

Министерство образования Российской Федерации

Тульский государственный университет

КАФЕДРА ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 9-16

Часть 2. Четырехполюсники. Линейные цепи несинусоидального тока.  
Переходные процессы в линейных цепях. Нелинейные электрические цепи.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для студентов очно-заочного обучения

Под редакцией В.И.Ловчакова

Тула 2001

Разработали: В.С. Илюшин, канд. техн. наук, доц.,  
В.И. Ловчаков, докт. техн. наук, доц.,  
В.В. Сурков, канд. техн. наук, доц.,  
А.В. Чумаков, канд. техн. наук, асс..

## ВВЕДЕНИЕ

Во второй части настоящих методических указаний приводятся описания 8 лабораторных работ, на базе которых организуются конкретные лабораторные занятия по темам четырехполюсники, линейные цепи несинусоидального тока, переходные процессы в линейных цепях, нелинейные электрические цепи. Описания предназначены для проведения занятий в лаборатории теоретических основ электротехники по указанным разделам курсов "Теоретические основы электротехники", "Теоретическая электротехника" и др.

В составлении методических указаний принимали участие преподаватели кафедры электротехники и электрооборудования В.С. Илюшин (работа 9), В.И. Ловчаков (работы 10,14), В.В. Сурков (работы 11,12,13), А.В. Чумаков (работы 15,16). Общая редакция данных методических указаний осуществлена В.И. Ловчаковым. Методические указания предназначены для студентов специальностей электротехнических и электроэнергетических направлений всех форм обучения.

## ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. К выполнению цикла лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности.
2. Конкретная лабораторная работа выполняется в три этапа:
  - 2.1. Самостоятельная внеаудиторная подготовка – уяснение цели работы, теоретическая подготовка по разделу “Основы теории” указаний и учебной литературы, оформление отчета по предыдущей работе.
  - 2.2. Выполнение работы в лаборатории под руководством преподавателя – допуск к работе, сборка исследуемой цепи, проверка цепи преподавателем, включение питания и проведение эксперимента.
  - 2.3. Третий этап выполняется в лаборатории самостоятельно – обработка и анализ результатов эксперимента, формулировка выводов, а также защита данной или предыдущей работы в объеме материала, обозначенного контрольными вопросами.
3. Отчет по лабораторной работе оформляется каждым студентом отдельно с соблюдением существующих стандартов и требований к оформлению отчетов. Содержание отчета определяется в методических указаниях к конкретной лабораторной работе.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение входных сопротивлений симметричного четырехполюсника при холостом ходе и коротком замыкании, определение коэффициентов четырехполюсника из результатов опытов и их сравнение с величинами, полученными расчетным путем.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. В работе используется симметричный П-образный четырехполюсник (рис.1).

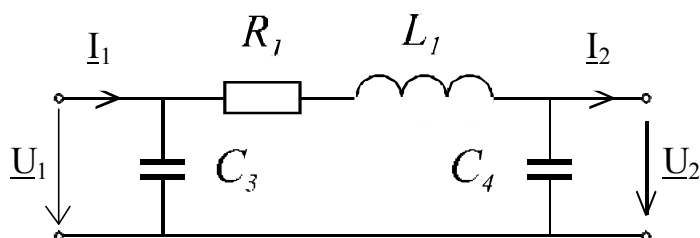


Рис.1. Схема исследуемого четырехполюсника

2.2. Уравнения типа "А" симметричного четырехполюсника имеют вид

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2 ; \\ \underline{I}_1 &= \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2 . \end{aligned}$$

Для симметричного четырехполюсника  $\underline{A} = \underline{D}$ . При холостом ходе  $\underline{I}_2 = 0$ , следовательно, для цепи (рис. 1)

$$\underline{A} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\text{ХХ}} = \frac{R + jX_L - jX_C}{-jX_C} , \quad (1)$$

где

$$X_L = \omega \cdot L_1 ; \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C_3} = \frac{1}{\omega \cdot C_4} . \quad (2)$$

Сопротивление холостого хода

$$\underline{Z}_X = \frac{-jX_C (R + jX_L - jX_C)}{R + jX_L - 2jX_C} . \quad (3)$$

При коротком замыкании  $\underline{U}_2 = 0$ , следовательно

$$\underline{B} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \right|_{\text{КЗ}} = R + jX_L . \quad (4)$$

Сопротивление короткого замыкания

$$\underline{Z}_K = \frac{-jX_C(R + jX_L)}{R + jX_L - jX_C} \quad (5)$$

Величину  $\underline{C}$  можно вычислить из соотношения:

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}^2 - 1}{\underline{B}} \quad (6)$$

Коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  можно вычислить также из результатов опытов холостого хода и короткого замыкания:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_X}{\underline{Z}_X - \underline{Z}_K}} \quad (7)$$

$$\underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_K \quad (8)$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_X} \quad (9)$$

2.3. Коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  связаны с параметрами цепи следующими соотношениями:

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \quad (10)$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_1 \quad (11)$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_4}{\underline{Z}_3 \underline{Z}_1} \quad (12)$$

Здесь  $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_L$ ;  $\underline{Z}_3 = \underline{Z}_4 = -jX_{C3} = -jX_{C4}$ .

3.4. При проведении опытов холостого хода и короткого замыкания наибольшую трудность вызывает измерение разности фаз напряжения и тока на входе четырехполюсника. Для этого в лабораторной работе используется двухлучевой осциллограф с входами  $U_{ab}$  и  $U_{cd}$ , как показано на рис.2. На вход четырехполюсника подключается дополнительное сопротивление  $R'=100$  Ом для измерения тока. Действующие значения тока и напряжения определяются с помощью вольтметра, а угол между ними - по осциллограмме, на которой наблюдаются одновременно обе эти величины.

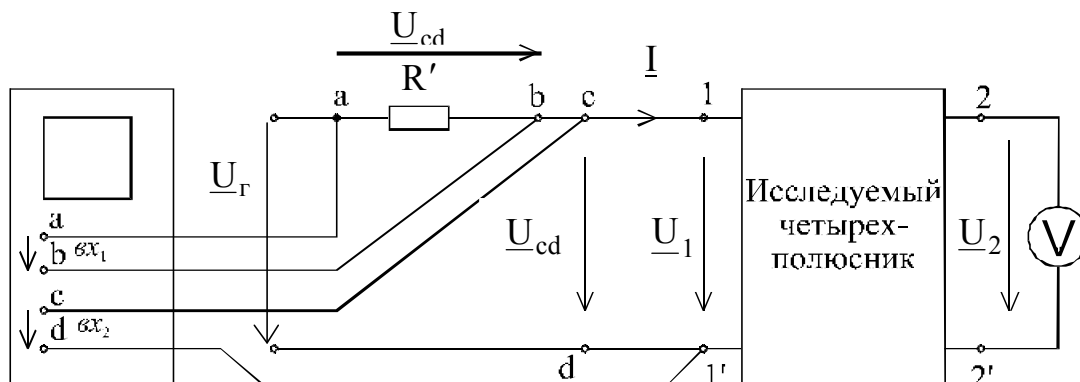


Рис.2. Схема проведения эксперимента

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

- 3.1. Внимательно ознакомиться с основами теории.
- 3.2. Вычислить частоту  $f = \omega/2\pi$ , приняв  $\omega = 20\,000\text{ с}^{-1}$ .
- 3.3. Вычислить сопротивления по формулам (2).
- 3.4. Вычислить коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  по формулам (10), (11), (12)

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Собрать цепь, схема которой изображена на рис.2, включив в качестве исследуемого четырехполюсника цепь рис.1. К точкам a, b и c, d присоединить входы  $U_{ab}$  и  $U_{cd}$  осциллографа.

4.2. Установить частоту генератора  $f$ , вычисленную в п. 3.4.

4.3. При напряжении  $U_r = 10\text{ В}$  провести опыт холостого хода, для чего оставив зажимы 2 и 2' разомкнутыми, измерить вольтметром напряжения  $U_{ab}$  и  $U_{cd} = U_1$ , а также угол сдвига фаз  $\varphi_x$  между напряжением  $u_{cd}(t)$  и током  $i_1(t)$  (по осциллограмме). Начальную фазу напряжения  $u_{cd}(t)$  считать равной нулю. Если ток  $i_1(t)$  отстает от напряжения  $u_{cd}(t)$ , то угол  $\varphi_x$  считается положительным. Если ток опережает напряжение, данный угол считается отрицательным.

4.4. Найти комплексное сопротивление

$$\underline{Z}_X = \left. \frac{U_{cd}}{I_1} \right|_{XX} = \left. \frac{U_{cd}}{U_{ab}} \right|_{XX} \cdot R' e^{j\varphi_x}$$

4.5. Произвести опыт короткого замыкания, для чего замкнуть зажимы 2 и 2' проводником, установить  $U=10\text{ В}$  и повторить все измерения п.4.3.

4.6. Найти сопротивление

$$\underline{Z}_K = \left. \frac{U_{cd}}{I_1} \right|_{K3} = \left. \frac{U_{cd}}{U_{ab}} \right|_{K3} \cdot R' e^{j\varphi_K}$$

4.7. Вычислить коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  по формулам (7) - (9) и сравнить их с полученными в п.3.3.

4.8. Вычислить  $\underline{Z}_X$  и  $\underline{Z}_K$  по формулам (3) и (5). Сравнить их с измеренными значениями.

### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схему четырехполюсника, результаты измерений и расчетов, а также результаты сравнения сопротивлений и коэффициентов, полученных расчетным и экспериментальным путем.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Что такое пассивный четырехполюсник ?
- 6.2. Какой четырехполюсник называется симметричным ?
- 6.3. Как проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания ?  
Что при этом должно быть измеряно ?
- 6.4. Как проводится измерение сдвига по фазе между током и напряжением ?
- 6.5. Выведите формулы (1) и (4).
- 6.6. Выведите формулы (3) и (5).
- 6.7. Выведите формулы (6), (7), (8), (9).
- 6.8. Выведите формулы (10), (11), (12).

## Лабораторная работа №10

### НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение реакции цепи, содержащей индуктивный и емкостный элементы, на несинусоидальное периодическое напряжение и на его постоянную и гармоническую составляющие. Освоение некоторых приемов измерений в цепях несинусоидального тока.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Источником несинусоидального напряжения в данной работе служит генератор звуковой частоты (ГЗ), на выходе которого включены диод D и резистор R<sub>1</sub> (рис.1).

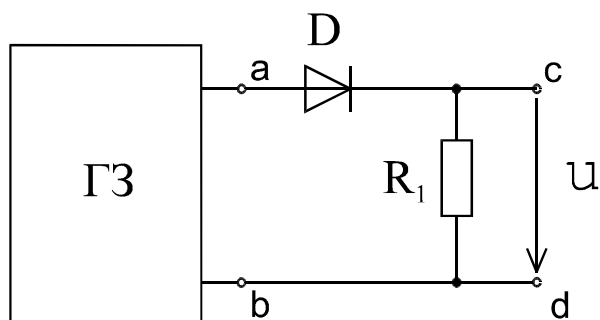


Рис.1. Источник несинусоидального напряжения.

Форма кривой напряжения  $u(t)$  показана на рис.2.

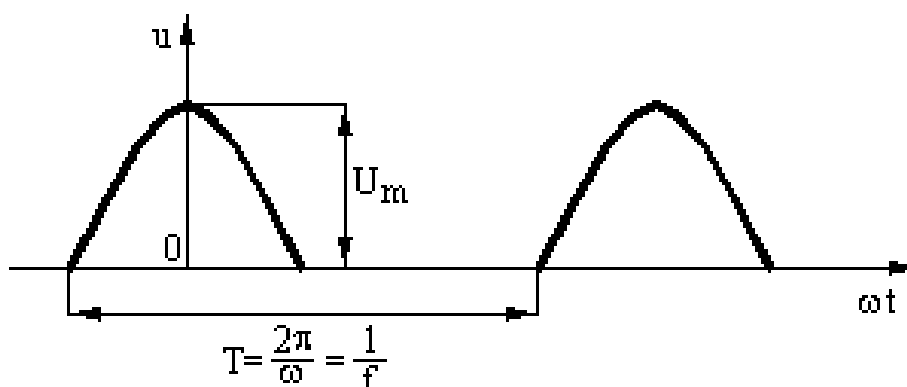


Рис.2. Форма кривой несинусоидального напряжения.

Эту кривую можно разложить в ряд Фурье:

$$u(t) = \frac{2U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \dots \right).$$



В работе принимается  $U_m = 20$  В, тогда разложение имеет следующий вид:

$$u(t) = 6,37 + 10\cos(\omega t) + 4,26\cos(2\omega t) - 0,85\cos(4\omega t) + \dots \quad (1)$$

Измерения напряжения  $u(t)$  производятся с помощью осциллографа, электронного вольтметра и стрелочного вольтметра магнитоэлектрической системы.

Осциллограф позволяет наблюдать форму кривой напряжения и поддерживать неизменным его максимальное значение  $U_m$ .

Электронный вольтметр ВЗ-6 измеряет действующее значение гармонической части напряжения:

$$U_{эв} = \sqrt{\frac{U_{1m}^2}{2} + \frac{U_{2m}^2}{2} + \frac{U_{4m}^2}{2} + \dots} = \sqrt{\frac{10^2}{2} + \frac{4,26^2}{2} + \frac{0,85^2}{2} + \dots} = 7,71 \text{ В} .$$

Вольтметр магнитоэлектрической системы измеряет лишь постоянную составляющую напряжения:

$$U_{мэ} = U_0 = 6,37 \text{ В} .$$

Объектом исследования в работе является цепь, показанная на рис.3, которая присоединяется к источнику несинусоидального напряжения в точках с и d .

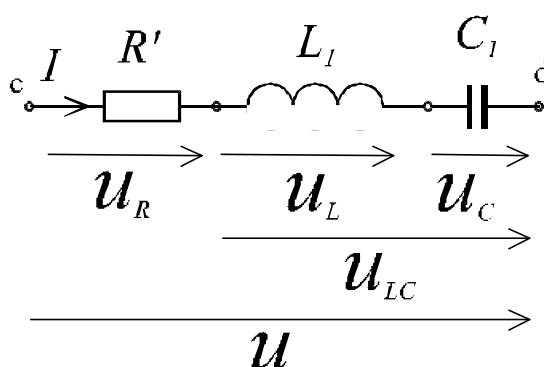


Рис.3. Исследуемая цепь

Различные элементы цепи по разному реагируют на гармоники, входящие в состав несинусоидального напряжения. Так сопротивление резистора не зависит от номера гармоники, сопротивление катушки пропорционально номеру гармоники, а сопротивление конденсатора обратно пропорционально ему. Поэтому, в отличие от синусоидального тока, формы кривых напряжения на различных элементах цепи отличаются друг от друга.

Форма кривой напряжения на резисторе совпадает с формой прямой тока. Это означает, что отношение амплитуды  $k$ -ой гармоники к амплитуде  $l$ -ой гармоники напряжения на резисторе не отличается от отношения амплитуд гармоник тока:

$$\frac{U_{kmR}}{U_{lmR}} = \frac{I_{km}}{I_{lm}} .$$

На катушке увеличиваются высшие гармоники напряжения:

$$\frac{U_{kmL}}{U_{\ell mL}} = \frac{kI_{km}}{I_{\ell m}} .$$

На конденсаторе высшие гармоники напряжения ослабляются:

$$\frac{U_{kmC}}{U_{\ell mC}} = \frac{I_{km}}{kI_{\ell m}} .$$

Эти особенности кривых указанных напряжений можно наблюдать с помощью осциллографа.

На участке L - C возможно возникновение резонансных явлений. При этом резонирует лишь та гармоника, частота которой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} .$$

Напряжение этой гармоники при резонансе минимально (близко к нулю), и она становится практически незаметной на фоне других гармонических составляющих.

В настоящей работе к цепи рис.3 прикладывается несинусоидальное напряжение (рис.1) при основной частоте 2 кГц и  $U_m = 20$  В, далее производятся измерения напряжений на элементах, указанных в таблице. Затем диод D выводится из работы (путем соединения проводником зажимов а и с) и измерения напряжений повторяются при воздействии на цепь отдельных гармоник (первой, второй и четвертой) при соответствующих амплитудах напряжений (их действующие значения указаны в таблице). По результатам измерений вычисляются действующие значения гармонической части напряжения:

$$U_{\text{гарм}} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_4^2} .$$

Результаты измерений						Вычислено по результатам измерений  $U_{\text{гарм}}$
Несинусоидальное напряжение			Синусоидальное напряжение			
Напряжение на участках цепи	Вольтметры		2 кГц	4 кГц	8 кГц	
	Электронный	магнитоэлектрический				
$U$ , В	7,71	6,37	7,07	3,02	0,6	
$U_R$ , В						
$U_L$ , В						
$U_C$ , В						
$U_{LC}$ , В						

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Внимательно ознакомиться с основами теории.

3.2. Подготовить таблицу для записи результатов экспериментов.

3.3. Подготовить бумагу для снятия (зарисовки) осциллограммы.

3.4. Вычислить резонансную частоту  $f_0$ .

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Собрать цепь, показанную на рис.1. С помощью осциллографа убедиться в том, что напряжение  $u(t)$  соответствует кривой рис.2. Установить  $U_m = 20$  В и  $f = 2$  кГц. Измерить это напряжение с помощью электронного вольтметра, который должен показать 7,71 В.

4.2. Собрать цепь, показанную на рис.3 и присоединить ее к цепи рис.1 в точках с и d. С помощью электронного вольтметра вновь установить  $U = 7,71$  В. Тем самым на исследуемую цепь будет подано заданное несинусоидальное напряжение.

4.3. С помощью электронного вольтметра, а также вольтметра магнитоэлектрической системы измерить и внести в таблицу значения напряжений на участках цепи.

4.4. Зарисовать осциллограммы напряжений  $u_R(t)$ ,  $u_L(t)$  и  $u_C(t)$ , отметив на них период основной частоты.

4.5. Вывести из работы диод D соединив проводником точки а и с. С помощью электронного вольтметра установить  $U = 7,07$  В. Тем самым к исследуемой цепи будет приложено напряжение, соответствующее первой гармонике несинусоидального напряжения, которое использовалось ранее.

4.6. Измерить и внести в таблицу значения напряжений на участках цепи.

4.7. Установить частоту 4 кГц и напряжение  $U = 3,02$  В (вторая гармоника несинусоидального напряжения). Измерить и внести в таблицу значения напряжений на участках цепи.

4.8. Установить частоту 8 кГц и напряжение  $U = 0,6$  В (четвертая гармоника несинусоидального напряжения). Измерить и внести в таблицу значения напряжений на участках цепи.

4.9. Снять перемычку между точками а и с. Присоединить электронный вольтметр к точкам е и d (напряжение  $U_{LC}$ ). Установить основную частоту  $f = f_0$  (т.е. равную расчетной резонансной частоте) и, изменяя частоту в некоторых пределах, добиться минимальных показаний вольтметра.

4.10. Присоединить канал  $Y_1$  двухлучевого осциллографа к точкам с и d, а канал  $Y_2$  - к точкам е и d (вместо вольтметра) и снять совместную осциллограмму обеих кривых.

4.11. Вычислить по результатам измерений значения  $U_{\text{гарм}}$  для всех строк таблицы и сравнить их с показаниями электронного вольтметра при несинусоидальном напряжении.

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему исследуемой цепи, таблицу с результатами измерений и их обработки, осциллограммы с указанием масштабов по осям координат, заключение о степени совпадении результатов

измерений напряжений в цепи несинусоидального тока с вычисленным значением  $U_{\text{гарм}}$ .

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Что называется действующим значением несинусоидальной периодической величины?

6.2. Как производится расчет линейной электрической цепи при воздействии на нее несинусоидального периодического напряжения?

6.3. На какую составляющую напряжения реагирует вольтметр магнитоэлектрической системы?

6.4. Почему формы кривых напряжений на различных участках цепи несинусоидального периодического тока отличаются друг от друга?

6.5. Как определить частоту периодического напряжения по его осциллограмме?

6.6. Объясните форму кривой напряжения  $u_{LC}(t)$  при резонансе на основной гармонике?

6.7. Объясните смысл показаний вольтметра магнитоэлектрической системы, занесенных в таблицу?

6.8. Почему показания электронного вольтметра могут отличаться от  $U_{\text{гарм}}$ ?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное изучение и получение практических навыков расчета переходных процессов в последовательной цепи R, L .

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Переходными называют процессы, возникающие в электрических цепях при их переходе из одного установившегося состояния в другое. Такие процессы возникают при коммутационных изменениях в цепях (включении, отключении источников энергии, изменении параметров цепи и т.д.). Момент коммутации обычно принимают за начало отсчета времени процесса.

2.2. При теоретическом анализе переходных процессов в электрических цепях записывают и решают уравнения законов Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Если дифференциальное уравнение имеет первый порядок, то цепь, которую она описывает, называют цепью первого порядка.

Для исследуемой цепи, изображенной на рис.1а, при включении ее на постоянное напряжение, уравнение имеет вид:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} .$$

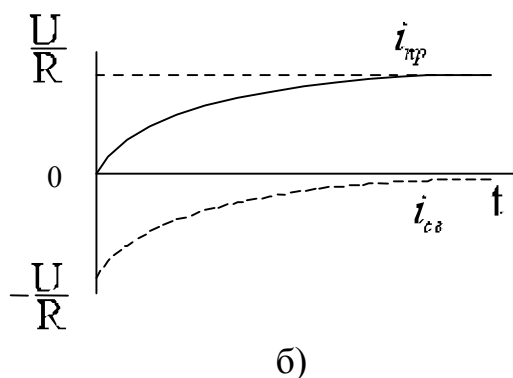
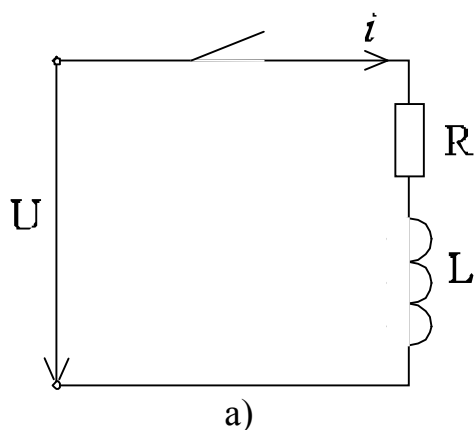


Рис.1. Цепь с последовательным соединением R, L элементов: а) схема цепи; б) переходный ток при включении ее на постоянное напряжение.

Решение дифференциальных уравнений первого порядка представляют как сумму принужденной и свободной составляющих:

$$i = i_{пр} + i_{св} ,$$

где  $i$  - переходный ток ;

$i_{пр}$  - принужденный ток, т.е. ток который установится в цепи по окончании переходного процесса ;

$i_{св}$  - свободный ток, представляющий разность переходного и принужденного токов.

Аналогичный вид имеют напряжения на элементах цепи. Свободные величины в цепях первого порядка изменяются по экспоненциальному закону:

$$i_{св}(t) = Ae^{pt} ,$$

где  $A$  - постоянная интегрирования,

$p$  - корень характеристического уравнения.

2.3. Принужденная составляющая определяется как ток (или напряжение) установившегося режима работы цепи, к которому вынуждает приложенное к цепи напряжение. В рассматриваемом случае

$$i_{пр} = U/R .$$

2.4. Для определения  $p$  нужно составить характеристическое уравнение, которое записывается для свободных величин цепи (полагают, что источники электрической энергии в цепи отсутствуют). С этой целью обычно размыкают любую ветвь цепи и определяют входное сопротивление по отношению к разомкнутой ветви, полагая индуктивное сопротивление равным  $pL$ , а емкостное -  $1/pC$ . Приравнявая это входное сопротивление нулю, записывают характеристическое уравнение исследуемой цепи. Так для схемы рис.1а имеем:  $Z(p) = R + pL = 0$ , откуда

$$p = - R/L .$$

В соответствии с затухающим характером свободных величин  $p$  всегда будет отрицательным числом. При записи уравнений и построении графиков пользуются также понятием постоянной времени цепи:

$$\tau = 1/|p| = R/L .$$

Это время , в течение которого свободная составляющая уменьшается в  $e$  раз ( $e = 2,71...$ ). Практически считается, что за  $t = 5\tau$  переходный процесс заканчивается.

2.5. Постоянная интегрирования определяется по закону коммутации для ветвей с индуктивностью, который устанавливает невозможность скачкообразного изменения тока в индуктивности :

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

В элементе  $L$  ток в момент коммутации имеет то же значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, и далее изменяется, начиная именно с этого значения.

Записав решение  $i(t) = i_{пр} + Ae^{pt}$  дифференциального уравнения для  $t = 0$  и, учитывая, что до коммутации тока не было, т.е.  $i(0+) = i(0-) = 0$  , можно определить  $A$ :  $0 = U/R + A$ , откуда  $A = - U/R$  .

2.6. Окончательно решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$i(t) = i_{пр} + i_{св}(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{Rt}{L}} = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) .$$

2.7. По графику свободной составляющей можно определить постоянную времени. Например, по времени, в течении которого свободная составляющая уменьшается в два раза:  $t^* = \tau \cdot \ln 2 = 0,69\tau$ .

Постоянная времени может быть также определена как длина подкасательной к экспоненте в любой точке графика.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Начертить схему для исследования переходного процесса в цепи R, L.

Для изучения переходных процессов в цепи с помощью осциллографа в лаборатории применена схема (рис.2), обеспечивающая многократное повторение процессов.

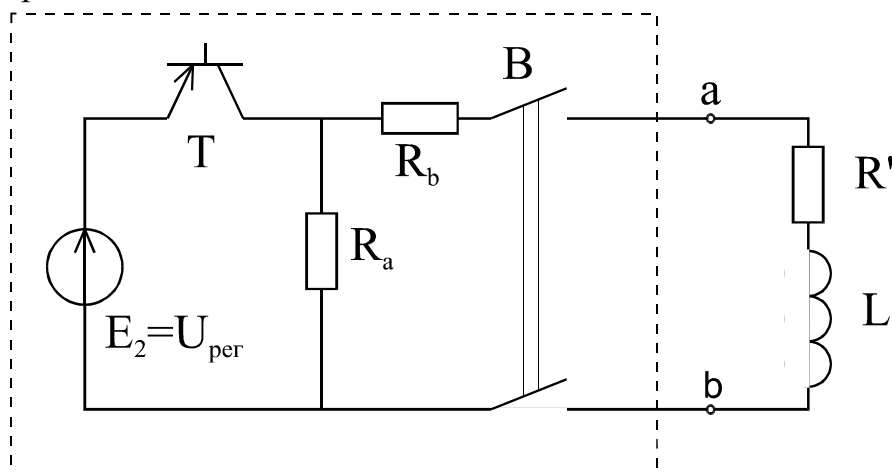


Рис.2. Схема исследуемой цепи (часть цепи, обведенная пунктирной линией, смонтирована на стенде).

Коммутация обеспечивается периодическим открытием и закрытием транзистора Т, управляемого генератором звуковой частоты (ГЗ). Тумблер В должен быть всегда замкнут. При этом процесс включения (при открытии Т) происходит по цепи  $E_2 - R_b - B - R' - L - B - E_2$ , а процесс отключения - по цепи  $R_a - R_b - B - R' - L - R_a$ .

На экране осциллографа наблюдаются оба переходных процесса с различными начальными условиями и постоянными времени.

3.2. Рассчитать постоянную времени  $\tau_{вкл}$  исследуемой цепи при включении транзистора в проводящее состояние (в данном состоянии сопротивление транзистора считать равным нулю) и постоянную времени  $\tau_{откл}$  цепи - при отключении транзистора (проводимость транзистора положить равной нулю). Определить для указанных цепей переходные величины тока через индуктивный элемент и напряжения на нем. При расчетах принять  $R_a = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_b = 47 \text{ Ом}$ .

3.3. Подготовить прозрачную бумагу (кальку) для снятия осциллограмм.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Подключить осциллограф к зажимам а, б (вместо цепи R', L) и получить на экране осциллографа прямоугольные импульсы напряжения.

Для получения прямоугольных импульсов необходимо включить тумблер В на панели переменного тока и тумблер  $E_2$  на панели постоянного тока. Установить частоту на звуковом генераторе  $f \leq 1/6\tau_{\max}$ , где  $\tau_{\max}$  - максимальная из  $\tau_{\text{вкл}}$  и  $\tau_{\text{откл}}$  постоянных времени при включении цепи R', L к источнику напряжения и ее отключении. Ручкой "Рег. выхода" генератора добиться примерно одинаковых длительности импульсов и промежутка между ними. Уровень напряжения импульсов регулируется ручкой  $U_{\text{рег}}$  на панели постоянного тока. Величину напряжения можно измерить вольтметром, имеющимся на той же панели.

4.2. Снять осциллограмму прямоугольных импульсов и определить масштабы по осям X и Y осциллографа.

Масштаб напряжений  $m_u$  при данном усилении по оси Y осциллографа определяется по измеренному в п. 4.1 напряжению.

Масштаб времени  $m_t$  осциллографа определяется по частоте звукового генератора.

4.3. Присоединить к зажимам а и б цепь R, L, включив в качестве сопротивления резистор R', а в качестве индуктивности - катушку  $L_1$ . Снять осциллограммы напряжения на резисторе R' и катушке  $L_1$ .

4.4. На всех осциллограммах указать оси координат, масштабы напряжения, тока и времени.

4.5. Определить по осциллограммам постоянные времени, начальные и принужденные значения величин и сравнить их с расчетными.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему эксперимента, расчет переходных процессов цепи при включении и отключении источника напряжения, осциллограммы, выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

6.1. Как составить характеристическое уравнение для заданной цепи?

6.2. Какова теоретически и практически продолжительность переходных процессов в электрических цепях ?

6.3. Как формулируется закон коммутации для индуктивности ?

6.4. Может ли скачкообразно изменяться напряжение на индуктивности?

Обоснуйте теоретически свой ответ.

6.5. Как определить масштаб по оси X осциллографа ?

6.6. Как определить масштаб по оси Y осциллографа ?

6.7. Как определяется постоянная времени цепи расчетным и экспериментальным путем?

6.8. Как определяются зависимые начальные условия ?

6.9. Как определить принужденные величины ?

6.10. Почему свободный процесс является затухающим?

6.12. Какие цепи называют цепями первого порядка?



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное изучение и получение практических навыков расчета переходных процессов в последовательной цепи R, C.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Переходными называют процессы, возникающие в электрических цепях при их переходе из одного установившегося состояния в другое. Такие процессы возникают при коммутационных изменениях в цепях (включение, отключение источников энергии, изменение параметров цепи и т. д.). Момент коммутации обычно принимают за начало отсчета времени процессов.

2.2. При теоретическом анализе переходных процессов в электрических цепях записывают и решают уравнения законов Кирхгофа для мгновенных значений токов и напряжений. Если дифференциальное уравнение имеет первый порядок, то и цепь, которое оно описывает, называют цепью первого порядка. Для исследуемой цепи, изображенной на рис.1а, при включении ее на постоянное напряжение уравнение имеет вид:

$$U = Ri + u_c .$$

Оно включает две переходные величины - ток и напряжение на емкости. Как известно, ток в емкости

$$i = C du_c / dt .$$

После подстановки значения тока в уравнении остается одна переходная величина - напряжение на емкости:

$$U = RC \frac{du_c}{dt} + u_c .$$

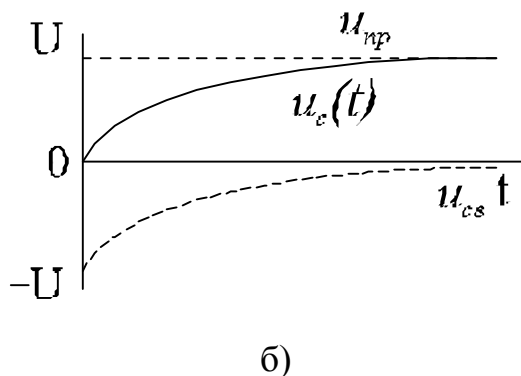
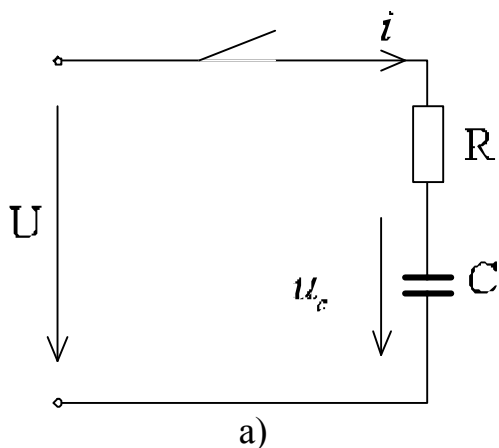


Рис. 1. Цепь с последовательным соединением R, C элементов: а) схема цепи; б) переходное напряжение на емкости при включении питания.

Решение дифференциальных уравнений первого порядка представляют как сумму принужденной и свободной составляющих:

$$u_c = u_{c\text{ пр}} + u_{c\text{ св}},$$

где  $u_c$  - переходное напряжение на емкости;

$u_{c\text{ пр}}$  - принужденное напряжение, т.е. напряжение, которое установится на емкости по окончании переходного процесса;

$u_{c\text{ св}}$  - свободное напряжение, представляющая разность переходного и принужденного значения напряжения.

Аналогичный вид имеют другие переходные величины, характеризующие цепь. Свободные величины в цепях первого порядка изменяются по экспоненциальному закону:

$$u_{c\text{ св}}(t) = Ae^{pt},$$

где  $A$  - постоянная интегрирования;

$p$  - корень характеристического уравнения.

2.3. Принужденная составляющая определяется как напряжение (или ток) установившегося режима, к которому вынуждает приложенное к цепи напряжение. В рассматриваемом случае  $u_{c\text{ пр}} = U$ .

2.4. Для определения  $p$  нужно составить характеристическое уравнение, которое записывается для свободных величин цепи (полагают, что источники электрической энергии в цепи отсутствуют). Для этого обычно размыкают любую ветвь цепи и определяют входное сопротивление по отношению к разомкнутой ветви, полагая индуктивное сопротивление равным  $pL$ , а емкостное -  $1/pC$ . Приравняв это входное сопротивление нулю, записывают характеристическое уравнение исследуемой цепи. Так для схемы рис.1а имеем:  $Z(p) = R + 1/pC$ , откуда

$$p = -1/RC.$$

В соответствии с затухающим характером свободных величин  $p$  всегда будет отрицательным числом. При записи уравнений и построении графиков пользуются также понятием постоянной времени цепи:

$$\tau = 1/|p| = RC.$$

Это время, в течение которого свободная составляющая уменьшается в  $e = 2,71$  раза. Практически считается, что за  $t = 5\tau$  переходный процесс заканчивается.

2.5. Постоянная интегрирования определяется в соответствии с законом коммутации для емкости, который устанавливает невозможность скачкообразного изменения напряжения на емкости:

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

Напряжение на элементе  $C$  в момент коммутации имеет то же значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, и далее изменяется, начиная именно с этого значения. Записав решение  $i(t) = i_{\text{пр}} + Ae^{pt}$  дифференциального уравнения для  $t = 0$  и, учитывая, что до коммутации напряжения на емкости не было, т.е.  $u_c(0+) = u_c(0-) = 0$ , можно определить постоянную интегрирования  $A$ :  $0 = U + A$ , откуда  $A = -U$ .

2.6. Окончательно решение дифференциального уравнения принимает вид:

$$u_c = u_{c\text{ пр}} + u_{c\text{ св}} = U - Ue^{-t/RC} = U(1 - e^{-t/RC}).$$

2.7. По графику свободной составляющей можно определить постоянную времени. Например, по времени, в течении которого свободная составляющая уменьшается в два раза:  $t = \tau \cdot \ln 2 = 0,69\tau$ .

Постоянная времени может быть также определена как длина подкасательной к экспоненте в любой точке графика.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Начертить схему для исследования переходного процесса в цепи R, C.

Для изучения переходных процессов в цепи с помощью осциллографа в лаборатории применена схема (рис.2), обеспечивающая многократное повторение процессов.

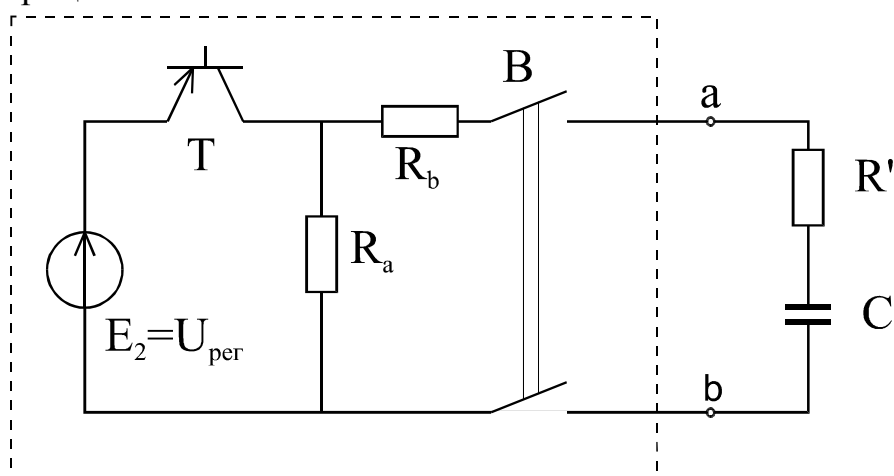


Рис.2. Схема исследуемой цепи (часть цепи, обведенная пунктирной линией, смонтирована на стенде)

Коммутация обеспечивается периодическим открытием и закрытием транзистора T, управляемого генератором звуковой частоты (ГЗ). Тумблер B должен быть всегда замкнут. При этом процесс включения (при открытии T) происходит по цепи  $E_2 - R_b - B - R' - C - B - E_2$ , а процесс отключения - по цепи  $R_a - R_b - B - R' - C - B - R_a$ .

На экране осциллографа наблюдаются оба переходных процесса с различными начальными условиями и постоянными времени.

3.2. Рассчитать постоянную времени  $\tau_{вкл}$  исследуемой цепи при включении транзистора в проводящее состояние (в данном состоянии сопротивление транзистора считать равным нулю) и постоянную времени  $\tau_{откл}$  цепи - при отключении транзистора (проводимость транзистора положить равной нулю). Определить для указанных цепей переходные величины тока через индуктивный элемент и напряжения на нем. При расчетах принять  $R_a = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_b = 47 \text{ Ом}$ .

3.3. Подготовить прозрачную бумагу (кальку) для снятия осциллограмм.

### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Подключить осциллограф к зажимам a, b (вместо цепи R', C) и получить на экране осциллографа прямоугольные импульсы напряжения.

Для получения прямоугольных импульсов необходимо включить тумблер В на панели переменного тока и тумблер  $E_2$  на панели постоянного тока. Установить частоту на звуковом генераторе  $f \leq 1/6\tau_{\text{макс}}$ , где  $\tau_{\text{макс}}$  - максимальная из  $\tau_{\text{вкл}}$  и  $\tau_{\text{откл}}$  постоянных времени при включении цепи к источнику напряжения и ее отключении. Ручкой "Рег. выхода" генератора добиться примерно одинаковых длительности импульсов и промежутков между ними. Уровень напряжения импульсов регулируется ручкой  $U_{\text{рег}}$  на панели постоянного тока. Величину напряжения можно измерить вольтметром, имеющимся на той же панели.

4.2. Снять осциллограмму прямоугольных импульсов и определить масштабы по осям X и Y осциллографа.

Масштаб напряжений  $m_u$  при данном усилении по оси Y осциллографа определяется по измеренному в п. 4.1 напряжению.

Масштаб времени  $m_t$  осциллографа определяется по частоте звукового генератора.

4.3. Присоединить к зажимам а и б цепь R, C, включив в качестве сопротивления резистор R', а в качестве емкости - конденсатор C<sub>3</sub>. Снять осциллограммы напряжения на резисторе R' и емкости C<sub>3</sub>.

4.4. На всех осциллограммах указать оси координат, масштабы напряжения, тока и времени.

4.5. Определить по осциллограммам постоянные времени цепи, начальные и принужденные значения величин и сравнить их с расчетными.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему эксперимента, расчет переходных процессов цепи при включении и отключении источника напряжения, осциллограммы, выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

6.1. Как составить характеристическое уравнение заданной цепи ?

6.2. Какова теоретически и практически длительность переходных процессов?

6.3. Как формулируется закон коммутации для емкости ?

6.4. Почему не может скачкообразно изменяться напряжение на емкости?

6.5. Как определить масштаб по оси X осциллографа в работе?

6.6. Как определить масштаб по оси Y осциллографа в работе?

6.7. Как определяется постоянная времени электрической цепи расчетным и экспериментальным путем?

6.8. Как определяются зависимые начальные условия электрической цепи?

6.9. Почему свободный процесс цепи является затухающим?

6.10. Чему равно начальное значение тока при включении цепи к источнику постоянного напряжения и его отключении ?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ВТОРОГО ПОРЯДКА

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение переходных процессов в цепях, содержащих индуктивность, емкость и сопротивление, а также получение практических навыков расчета переходных процессов в цепях второго порядка.

### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Под цепями второго порядка понимают электрические цепи, переходные процессы в которых описываются дифференциальными уравнениями 2-го порядка. Для таких цепей характеристическое уравнение будет квадратным. При последовательном соединении R, L, C, включаемом на постоянное напряжение, дифференциальное уравнение цепи имеет вид

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt$$

или после дифференцирования:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0 .$$

Соответственно характеристическое уравнение, определенное, как и ранее, по входному сопротивлению, записывается в форме

$$Z(p) = pL + R + 1/pC = 0 \text{ или } LCp^2 + RCp + 1 = 0 .$$

Его решение имеет вид:

$$p_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}{2LC} .$$

В зависимости от соотношения между  $R^2C^2$  и  $4LC$  корни уравнения могут быть вещественными различными при  $R > 2\sqrt{L/C}$ , вещественными равными при  $R = 2\sqrt{L/C}$  и комплексными при  $R < 2\sqrt{L/C}$ . Так как свободные составляющие токов цепи затухают, то корни должны быть отрицательными или должны иметь отрицательную вещественную часть.

2.2. В рассматриваемом случае  $i_{пр} = 0$ , тогда

$$i = i_{пр} + i_{св} = i_{св} .$$

При вещественных различных корнях свободная составляющая является суммой двух экспонент:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} ,$$

при этом ток не меняет знака, а процесс называется аperiodическим. Если корни равны друг другу ( $p_1 = p_2 = p$ ), то

$$i_{св} = (A_3 + A_4 t) e^{pt} .$$

Это предельный случай аperiodического процесса.

При комплексных корнях вида  $p_{1,2} = -b \pm j\omega_0$  свободную составляющую записывают так:  $i_{св} = ke^{-bt} \sin(\omega_0 t + \alpha)$ . Такой переходный процесс называют колебательным. Он описывается затухающей синусоидой с постоянными интегрированиями  $k$  и  $\alpha$ .

Постоянные интегрирования во всех случаях определяются на основе законов коммутации для тока в индуктивности и напряжения на емкости при  $t = 0$  таким же образом, как это описано в работах №11, 12 по исследованию цепей  $R, L$  и  $R, C$ .

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Начертить схему для исследования переходных процессов в цепи  $R, L, C$ , включаемой на постоянное напряжение. В работе применяются те же способы создания и наблюдения переходных процессов, что и в работах №11, 12. Вместо  $R, L$  или  $R, C$  цепей к зажимам  $a$  и  $b$  подключается исследуемая  $R, L, C$  цепь при последовательном соединении элементов (рис.1). Здесь также наблюдаются два переходных процесса одновременно. Первый процесс - включение  $E_2$  к цепи  $R_b - R' - R_x - L_1 - C_3$  при нулевых начальных условиях, а второй процесс - подключение цепи  $R' - R_x - L_1 - C_3$  к последовательно соединенным  $R_a$  и  $R_b$  резисторам при ненулевых начальных условиях.

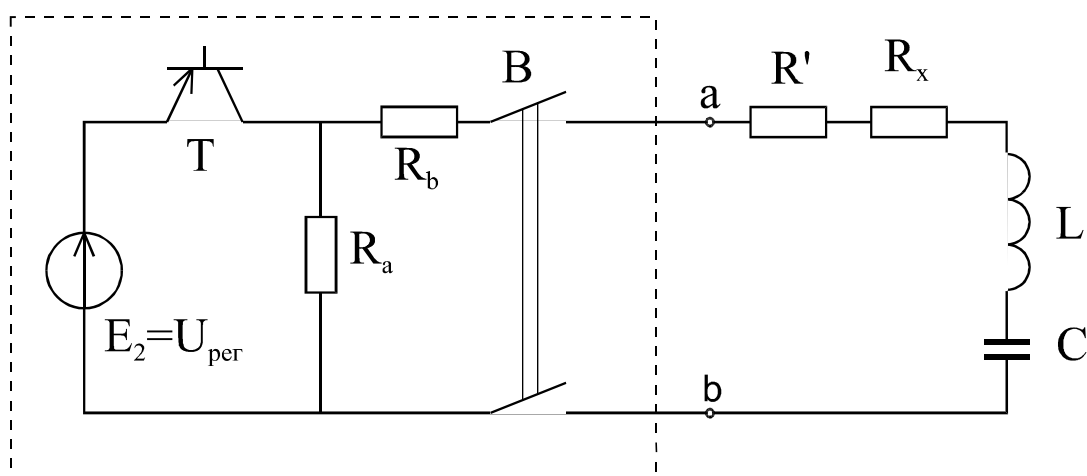


Рис.1. Схема исследуемой цепи ( часть схемы, обведенная пунктирной линией, смонтирована на стенде)

3.2. Приняв в качестве  $R_x$  значение сопротивлений  $R_1, R_2, R_3, R_4$  стенда, а  $R_a = 200 \text{ Ом}$ ,  $R_b = 47 \text{ Ом}$ . рассчитать корни характеристического уравнения электрических цепей, получающихся при включении и отключении транзистора, и определить какое значение сопротивления  $R_x$  позволяет наблюдать на одной осциллограмме аperiodический и колебательный процессы в цепи рис.1.

3.3. Подготовить прозрачную бумагу для снятия осциллограммы.

### 4. ПРОГРАММЫ РАБОТЫ

4.1. Собрать схему рис.1., включив в качестве  $R_x$  резистор, позволяющий наблюдать на одной осциллограмме апериодический и колебательный процессы. Если это оказалось невозможным, принять  $R_x = R_1$ .

4.2. Снять осциллограммы напряжений на  $R'$ ,  $L_1$ ,  $C_3$  элементах, нанести на них оси координат, отметить моменты начала первого и второго переходных процессов.

Методика подготовки источника прямоугольных импульсов изложена в работах №11, 12.

4.3. Собрать схему рис.2. и снять осциллограммы напряжений на  $R'$  и  $C_3$  при переключении этой схемы к зажимам а и б схемы рис.1.

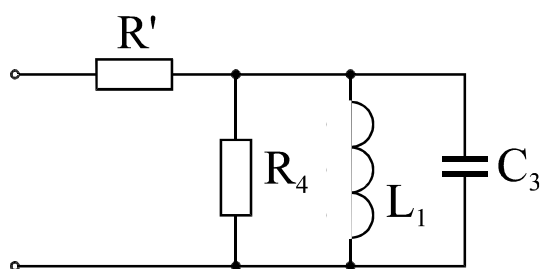


Рис.2. Схема параллельного соединения

Построить на осциллограммах оси координат и отметить моменты начала первого и второго переходных процессов.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, расчет корней характеристического уравнения цепей при  $R_x$ , равным соответственно  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , осциллограммы переходных процессов, выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Какой характер имеет переходный процесс в цепях второго порядка при вещественных корнях характеристического уравнения?

6.2. Какой характер имеет переходный процесс в цепях второго порядка при комплексных сопряженных корнях характеристического уравнения?

6.3. Содержат ли напряжения на элементах  $R'$ ,  $L_1$  и  $C_3$  в цепях рис.1 и 2 принужденные составляющие? Если да, то как их определить?

6.4. Как рассчитать начальные условия для цепей рис.1 и 2 ?

6.5. Дайте подробные объяснения вида всех осциллограмм, полученных при выполнении работы.

## Лабораторная работа №14

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

#### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является освоение методики снятия вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и графического метода расчета цепей постоянного тока с нелинейными элементами.

#### 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Нелинейными элементами (НЭ) электрической цепи постоянного тока называются такие элементы, у которых зависимость тока от приложенного напряжения является нелинейной, т.е. выражается графиком отличающимся от прямой линии. Графики  $U(I)$  или  $I(U)$  называют вольт-амперными характеристиками (ВАХ). В зависимости от вида этих характеристик различают НЭ с симметричной и несимметричной вольт-амперными характеристиками. Нелинейные элементы, у которых ВАХ не зависит от направления тока (или напряжения), называются симметричными. Примером могут служить электрические лампы накаливания. У несимметричных нелинейных элементов ВАХ зависит от направления тока. Примером последних могут служить различные диоды (полупроводниковые, электронные). На рис.1 приведены ВАХ лампы накаливания (симметричная характеристика) и диода (несимметричная характеристика).

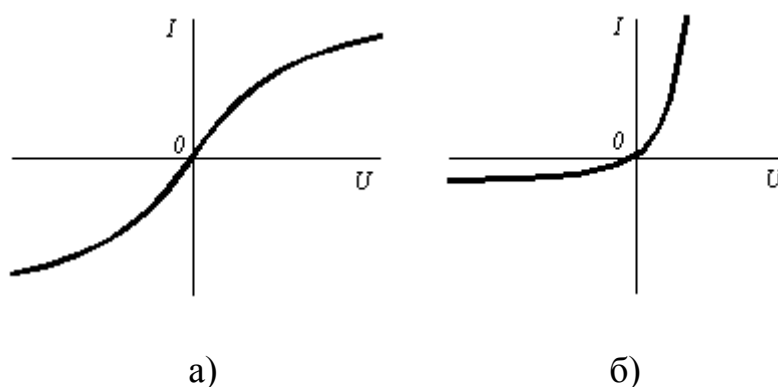


Рис.1. ВАХ нелинейных элементов: а - лампы накаливания; б - диода

2.2. Наиболее общим методом расчета электрических цепей с НЭ является графический. При последовательном соединении двух НЭ через них проходит один и тот же ток, а сумма напряжений на них равна приложенному напряжению. Поэтому суммарную результирующую ВАХ последовательного соединения НЭ можно построить, суммируя напряжения ВАХ обоих НЭ для одного и того же значения тока.



При параллельном соединении двух НЭ напряжение на них одно и то же, а ток источника равен сумме токов обоих НЭ. Суммарная ВАХ может быть построена путем сложения токов обоих НЭ при одном и том же значении напряжения.

При анализе смешанного соединения сначала находят ВАХ параллельного соединения R и НЭ2 (на рис.2, б эта характеристика построена суммированием ординат характеристик R и НЭ2 и обозначается R,НЭ2). Затем строят общую ВАХ цепи, складывая абсциссы ВАХ параллельного соединения R,НЭ2 и ВАХ НЭ1.

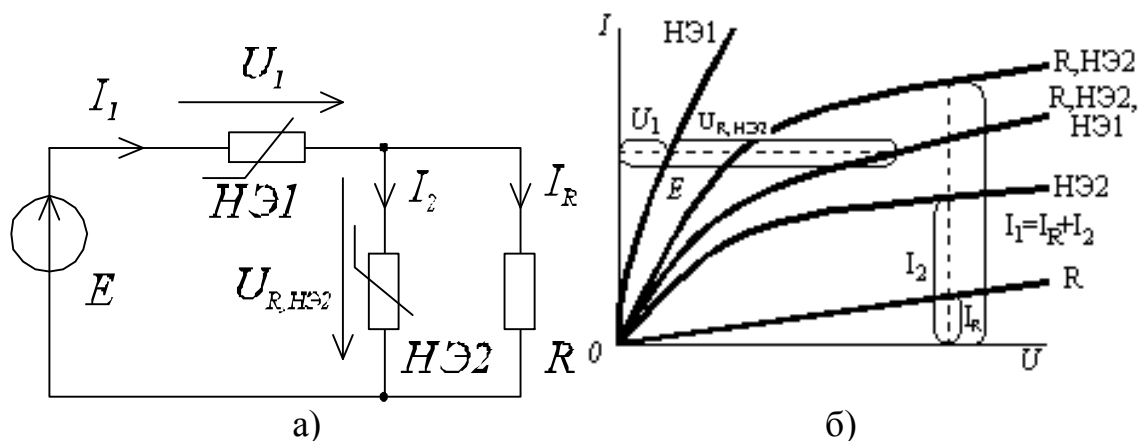


Рис.2. Расчет цепи с НЭ при смешанном соединении: а - смешанное соединение НЭ, б - графическое решение.

По полученным характеристикам можно легко определить токи и напряжения всех элементов цепи. Например, по обозначенному на рис.2,б значению E и характеристикам НЭ1 и R, НЭ2 можно найти напряжение  $U_1$  и  $U_{R,НЭ2}$  и т.д.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Начертить схему для снятия ВАХ с источником напряжения. Рекомендуется схема, изображенная на рис.3.

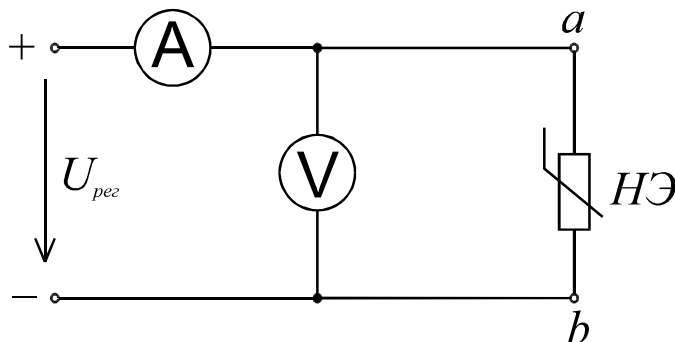


Рис.3. Схема для снятия ВАХ.

3.2. Подготовить таблицу для снятия ВАХ НЭ1, НЭ2 и R (табл.1).

Таблица 1

$U_{\text{рег}}$ , В	Прямая полярность						Обратная полярность					
$I_{\text{НЭ1}}$ , мА												
$I_{\text{НЭ2}}$ , мА												

3.3. Начертить схему смешанного соединения нелинейных и линейных элементов, предусмотрев изменение тока и напряжения на входе цепи при ее питании от источника регулируемого напряжения (рис.4).

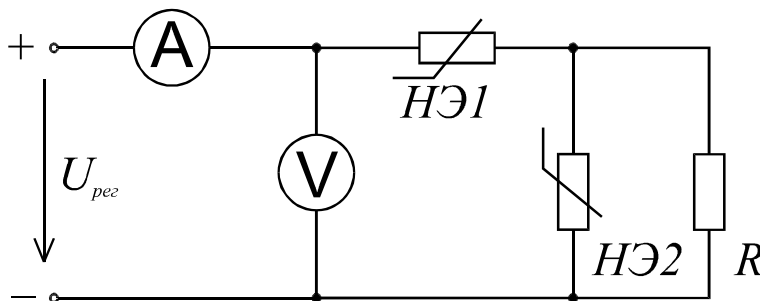


Рис.4. Смешанное соединение НЭ1 , НЭ2 и линейного элемента R

3.4. Подготовить таблицу для записи результатов исследования смешанного соединения (табл.2)

Таблица 2.

$U_{\text{рег}}$ , В							
Экспериментальный $I$ , мА							
Расчетный $I$ , мА							

3.5. Подготовить миллиметровую бумагу (или клетчатую) для построения ВАХ всех элементов и смешанного соединения.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Собрать схему рис.3 и снять ВАХ НЭ1, НЭ2 и R. В качестве R использовать регулируемое сопротивление стенда, установив ручку его регулировки примерно в среднее положение (далее не менять!). Для изменения полярности поменять местами подключение зажимов а и б к исследуемому элементу (рис.3). Данные измерения занести в табл.1. Начертить ВАХ НЭ1, НЭ2 и R. Проверить, симметричны ли элементы.

4.2. Собрать схему смешанного соединения (рис.4), включив диод (НЭ1) в проводящем направлении. Регулируя  $U_{\text{рег}}$ , снять ВАХ смешанного соединения. Данные занести в табл.2. Построить ВАХ смешанного соединения.

4.3. Выполнить по снятым в п. 4.1 ВАХ графический расчет смешанного соединения. Данные расчета занести в табл.2 и сравнить с данными эксперимента.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схемы экспериментов, таблицы результатов, ВАХ элементов и цепей, использованные расчетные соотношения и краткие выводы.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Дайте определение нелинейному электрическому элементу.
- 6.2. Сформулируйте определение нелинейной электрической цепи.
- 6.3. Что понимается под ВАХ электрического элемента?
- 6.4. Чем отличаются ВАХ симметричных и несимметричных элементов?
- 6.5. Почему метод наложений не применяется при расчете нелинейных цепей?
- 6.6. В чем состоит графический метод расчета цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях элементов?
- 6.7. Поясните сущность других методов расчета электрических цепей с НЭ?

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОЙ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1. Целью работы является приобретение навыков экспериментального снятия вольт-амперных характеристик с ферромагнитным сердечником на различных частотах переменного тока, определение эквивалентной индуктивности и наблюдение кривых тока в катушке на экране электронного осциллографа.

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. Индуктивная катушка с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока является нелинейным элементом, что объясняется нелинейной зависимостью между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля сердечника, а следовательно, и между им пропорциональным потокосцеплением  $\Psi$  и током  $I$  катушки. Для относительно небольших токов (при отсутствии насыщения сердечника) кривые тока в катушке близки к синусоиде при синусоидальном напряжении на ее зажимах. С ростом тока, а следовательно, и насыщении сердечника кривые тока становятся несинусоидальными с наиболее выраженными 1-й и 3-й гармониками.

2.2. ВАХ индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником  $U_k = f(I_k)$ , снятая для действующих значений  $U_k$  и  $I_k$ , по своему характеру подобно кривой намагничивания  $B = f(H)$ . Поэтому индуктивность для такой катушки является переменной величиной и уменьшается с возрастанием действующего значения тока, т.е. по мере насыщения сердечника.

Для упрощения расчета электрических цепей, содержащих катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником, заменяют в действительности несинусоидальные токи и напряжения эквивалентными синусоидальными величинами (эквивалентность в смысле действующего значения). При этом пренебрегают потерями энергии, обусловленными гистерезисом и вихревыми токами в сердечнике, а также активным сопротивлением обмотки катушки в виду их малости. При данных условиях катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником можно охарактеризовать эквивалентной индуктивностью

$$L_{\text{э}} = U_k / \omega I_k, \quad \omega = 2\pi f,$$

которая зависит от действующего значения тока, но постоянна во времени. Такие элементы, для которых зависимость между действующими значениями напряжения и тока нелинейна, а между их мгновенными значениями линейна, называют условно нелинейными.

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

3.1. Начертить схему для снятия ВАХ индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником (рис.1).

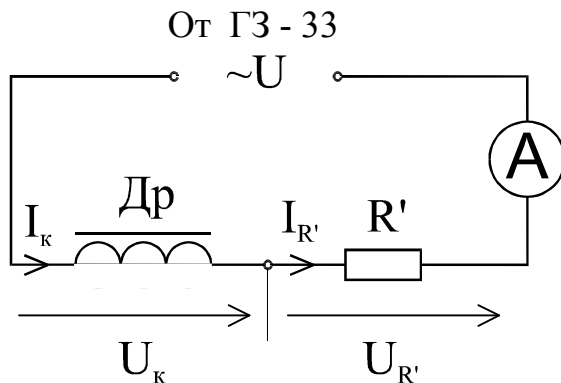


Рис.1. Схема для снятия ВАХ индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником

ВАХ снимаются на частотах 1, 2, 3 кГц при токе от 0 до 100 мА.

Указание. Объектом исследования является индуктивная катушка, выполненная на тороидальном ферромагнитном сердечнике и обозначенная на стенде "Др" (дроссель).

Средствами исследования являются генератор звуковой частоты ГЗ-33, используемый как источник переменного напряжения различной частоты, электронно-лучевой осциллограф для наблюдения кривых токов катушки, электронный вольтметр ВЗ-38 или ВЗ-6, используемый для измерения напряжения на катушке. Для измерения тока катушки можно использовать комбинированный цифровой прибор типа Щ4300 в режиме измерения тока. Ток катушки можно определить с помощью электронного вольтметра путем измерения напряжения на сопротивлении  $R' = 100 \text{ Ом}$ . Тогда  $I_k = I_{R'} = U_{R'}/R'$ .

3.2. Подготовить таблицу для снятия ВАХ и определения эквивалентной индуктивности катушки:

Ток $I_k$ , мА		5	10	20	40	70	100
$f_1=1\text{кГц}$	$U_k$ , В						
	$L_{э}$ , мГн						
$f_2=2\text{кГц}$	$U_k$ , В						
	$L_{э}$ , мГн						
$f_3=3\text{кГц}$	$U_k$ , В						
	$L_{э}$ , мГн						

3.3. Указать на схеме для снятия ВАХ места подключения осциллографа (стрелками) для наблюдения кривых тока и напряжения катушки.

3.4. Подготовить лист прозрачной бумаги (кальки) для снятия осциллограмм тока и напряжения.

3.5. Подготовить миллиметровую бумагу (или клетчатую) для построения зависимостей  $U_k = f(I_k)$  - трех кривых и  $L_{\text{э}} = f(I_k)$  - трех кривых.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Собрать схему рис.1. Установить на генераторе ГЗ-33 с помощью ручек "Частота" и "Множитель" нужную частоту синусоидальных колебаний согласно таблице. С помощью переключателя-аттенюатора "Предел шкалы", "Ослабление" установить предельное значение выходного напряжения 10 или 20В в зависимости от величины тока катушки. Изменяя плавно величину выходного напряжения генератора с помощью ручки "Рег. выхода", добиться показаний амперметра, соответствующих значениям тока катушки, указанным в таблице, после чего измерить напряжение на катушке  $U_k$  с помощью электронного вольтметра и занести его значение в таблицу. Рассчитать эквивалентную индуктивность  $L_{\text{э}}$ . Заполнить таблицу.

4.2. По данным, полученным в пункте 4.1, построить ВАХ и графики  $L_{\text{э}} = f(I_k)$ .

4.3. Снять осциллограммы тока и напряжения на катушке для токов 10 и 100 мА и частоте 3кГц (4 осциллограммы).

#### 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему эксперимента, таблицу результатов, снятые характеристики, осциллограммы, а также анализ результатов и выводы.

#### 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Дайте определение нелинейному электрическому элементу.

6.2. Какие нелинейные элементы называют условно нелинейными?

6.3. Чем объясняется нелинейность катушки с ферромагнитным сердечником?

6.4. Что называется эквивалентной индуктивностью катушки с ферромагнитным сердечником?

6.5. В чем заключается метод эквивалентных синусоид при анализе цепей, содержащих катушки с ферромагнитным сердечником?

6.6. Почему в цепях с нелинейным элементом появляются токи высших гармоник?

Лабораторная работа №16

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение режимов работы цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных между собой индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора.

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. В электрической цепи, содержащей обычный конденсатор с линейной ВАХ и индуктивную катушку с ферромагнитным сердечником (нелинейная индуктивность) при их последовательном соединении, плавное изменение напряжения на зажимах цепи может вызвать скачек фазы и амплитуды основной гармоники тока.

Режим работы этой электрической цепи, при котором первая гармоника тока в цепи совпадает по фазе с напряжением на ее зажимах, называется феррорезонансом напряжений, а сама цепь - феррорезонансной.

2.2. При анализе феррорезонансных цепей можно принять упрощение, согласно которому в действительности несинусоидальные напряжения, токи и магнитные потоки заменяются эквивалентными синусоидами, а индуктивность принимается зависящей от действующего значения тока, но постоянной во времени. Кроме того, можно приближенно считать, что все элементы феррорезонансной цепи не имеют активных потерь. Такое упрощение позволяет пользоваться векторными диаграммами для определения вольт-амперных характеристик (ВАХ) феррорезонансных цепей, правильно отражающих качественную сторону явления.

2.3. Для последовательной феррорезонансной цепи (рис.1, а) ток в обоих элементах одинаков, а напряжения  $u_k(t)$  и  $u_c(t)$  противоположны по фазе.

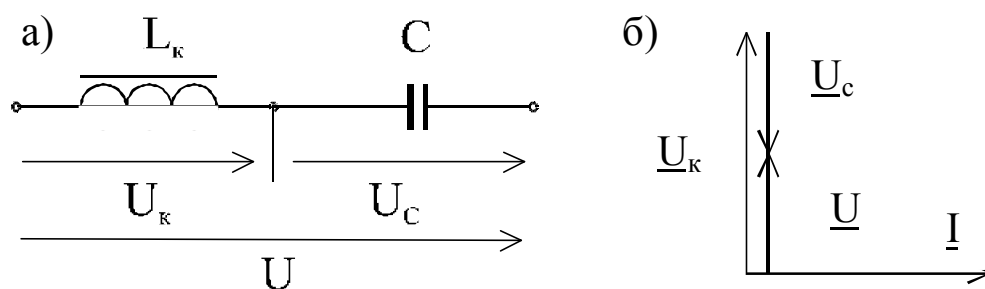


Рис.1. Последовательная феррорезонансная цепь: а) схема цепи; б) ее векторная диаграмма.

Поэтому, пренебрегая активными потерями, векторная диаграмма цепи может быть представлена рис.1,б, в соответствии с которой действующее значение напряжения на зажимах цепи  $U = |U_k - U_c|$ .

На рис.2 приведены ВАХ последовательной феррорезонансной цепи при питании ее от источника переменного регулируемого напряжения. Экспериментально снятая ВАХ (изображена пунктиром) отличается от теоретической, которая не учитывает активных потерь. При увеличении напряжения имеет место скачок тока от точки 1 к точке 2, а при уменьшении - от точки 3 к точке 4.

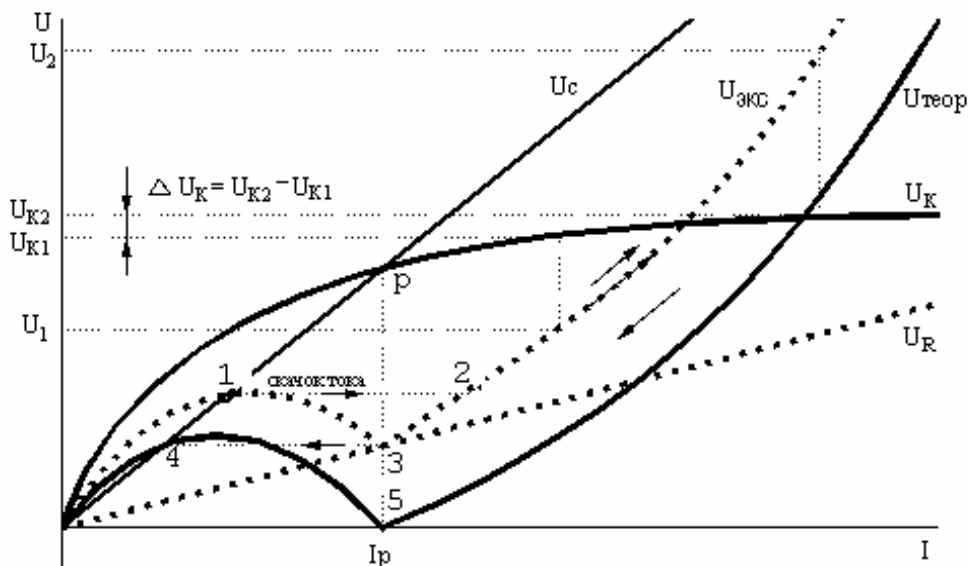


Рис.2. ВАХ последовательной феррорезонансной цепи.

Участок 1-3 не является рабочим и может быть построен только при питании от источника регулируемого тока. Току  $I_p$  соответствует минимальное напряжение  $U_{35}$ , равное активной составляющей напряжения  $U$ . При этом эквивалентные синусоиды напряжения и тока совпадают по фазе, а  $U_k = U_c$  т.е.  $\omega L_3 \cong 1/\omega C$ , откуда

$$L_3 = 1/\omega^2 C, \quad \omega = 2\pi f.$$

Точка 3 соответствует резонансу напряжений. Из рис.2 видно, что при изменении напряжения  $U$  от  $U_1$  до  $U_2$  напряжение  $U_k$  изменяется в очень малых пределах от  $U_{k1}$  до  $U_{k2}$ . Поэтому последовательная феррорезонансная схема рис.1,а может быть использована в качестве стабилизатора напряжения, на входе которого напряжение равно  $U$ , а на выходе  $U_k$ .

### 3. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ.

3.1. Составить и вычертить схему для снятия ВАХ последовательной феррорезонансной цепи, в которой предусмотреть возможность подключения электронного осциллографа для наблюдения кривых тока в цепи. Подготовить таблицу для записи результатов эксперимента.

Указание. Элементами исследуемой последовательной феррорезонансной цепи является индуктивная катушка (дроссель "Др"), один из конденсаторов  $C_1$ ,  $C_3$  или  $C_5$  и резистор  $R'$ , включенный последовательно в цепь для определения тока путем измерения напряжения на нем. Для исследования используются



звуковой генератор ГЗ-33, электронный вольтметр ВЗ-38 или ВЗ-6, электронный осциллограф.

3.2. Для имеющихся на стенде конденсаторов  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_5$  построить ВАХ при частотах 1, 2 и 3 кГц и токе от 0 до 100 мА, используя для расчета уравнение

$$U_C = \frac{I}{2\pi f C} .$$

Характеристики построить для каждой частоты отдельно (3 чертежа). Величины емкостей конденсаторов принять по данным стенда в лаборатории.

3.3. Подготовить лист прозрачной бумаги для снятия осциллограмм.

3.4. На кривых ВАХ конденсаторов полученных в п.3.2. построить дополнительно снятые в лабораторной работе №15 ВАХ катушки с сердечником.

3.5. По построенным совместно характеристикам конденсаторов и катушки с сердечником, полученным в п.п. 3.2 и 3.4, определить предварительно частоту и величину емкости конденсатора при которых возможен феррорезонанс напряжения.

#### 4. ПРОГРАММА РАБОТЫ

4.1. Согласовать с преподавателем схему для проведения работы, выбранные частоту и емкость конденсатора.

4.2. Снять характеристики  $U = f(I)$  для последовательной феррорезонансной цепи при плавном увеличении и уменьшении напряжения.

При снятии характеристики особенно внимательно проводить замеры в точках, в непосредственной близости от которых возникает скачкообразное изменение тока (триггерный эффект). Результаты вычислений занести в таблицу.

$f =$ $c =$	При увеличении напряжения						При уменьшении напряжения					
U, В												
I, мА												
Скачок тока												
от							от					
	до					мА		до				мА

Подключить осциллограф к сопротивлению  $R'$  и зарисовать кривую тока цепи для режима близкого к резонансному.

Указание. В некоторых случаях при снятии характеристик  $U = f(I)$  для того, чтобы скачки тока были лучше заметны, целесообразно уменьшить  $R'$ . Для этого его заменяют сопротивлением  $R_{рег}$ , имеющимся на стенде постоянного тока. Удобно устанавливать сопротивления порядка 10, 20, 40, 50

Ом, а измерения производить универсальным цифровым прибором Щ4300 или методом амперметра и вольтметра.

4.3. По данным таблицы построить вольт-амперные характеристики при увеличении и уменьшении напряжения.

4.4. Рассчитать значение эквивалентной индуктивности в момент феррорезонанса.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему эксперимента, таблицу результатов, характеристики, осциллограмму тока, определение эквивалентной индуктивности и вывод.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

6.1. Дайте определение явления феррорезонанса напряжений.

6.2. Чем отличается явление феррорезонанса от резонанса в линейных цепях ?

6.3. Почему экспериментально снятые характеристики отличаются от идеальных ?

6.4. Каким образом можно получить экспериментально всю характеристику  $U = f(I)$  исследуемой цепи?

6.5. Объясните принцип использования последовательной феррорезонансной цепи в качестве стабилизатора напряжения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1978. - 528 с.
3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Ч.1. Линейные электрические цепи. - М.: Энергия, 1978. - 592 с.
4. Теоретические основы электротехники. Ч.2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. /Г.И. Атабеков, С.Д. Купалян, А.Б. Тимофеев, С.С. Хухриков. - М.: Энергия, 1979. - 432с.
5. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. - Л.: Энергоиздат, 1961. Т.1 - 536 с.; Т.2 - 416 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №9. Исследование симметричного четырехполюсника.....	4
Лабораторная работа №10. Несинусоидальные периодические токи и напряжения.....	8
Лабораторная работа №11. Исследование переходных процессов в цепи с последовательным соединением резистивного и индуктивного элементов....	13
Лабораторная работа №12. Исследование переходных процессов в цепи с последовательным соединением резистивного и емкостного элементов .....	17
Лабораторная работа №13. Исследование переходных процессов в цепях второго порядка .....	21
Лабораторная работа №14. Исследование цепи постоянного тока с нелинейными элементами .....	24
Лабораторная работа №15. Исследование индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником .....	28
Лабораторная работа №16. Исследование феррорезонанса напряжений .....	31
Библиографический список .....	35

Рассмотрено на  
заседании кафедры ЭиЭО.  
Протокол № от  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_Б.В. Сухинин

Нормоконтролер,  
ответственный по  
стандартизации  
на кафедре  
\_\_\_\_\_В.М. Глазов