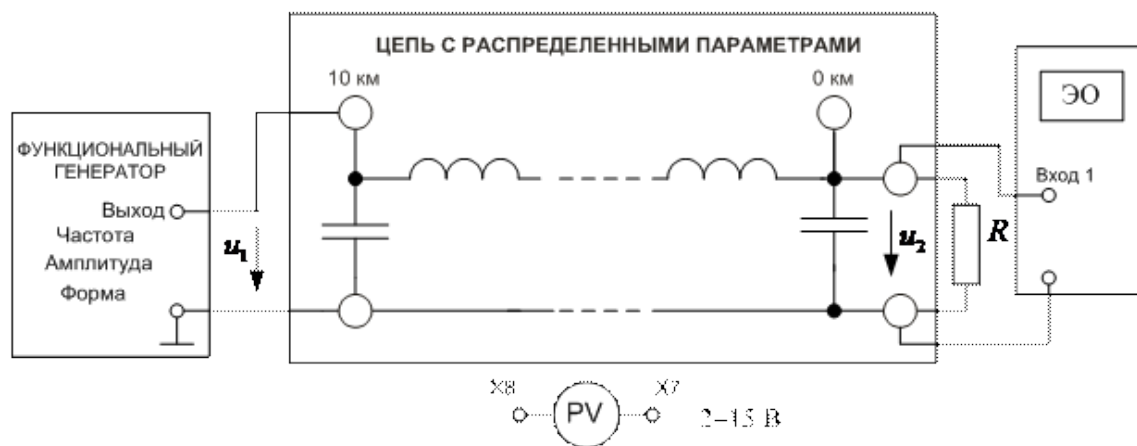


Рис. 1П

Длина линии  $l = 10$  км.

Погонные параметры линии  $L_0 = 0,25$  мГн/км,  $C_0 = 0,09$  мкФ/км.

Волновое сопротивление  $Z_C = \sqrt{L_0/C_0} = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом.

Экспериментальная АЧХ линии представлена в таблице 1П.

Таблица 1П

$f$ , Гц	500	1000	1500	2000	2500
$R = 50$ Ом					
$U_1$ , В					
$U_2$ , В					
$K_U = U_2/U_1$					
$R = 10$ Ом					
$U_1$ , В					
$U_2$ , В					
$K_U = U_2/U_1$					



Волновое сопротивление  $Z_C = \sqrt{L_0/C_0} = \underline{\hspace{2cm}}$  Ом.

Коэффициент фазы  $\beta(f) = 2\pi f \sqrt{L_0 \cdot C_0} = \underline{\hspace{2cm}}$  рад/км.

### Частотная характеристика

Длинная линия может быть заменена четырехполюсником с А-параметрами:

$$A(f) = \cos(\beta(f)l) = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$B(f) = jZ_C \sin(\beta(f)l) = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом.}$$

Комплексная передаточная функция по напряжению для четырехполюсника:

$$\underline{K}_U(f) = \frac{1}{A(f) + B(f)/R} = K(f) \cdot e^{j\alpha(f)};$$

$$\underline{K}_U(500) = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$\underline{K}_U(1000) = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$\underline{K}_U(1500) = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$\underline{K}_U(2000) = \underline{\hspace{2cm}};$$

$$\underline{K}_U(2500) = \underline{\hspace{2cm}}.$$

АЧХ и ФЧХ четырехполюсника представлены в таблице 1.

Таблица 1

$f$ , Гц	500	1000	1500	2000	2500
$R = 50 \text{ Ом}$					
Расчет $\alpha_U$ , град					
Расчет $K_U$					
Эксперимент $K_U$					
$R = 10 \text{ Ом}$					
Расчет $\alpha_U$ , град					
Расчет $K_U$					
Эксперимент $K_U$					

### Выходное напряжение

Входное напряжение  $u_1(t)$  в форме знакопеременных импульсов прямо-



угольной формы частотой  $f = 500$  Гц и амплитудой  $U_m = 5$  В представлено усеченным рядом Фурье. Комплексные амплитуды гармоник:

$$\dot{U}_{1m}^{(1)} = \frac{4U_m}{\pi} = \text{_____ В};$$

$$\dot{U}_{1m}^{(3)} = \frac{4U_m}{3\pi} = \text{_____ В};$$

$$\dot{U}_{1m}^{(5)} = \frac{4U_m}{5\pi} = \text{_____ В}.$$

Расчет функции выходного напряжения проведен в таблице 2.

Таблица 2

Частота $f$ , Гц	АФХ 4-полюсника $\underline{K}^{(k)} = K^{(k)} \cdot e^{j\alpha^{(k)}}$	Комплексная амплитуда выходного сигнала $\dot{U}_{2m}^{(k)} = \dot{U}_{1m}^{(k)} \cdot \underline{K}^{(k)}$ , В	Мгновенное значение $u_2^{(k)}(t)$ , В
$R = 50$ Ом			
500			
1500			
2500			
$R = 10$ Ом			
500			
1500			
2500			
Мгновенное значение $u_2(t) = u_2^{(1)}(t) + u_2^{(3)}(t) + u_2^{(5)}(t)$			
Для $R = 50$ Ом: $u_2(t) =$			
Для $R = 10$ Ом: $u_2(t) =$			

4. Результаты расчета  $u_2(t)$  с шагом  $\Delta t = 0,2$  мс представлены в таблице 3.

Таблица 3

$t$ , мс	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$u_{2 R=50}$											
$u_{2 R=10}$											

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Как может быть представлен передаваемый периодический сигнал?
2. Что представляет собой комплексная передаточная функция по напряжению для четырехполюсника?
3. Какие элементы включает в себя схема замещения линии для передачи информации?
4. Что при передаче по линии приводит к искажению выходного сигнала?
5. Дайте понятие амплитудно-частотной характеристики.
6. Дайте понятие фазо-частотной характеристики.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18

### НЕЛИНЕЙНАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Цель работы:* экспериментальное получение характеристик нелинейных резистивных элементов, расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

#### 1. Общие сведения

Нелинейным называется резистивный элемент электрической цепи, сопротивление которого  $R$  зависит от напряжения и тока. Нелинейной является электрическая цепь, в которой есть хотя бы один нелинейный элемент.

Зависимость напряжения от тока в резисторе называется его вольт-амперной характеристикой (ВАХ). ВАХ элемента зависит от условий, в которых проводился эксперимент. Если измерения проводились при постоянных токе и напряжении, то характеристика нелинейного элемента называется статической.

Для получения статических характеристик нелинейных элементов необходимо измерить ряд значений постоянного напряжения и постоянного тока в цепи со схемой замещения по рисунку 17.1.

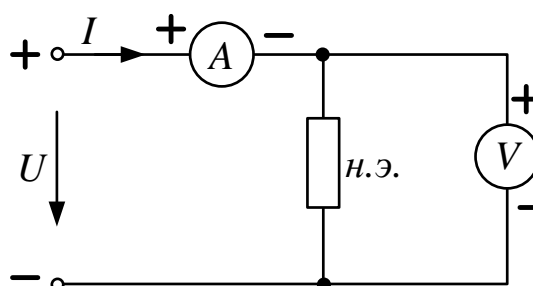


Рис. 18.1

Характеристики нелинейных элементов  $U(I)$  или  $I(U)$  определяют экспериментально и задают в виде таблиц или графиков, что предопределяет широкое использование графических (графоаналитических) методов расчета.

В лабораторной работе исследуется цепь со схемой замещения рисунка

18.2. Уравнения Кирхгофа имеют вид:

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

$$U_1(I_1) + U_{23}(I_1) = U(I_1);$$

$$U_2(I_2) = U_3(I_3) = U_{23}(I_1).$$

Уравнения Кирхгофа решают графически. Участки с токами  $I_2$  и  $I_3$  соединены параллельно. Характеристика  $U_{23}(I_1)$  при графическом методе решения получается в результате суммирования характеристик н.э.2 и резистивного  $R$  при одинаковых значениях напряжения. Участки с напряжениями  $U_1$  и  $U_{23}$  соединены последовательно. Характеристика  $U(I_1)$  - сумма характеристик н.э.1 и  $U_{23}(I_1)$  при одинаковых значениях тока.

## 2. Содержание работы и порядок выполнения работы

В лабораторной работе используется источник напряжения  $U = 0 \dots 12$  В из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** с регулируемым по величине напряжением. Нелинейные элементы электрической цепи выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

- Собрать цепь по схеме рисунка 1П протокола измерений.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

Запустить информационно-измерительный комплекс *DeltaProfi*. Для этого:

- *Включить компьютер, дождаться окончания загрузки Windows.*
- Запустить программу *DeltaProfi*. Появится окно программы.
- Выбрать работу «Работа №19 Нелинейная цепь постоянного тока Характеристика нелинейного элемента» в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор работы...» На экране появится схема лабораторной работы.

· Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» - или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблеры **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ40...12 В** и **Сеть**

модуля **ВВОД-ВЫВОД**. Установить напряжение  $U = 0$ .

· Плавно изменяя регулятором напряжения ток  $I_1$  от нуля до 80 мА с шагом 10 мА экспериментально получить статические характеристики нелинейных элементов н.э.1, н.э.2. Для резистора  $R$  измерить напряжение  $U_2$  при токе 50 мА. Все измеренные величины занести в таблицу 1П протокола измерений.

· Остановить программу, нажатием кнопки «*Стоп*».

· Собрать электрическую цепь по схеме рисунка 2П.

· Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

· Выбрать работу «*Работа №17 - Нелинейная цепь постоянного тока - Нелинейная цепь постоянного тока*» в меню «*Работы*» или нажав кнопку «*Выбор работы...*». На экране появится схема лабораторной работы.

· Установить на входе цепи напряжение  $U = 10 - 12$  В. Измерить токи ветвей, напряжения  $U_1$  и  $U_{23}$ . Результаты измерений занести в таблицу 2П.

· Утвердить протокол измерений у преподавателя.

· Выключить тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4**, **Сеть** модуля **ВВОД-ВЫВОД** и выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

Окончить работу программы **DeltaProfi**. Для этого:

· Остановить программу, нажатием кнопки «*Стоп*» или командой главного меню «*Управление — Стоп*» или горячей клавишей  $F6$ .

· Закрыть программу.

## Протокол измерений к лабораторной работе № 18

### «Нелинейная цепь постоянного тока»

Таблица 1П

$I, \text{ мА}$	10	20	30	40	50	60	70	80
$U_{нэ1}, \text{ В}$								
$U_{нэ2}, \text{ В}$								
$U_R, \text{ В}$								

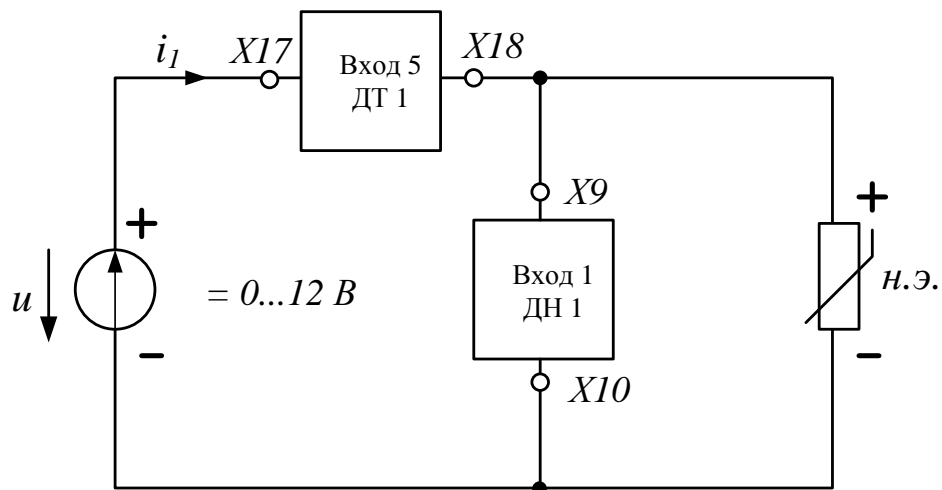


Рис. 1П

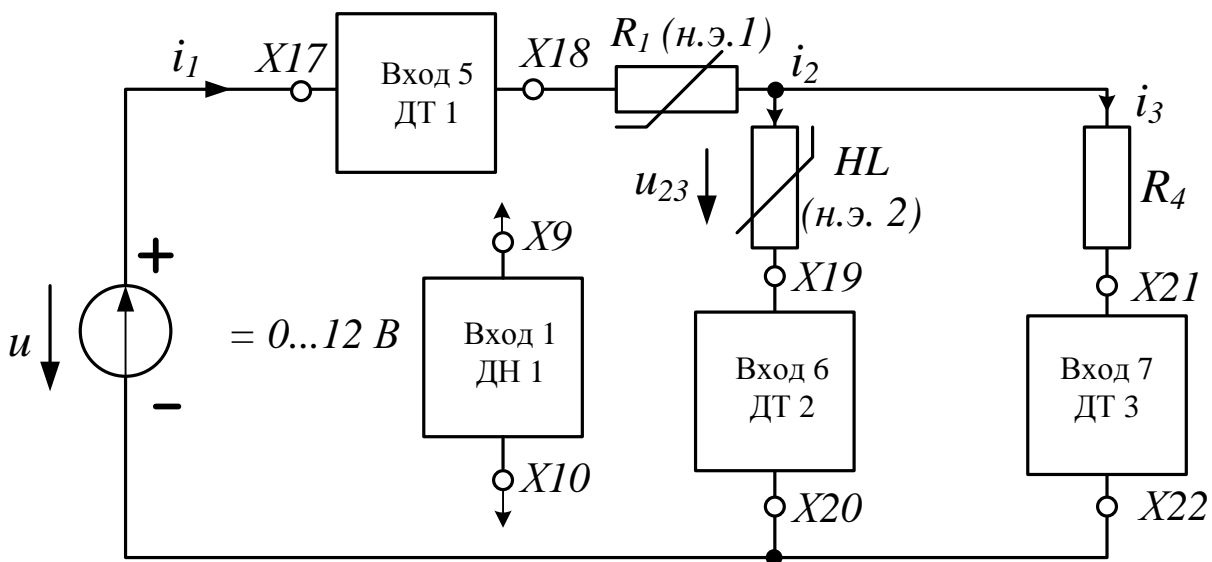


Рис. 3П

Таблица 2П

$U, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$

Работу выполнил: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схемы электрических цепей. Перенести данные из протокола.

2. Построить экспериментальные ВАХ элементов.
3. Выполнить графический расчет токов и напряжений. Сравнить результаты графического расчета с экспериментальными данными.

#### **4. Контрольные вопросы**

1. Что называется вольт-амперной характеристикой элемента?
2. Дайте понятие статической ВАХ нелинейного элемента.
3. Какие методы и почему применяются для расчета нелинейных цепей?
4. Каков порядок решения уравнений Кирхгофа для нелинейных цепей?
5. Поясните порядок расчета нелинейных цепей.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №19

### НЕЛИНЕЙНАЯ РЕЗИСТИВНАЯ ЦЕПЬ

*Цель работы:* исследование электрической цепи с нелинейным безынерционным резистивным элементом.

#### 1. Общие сведения

Параметры безынерционных нелинейных элементов меняются вместе с изменением мгновенных значений токов и напряжений.

В качестве вольтамперной характеристики  $u(i)$  безынерционного нелинейного элемента можно принять его статическую характеристику (рис. 19.1). Из рисунка следует, что при синусоидальном напряжении  $u(t)$  ток  $i(t)$  в его цепи будет несинусоидальный. Характеристика  $u(i)$  обычно представляется в виде таблицы или графика. При аналитическом расчете используют аппроксимацию. Аппроксимирующую функцию выбирают так, чтобы она была близка исходной зависимости, а расчет цепи был прост. Обоим условиям удовлетворяет кусочно-линейная функция.

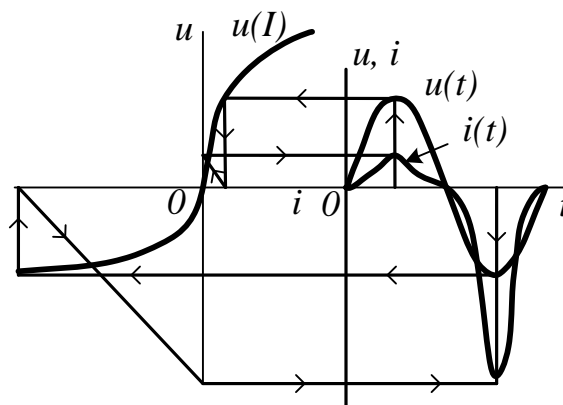


Рис. 19.1

Расчет цепи производится отдельно для каждого линейного участка аппроксимации. На рисунке 19.2 показана аппроксимация ВАХ тремя участками. Решения, полученные для каждого участка, стыкуют, исходя из условия непре-



рывности (моменты времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$ , на рисунке 19. 2).

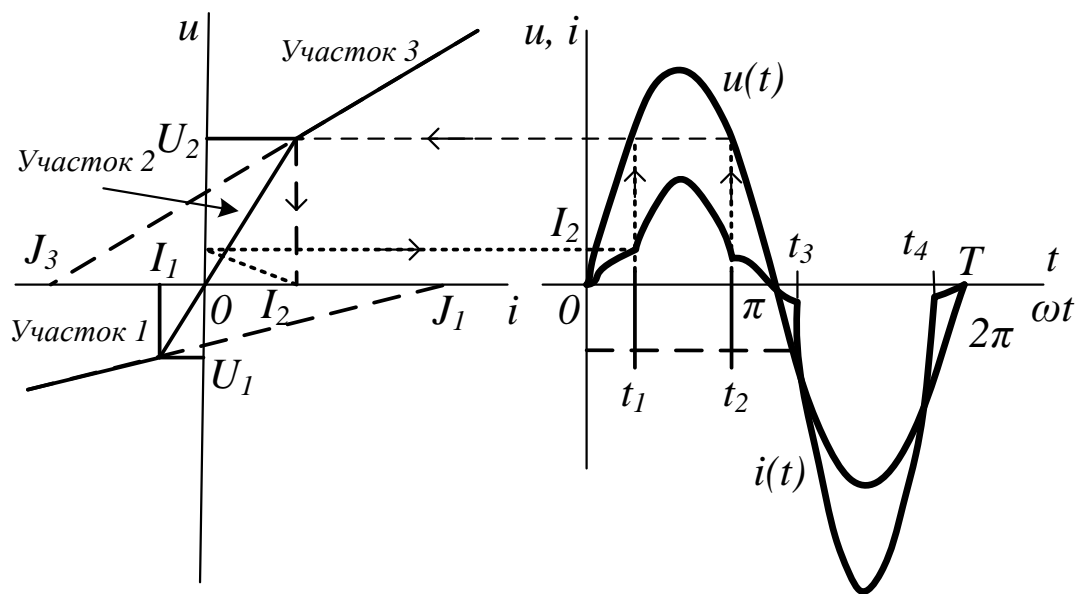


Рис. 19.2

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе используют источник синусоидального напряжения из модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и источник напряжения  $U = 0 \dots 12$  В из блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ4** с регулируемым по величине напряжением. Измерительные приборы расположены в блоке **МОДУЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ** постоянного тока. Элементы электрической цепи выбирают из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Для получения зависимостей от времени используют **осциллограф**.

- Собрать цепь по схеме, показанной на рисунке 1П протокола измерений.
- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.
- Включить автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ** и тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ UZ40...12 В**. Установить напряжение  $U = 0$ .
- Плавно изменяя регулятором напряжения ток  $I$  от нуля до 90 мА с ша-

гом 10 мА экспериментально получить статическую характеристику нелинейного элемента. Измеренные величины занести в таблицу 1П протокола измерений.

- Изменить полярность подключения нелинейного элемента **RI**. Повторить измерения тока и напряжения. Измеренные величины занести в таблицу 1П.

- Выключить тумблер **SA3** источника **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

- Собрать цепь по схеме, показанной на рисунке 2П. Нелинейный элемент и шунт  $R_{ш} = 1$  Ом взять из модуля **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

- Включить тумблер **СЕТЬ** модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**. Переключатель **Форма** установить в положение  $\sim$ . Регулятором **Частота** установить частоту  $f = 20$  Гц. Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения напряжения  $U = 4 - 5$  В.

- Включить **осциллограф**. Настроить нулевое значение сигнала, повернуть ручку регулятора вертикальной развертки по часовой стрелке до упора.

- Подключить **Вход 1** осциллографа к источнику. Настроить ручки горизонтальной развертки осциллографа таким образом, чтобы на экране полностью укладывался один период колебаний. Настроить переключатель усиления по напряжению так, чтобы максимально использовалась площадь экрана.

- Подключить **Вход 1** осциллографа на шунт. Срисовать на кальку с экрана **осциллографа** кривую зависимости  $u_{ш}(t)$ . На рисунке написать масштаб  $m_U$  усиления по напряжению.

- Утвердить протокол измерений у преподавателя.

- Выключить тумблер **СЕТЬ** модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и автоматический выключатель **QF** блока **МОДУЛЬ ПИТАНИЯ**.

## Протокол измерений к лабораторной работе №19

### «Нелинейная резистивная цепь»

Схема для измерения ВАХ нелинейного элемента показана на рисунке 1П.

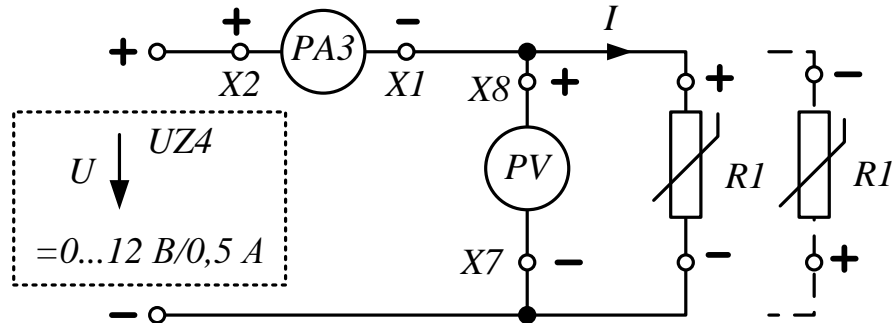


Рис. 1П

Экспериментальная ВАХ элемента представлена на снятых осциллограммах.

Схема с нелинейным элементом показана на рисунке 2П.

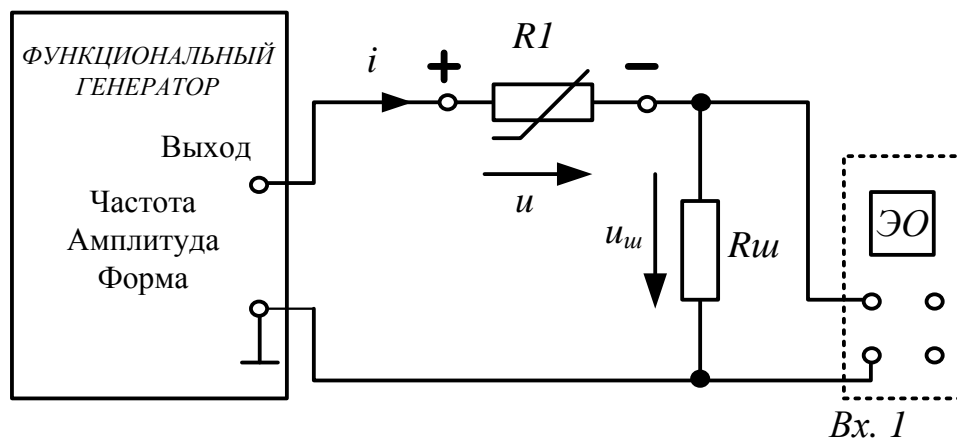


Рис. 2П

Частота  $f = 20 \text{ Гц}$ , сопротивление шунта  $R_{ш} = 1 \text{ Ом}$ .

Осциллограмма напряжения на шунте прикреплена к протоколу измерений.

Работу выполнили \_\_\_\_\_

Работу проверил \_\_\_\_\_

### **3. Содержание отчета**

1. Нарисовать схемы исследуемых цепей. Перенести данные из протокола.
2. Построить график ВАХ нелинейного элемента. Графически аппроксимировать нелинейную характеристику тремя звеньями ломаной линии.
3. Рассчитать ток в цепи с нелинейным элементом, используя аппроксимацию ВАХ. Сравнить расчетную и экспериментальную зависимости тока.

### **4. Контрольные вопросы**

1. Дайте анализ экспериментальных ВАХ нелинейных элементов.
2. Какие нелинейные элементы называются безынерционными?
3. В чем заключается суть аналитического расчета нелинейных цепей?
4. Сравните расчетную и экспериментальную ВАХ нелинейного элемента и сделайте выводы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 20

### ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

*Цель работы:* экспериментальное получение характеристик для действующих значений напряжения и тока в нелинейной цепи периодического тока и исследование явления феррорезонанса.

#### 1. Общие сведения

При расчетах напряжений и токов установившегося периодического режима в нелинейной электрической цепи, содержащей катушку с ферромагнитным сердечником, используется метод эквивалентных синусоид. Пренебрегая потерями в меди провода катушки и в ферромагнитном материале сердечника, несинусоидальные напряжения и токи цепи можно заметить эквивалентными синусоидальными с амплитудами в  $\sqrt{2}$  раз большими их действующих значений.

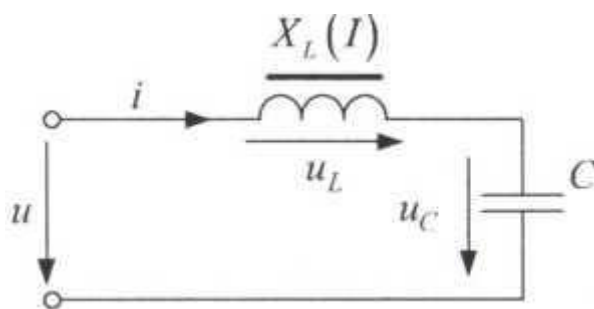


Рис. 20.1

На рисунке 20.1 изображена схема замещения цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Согласно принятым допущениям можно определить реактивные сопротивления

$$X_L = \frac{U_L}{I};$$
$$X_C = \frac{U_C}{I}.$$

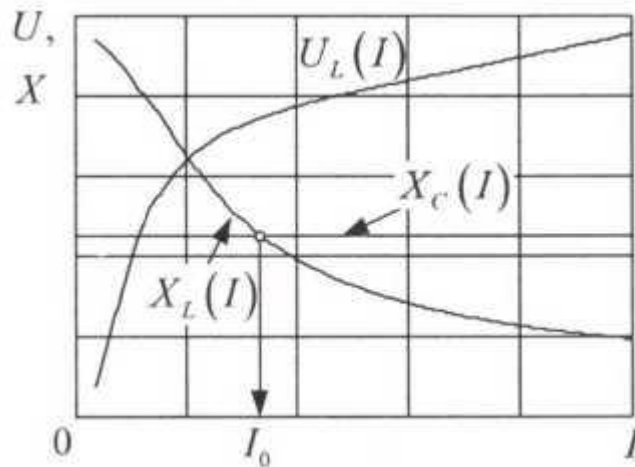


Рис. 20.2

Зависимость  $U_L(I)$  является нелинейной функцией тока  $I$  (рис. 20.2). Следовательно, зависимость реактивного сопротивления катушки

$$X_L(I) = U_L(I)/I$$

также нелинейная функция тока.

Изменяя величину приложенного напряжения можно получить ток  $I = I_0$ , при котором

$$X_L(I_0) = X_C(I_0).$$

В цепи имеет место явление резонанса. В отличие от линейной цепи, состояние резонанса достигается изменением величины приложенного напряжения. Это явление называется феррорезонансом.

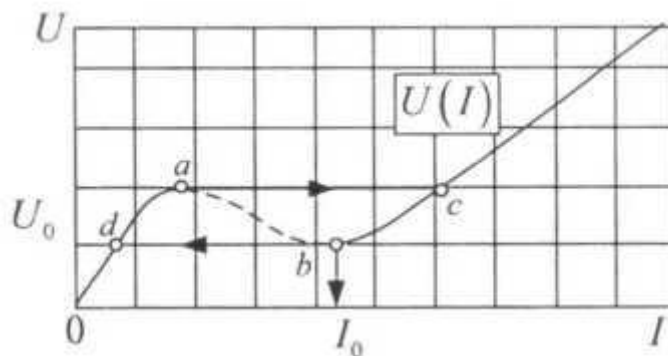


Рис. 20.3

Графики зависимости  $U(I)$  показан на рисунке 20.3. Участок  $ab$  кривой  $U(I)$  обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением и поэтому

является неустойчивым. При изменении входного напряжения возникают скачкообразные изменения тока (на рис. 20.3 от  $a$  к  $c$  и от  $b$  к  $d$ ).

Режим феррорезонанса соответствует точке  $b$  кривой  $U(I)$ . В этом режиме входное сопротивление цепи активное  $R = U_0/I_0$ .

## 2. Содержание и порядок выполнения работы

В лабораторной работе исследуется нелинейная цепь с последовательным соединением катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником и конденсатора. Источником синусоидального напряжения частотой  $f = 50$  Гц является **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Измерения выполняются компьютерным измерительным комплексом (смотри п. 1.4 введения). Сопротивление проводов обмотки катушки измеряют мультиметром РР.

Катушка с ферромагнитным сердечником расположена в модуле **НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**, конденсатор - в модуле **РЕАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ**. Рекомендуемая величина емкости  $C$  - 68 или 82 мкФ.

- Собрать электрическую цепь, показанную на рисунке 1П протокола измерений.

- Проверить собранную электрическую цепь в присутствии преподавателя.

Запустить информационно-измерительный комплекс *DeltaProfi*. Для этого:

- Включить компьютер, дождаться окончания загрузки *Windows*.

Запустить программу *DeltaProfi*. Появится окно программы.

- Выбрать работу «Работа №20 Явление феррорезонанса» в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор работы...». На экране появится схема лабораторной работы.

- Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление - Пуск» или горячей клавишей F5.

- Включить автоматический выключатель **QF** модуля питания.

- Включить тумблеры **СЕТЬ** модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**. Переключатель **Форма** установить в положение  $\sim$ . Регулятором **Частота** установить частоту  $f_1 = 50$  Гц. Регулятором **Амплитуда** установить величину действующего значения напряжения  $U_I = 0$  В.

- Плавно увеличивая величину приложенного напряжения, получить зависимость  $U(I)$ . Обязательно зафиксировать напряжение, при котором происходит скачкообразное увеличение тока. Данные занести в таблицу 1П протокола измерений.

- Плавно уменьшая величину приложенного напряжения, получить зависимость  $U(I)$ . Обязательно зафиксировать напряжение на входе, при котором происходит скачкообразное уменьшение тока. Данные занести в таблицу 1П.

- Выполнить расчеты, приведенные в протоколе измерений.

- Закоротить участок цепи с конденсатором. Плавно увеличивая величину приложенного напряжения, получить зависимость напряжения  $U_{RL}(I)$ . Данные занести в таблицу 2П.

- Протокол измерений утвердить у преподавателя.

- Выключить тумблеры **СЕТЬ** модулей **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** и **ВВОД-ВЫВОД**.

- Выключить автоматический выключатель QF модуля питания.

Окончить работу программы *DeltaProfi*. Для этого:

- Остановить программу, нажатием кнопки «*Стоп*» или командой главного меню «*Управление - Стоп*» или горячей клавишей F6.

- Закрыть программу.



**Протокол измерений к лабораторной работе № 20**  
**«Явление феррорезонанса»**

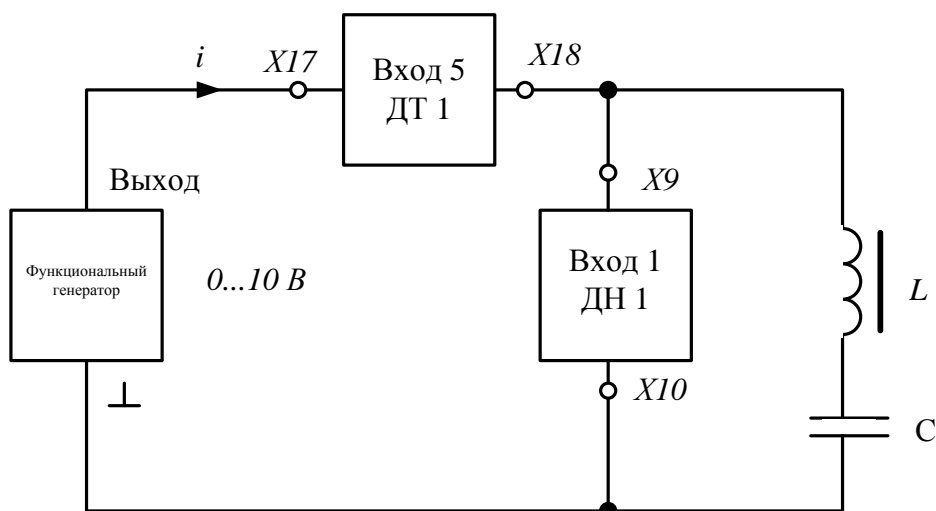


Рис. 1П

Экспериментальные ВАХ цепи при увеличении и при уменьшении напряжения представлены в табл. 1П.

Таблица 1П

При увеличении напряжения								
$I, \text{ мА}$	0							
$U, \text{ В}$	0							
При уменьшении напряжения								
$I, \text{ мА}$								0
$U, \text{ В}$								0

По таблице  $U(I)$  эквивалентное активное сопротивление цепи (пояснения на рис. 20.3)

$$R = U_0 / I_0 = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом.}$$

$$\text{Частота } f = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Гц. Емкость } C = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкФ.}$$

$$\text{Емкостное сопротивление } X_C = 1 / (2\pi f C) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ом.}$$

Экспериментальная зависимость  $U_{RL}(I)$  представлена в таблице 2П

Таблица 2П

$I, \text{мА}$	0							
$U_{RL}, \text{В}$	0							

Работу выполнил: \_\_\_\_\_

Работу проверил: \_\_\_\_\_

### 3. Содержание отчета

1. Нарисовать схемы электрических цепей. Перенести данные из протокола.
2. Рассчитать  $U(I)$  цепи (рис. 1П), используя экспериментальную ВАХ катушки и параметры линейных элементов.
3. Построить и сравнить расчетную и экспериментальную ВАХ цепи.

### 4. Контрольные вопросы

1. Дайте понятие феррорезонанса.
2. Каковы условия возникновения явления феррорезонанса?
3. Какой метод используется для расчета нелинейных магнитных цепей?
4. Дайте понятие дифференциального сопротивления нелинейного элемента.
5. Дайте сравнительный анализ расчетной и экспериментальной ВАХ цепи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков, Ю.А. Основы теоретической электротехники [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 592 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/36>. — Загл. с экрана.

2. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 592 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/90>. — Загл. с экрана.

3. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г.И. Атабеков [и др.]. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 432 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/644>. — Загл. с экрана.

4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи в 2 ч. Часть 1. : учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 364 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-02622-1. — Режим доступа: [www.biblio-online.ru/book/AFCC1C9F-B134-4FCA-9696-92B9E8618C67](http://www.biblio-online.ru/book/AFCC1C9F-B134-4FCA-9696-92B9E8618C67).

5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи в 2 ч. Часть 2. : учебник для академического бакалавриата / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 346 с. — (Серия : Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-02624-5. — Режим доступа: [www.biblio-online.ru/book/02071354-3E5E-46FD-B5DF-CF442E2A09EA](http://www.biblio-online.ru/book/02071354-3E5E-46FD-B5DF-CF442E2A09EA)

6. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб.-метод. пособие : рек. УМС / В. И. Усенко [и др.] ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017 - Ч. 1 : Анализ линейных электрических цепей в установившихся режимах. - 2017. - 144 с.

**Палина Павловна Проценко,**  
*доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ»*

**Наталья Сергеевна Бодруг,**  
*старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники ФГБОУ ВО «АмГУ»*

**Теоретические основы электротехники. Часть 2**

Методические указания к лабораторным работам.

---