

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ №142**

К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ НА СТЕНДАХ ТИПА УИЛС ПО  
КУРСАМ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ», «ОСНОВЫ ТЕОРИИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ» И «ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ».  
РАЗДЕЛ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.  
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ»

Донецк 2000 г

Электронный вариант.

Методические указания №142 к выполнению расчетно-лабораторных работ на стендах типа УИЛС по курсам «Теоретические основы электротехники», «Основы теории электрических цепей» и «Теория электрических и магнитных цепей». Раздел «Переходные процессы в электрических цепях. Нелинейные цепи»

Содержатся общие сведения и технические данные стендов типа УИЛС, описание 5-ти лабораторных работ по исследованию переходных процессов в линейных электрических цепях и стационарных процессов в нелинейных электрических цепях постоянного и переменного тока.

Лабораторные работы выполняются на основе предварительных домашних расчетов исследуемых цепей и могут быть использованы студентами специальностей: АТ («Системы управления и автоматики»), ТКС («Телекоммуникационные системы и сети»), ВТ («Компьютерные системы и сети»), СП («Системное программирование») всех форм обучения.

Составители :

Денник В.Ф. – проф.;  
Мерзликин Э.С. – доц.;  
Михайлов В.Е. – доц.;  
Федоров М.М. – доц.

Ответственный за выпуск доц. Михайлов В.Е.

## Общие сведения о стенде УИЛС-2

Универсальные учебно-исследовательские лабораторные стенды типа УИЛС разработаны сотрудниками кафедры теоретических основ электротехники и экспериментального завода Одесского политехнического института.

Стенды предназначены для выполнения комплекса лабораторных работ по I и II частям курсов “Теоретические основы электротехники” и “Основы теории электрических цепей”, расчетно-лабораторных заданий и учебно-исследовательских работ студентов.

Питание стенда (Рис.1) осуществляется от сети трехфазного напряжения 380, 220, 127 В. Потребляемая мощность не более 500 ВА. Стенд имеет блоки питания постоянного, однофазного и трехфазного переменного тока, блоки пассивных R, L, C - элементов и наборное поле. Все блоки питания стенда снабжены электронной защитой, срабатывающей при токах 1 А. На задней стенке стенда имеются розетки напряжением 220 В для питания измерительных приборов. Каждому стенду придается комплект-набор съемных R, L, C -элементов, соединительных проводов и перемычек в виде штепсельных вилок.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТЕНДА УИЛС-2

## 1. Блоки источников энергии.

№ П/П	Наименование источников	U, В	I, А	f, Гц	R <sub>вн</sub> , Ом
1	Источник нерегулируемого постоянного напряжения	20	1	-	5-6,5
2	Источник регулируемого постоянного напряжения	0-24	1	-	1,4-2,2
3	Источник однофазного переменного напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы	0-24	1	1000-8000	-
4	Источник трехфазного напряжения	0-40	1	50	-

## 2. Блоки пассивных элементов

R	R <sub>1</sub> =100 Ом P <sub>доп</sub> =10 Вт	R <sub>2</sub> =200 Ом P <sub>доп</sub> =10 Вт	R <sub>3</sub> =400 Ом P <sub>доп</sub> =7,5-15 Вт	R <sub>4</sub> =0-1000 Ом P <sub>доп</sub> =2 Вт
C	C <sub>1</sub> =5 мкФ	C <sub>2</sub> =10 мкФ	C <sub>3</sub> =20 мкФ	C <sub>4</sub> =0-10 мкФ
L	L <sub>1</sub> =175 мГн R <sub>L</sub> =3,75 Ом	L <sub>2</sub> =690 мГн R <sub>L</sub> =21 Ом	L <sub>3</sub> =5,5 Гн R <sub>L</sub> =6,5 Ом	L <sub>4</sub> =0-100 мГн R <sub>L</sub> =0-52 Ом
Элементы L <sub>1</sub> и L <sub>2</sub> размещены на общем сердечнике, M <sub>12</sub> =250 мГн				

## 3. Комплект-набор съёмных элементов.

Резисторы		Конденсаторы		Индуктивности			
Номер элемента	P <sub>доп</sub> =2 Вт R, Ом	Номер элемента	U <sub>доп</sub> =160 В С, мкФ	Номер элемента	L, мГн	R <sub>L</sub> , Ом	I <sub>доп</sub> , mA
1	51	11	0,1	20	2	0,35	225
2	75	12	0,25	21	3	0,64	190
3	100	13	0,5	22	5	0,78	150
4	150	14	0,75	23	7	0,90	125
5	200	15	1,0	24	10	0,90	100
6	300	16	1,25	25	15	1,18	85
7	510	17	1,5	26	20	1,38	75
8	700	18	1,75	27	30	1,63	60
9	800	19	2,0	28	50	2,05	50
10	1000			29	70	2,50	40

Разброс параметров составляет  $\pm 5-10\%$ .

НЭ1 - нелинейное сопротивление

НЭ2 - лампа накаливания

НЭ3 - полупроводниковый диод

В комплекте также имеются: длинные провода - 14 шт.  
короткие провода - 15 шт.  
перемычки (вилки) - 25 шт.

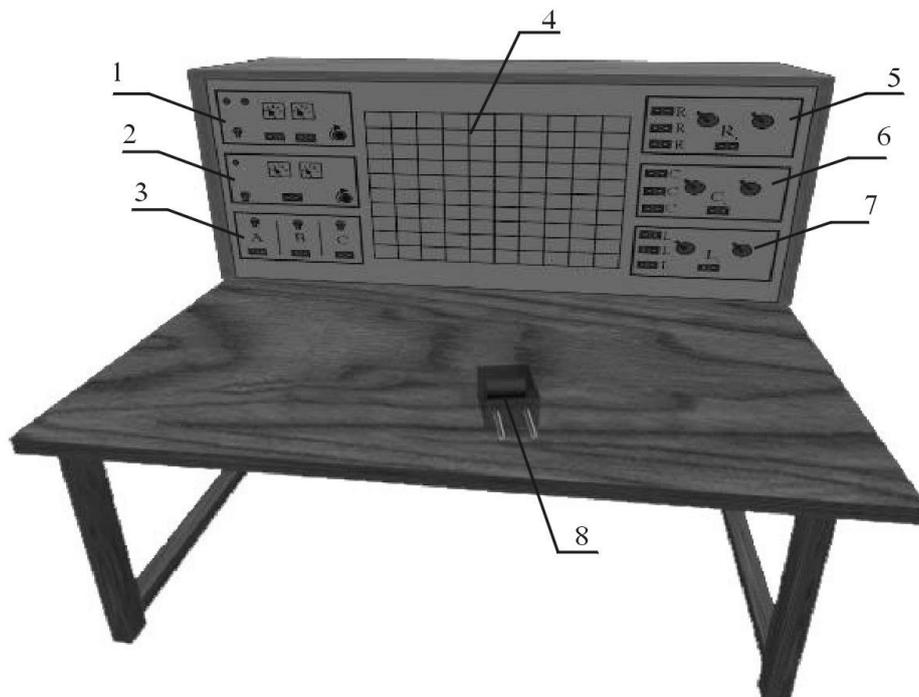


Рис.1 Общий вид стенда типа УИЛС-2:

- 1 - блок источников постоянного напряжения;
- 2 - блок однофазного переменного напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы;
- 3 - блок трёхфазного напряжения;
- 4 - наборное поле;
- 5 - блок резисторов;
- 7 - блок индуктивностей;
- 8 - съёмный элемент стенда.

## Лабораторная работа 10.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Цель. Исследование переходных процессов при заряде и разряде цепи с индуктивностью и цепи с конденсатором. Экспериментальная проверка расчетных графиков зависимостей напряжений и токов от времени.

## 10.1. Пояснения к работе

10.1. При включении цепи  $r$ ,  $L$  на постоянное напряжение  $U$  (рис. 10.1 ключ ЭК замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$i r + L \frac{di}{dt} = U \quad (10.1).$$

Решение уравнения относительно тока имеет вид:

$$i = i_{np} + i_{св}, \quad \text{где: } i_{np} - \text{принужденная составляющая тока;}$$

$$i_{св} - \text{свободная составляющая тока.}$$

$$i_{np} = \frac{U}{r}, \quad \text{определяется как установившийся после коммутации ток.}$$

$$i_{св} = A e^{pt}, \quad \text{определяется для схемы после коммутации без внешних воздействий (U=0),}$$

где:  $A$  – постоянная интегрирования;  $p$  – корень характеристического уравнения.

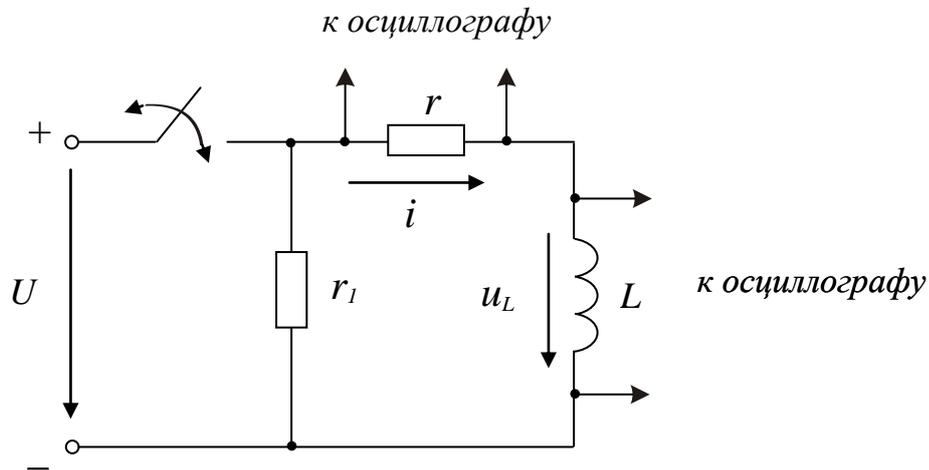


Рис 10.1. Схема исследования переходных процессов в цепи  $R, L$ .

Для рассматриваемой цепи характеристическое уравнение имеет вид :

$$pL + r = 0, \quad \text{решение которого } p = -\frac{r}{L}.$$

Постоянная интегрирования  $A = i_{св}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+)$ .

Согласно 1-му закону коммутации  $i(0_+) = i(0_-) = 0$ , тогда  $A = 0 - \frac{U}{r} = -\frac{U}{r}$ ,

$$i = i_{np} + i_{cs} = \frac{U}{r} - \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau_3}} = \frac{U}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}) \quad (10.2),$$

где:  $\tau_3 = \frac{L}{r}$  - постоянная времени цепи заряда индуктивности.

Напряжение на индуктивности определяется дифференцированием по времени полученного тока:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (10.3).$$

Графики зависимостей  $u_L(t)$  и  $i(t)$  представлены на рис. 10.2 (а).

В начальный момент времени при  $t=0$ , (момент замыкания ключа), ток в цепи  $i(0_+) = 0$ , а напряжение на индуктивности  $u_L(0_+) = U$ . В дальнейшем ток возрастает по экспоненциальному закону до  $i_{np} = U/r$ , а напряжение на индуктивности уменьшается до  $u_{Lnp} = 0$ .

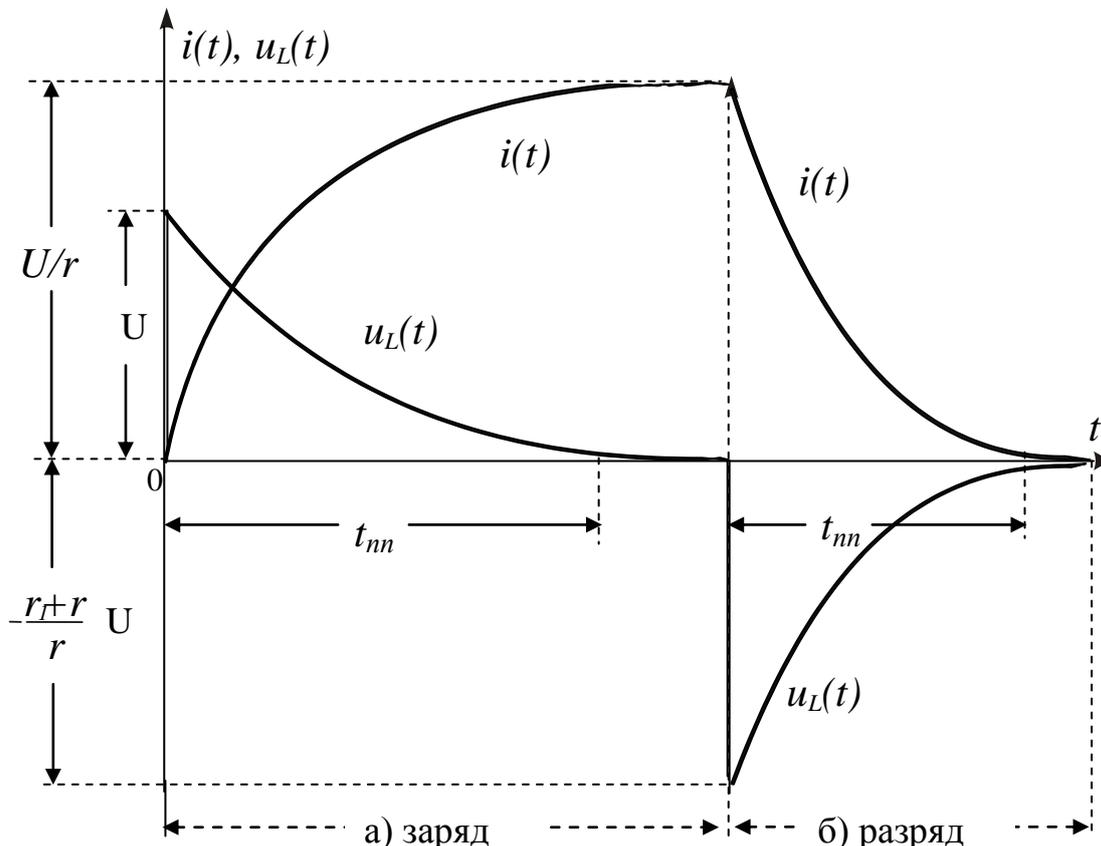


Рис.10.2. Графики зависимостей  $u_L(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде цепи  $r, L$

Таким образом, для рассматриваемой цепи в начальный момент переходного процесса индуктивный элемент обладает бесконечным сопротивлением, что эквивалентно разрыву, а в принужденном режиме его сопротивление уменьшается до нулевого значения (короткое замыкание). В процессе заряда индуктивность выступает накопителем энергии магнитного поля.

К концу переходного процесса она накапливает энергию  $W_m = \frac{L i^2}{2} = \frac{L U^2}{2 r^2}$

Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго, однако практически он заканчивается через  $t_{н.н.} = (3 - 5)\tau_3$ , так как за этот промежуток времени свободная составляющая уменьшается до величины, составляющей не более 5% от ее наибольшего значения.

10.1.2. При переключении цепи  $r, L$  на сопротивление  $r_1$  (рис. 10.1 ключ ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$i (r + r_1) + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (10.4).$$

Решение этого уравнения относительно тока имеет вид:

$$i = i_{np} + i_{св}, \quad \text{где: } i_{np} - \text{принужденная составляющая тока;}$$

$$i_{св} - \text{свободная составляющая тока.}$$

В этом случае  $i_{np}=0$ ,  $i_{св} = Ae^{pt}$  и характеристическое уравнение имеет вид:

$$pL + r + r_1 = 0, \quad \text{решение которого } p = -\frac{r + r_1}{L}.$$

Постоянная интегрирования  $A = i_{св}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+)$ .

Согласно 1-му закону коммутации  $i(0_+) = i(0_-) = \frac{U}{r}$ , тогда  $A = \frac{U}{r} - 0 = \frac{U}{r}$ ,

$$i = \frac{U}{r} e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (10.5),$$

где:  $\tau_p = \frac{L}{r + r_1}$  - постоянная времени цепи разряда.

Напряжение на индуктивности определяется дифференцированием по времени полученного тока:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -\frac{r + r_1}{r} U e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (10.6).$$

Графики зависимостей  $u_L(t)$  и  $i(t)$  представлены на рис. 10.2(б).

Из-за наличия сопротивления  $r_1$  постоянная времени цепи разряда индуктивности уменьшается в  $\frac{\tau_3}{\tau_p} = \frac{r + r_1}{r}$  по сравнению с постоянной времени цепи заряда. Однако уменьшение длительности переходного процесса при разряде сопровождается увеличением в такой же пропорции напряжения на индуктивности в начальный момент времени. В процессе разряда энергия, накопленная в индуктивности при заряде (предыдущий режим), выделяется в сопротивлениях  $r$  и  $r_1$ .

10.1.3. При включении цепи  $r, C$  на постоянное напряжение  $U$  (рис.10.3 ключ ЭК замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = U \quad (10.7).$$

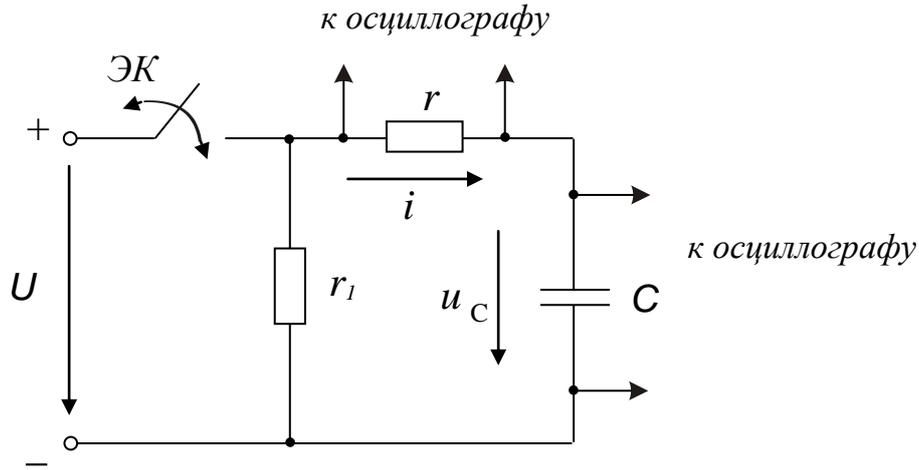


Рис 10.3. Схема исследования переходных процессов в цепи  $r, C$

Решение этого уравнения относительно напряжения на конденсаторе имеет вид :

$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв}$  где  $u_{Cnp}$  и  $u_{Cсв}$  принужденная и свободная составляющие напряжения, соответственно.

$u_{Cnp} = U$ , определяется как установившееся после коммутации напряжение на конденсаторе.

$u_{Cсв}$  определяется для схемы после коммутации без внешних воздействий ( $U = 0$ ) и имеет вид :  $u_{Cсв} = Ae^{pt}$ , где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения.

Для рассматриваемой цепи характеристическое уравнение имеет вид :

$$\frac{1}{pC} + r = 0, \quad \text{решение которого} \quad p = -\frac{1}{rC}.$$

Постоянная интегрирования  $A = u_{Cсв}(0_+) = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+)$ .

Согласно 2-му закону коммутации  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$ , тогда  $A = 0 - U = -U$ ,

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв} = U - Ue^{-\frac{t}{\tau_3}} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}) \quad (10.8),$$

где :  $\tau_3 = I \frac{1}{p} I = rC$  - постоянная времени цепи заряда.

Ток заряда определяется дифференцированием по времени полученного напряжения:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (10.9).$$

Графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  представлены на рис. 10.4(а).

В начальный момент времени при  $t = 0$ , (момент замыкания ключа), напряжение на конденсаторе  $u_C(0) = 0$ , а ток в цепи  $i(0) = \frac{U}{r}$ . В дальнейшем напряжение на конденсаторе возрастает по экспоненциальному закону до  $u_{Cnp} = U$ , а ток уменьшается до  $i_{np} = 0$ .

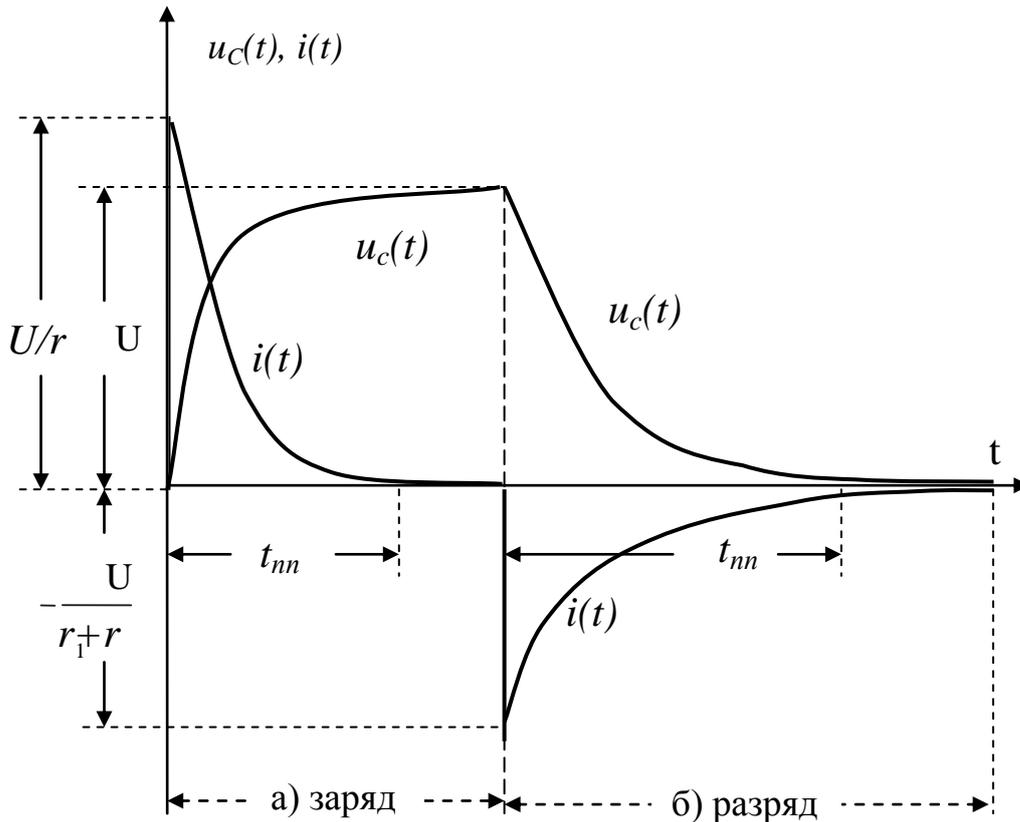


Рис.10.4. Графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде цепи  $r, C$

Таким образом, для рассматриваемой цепи в начальный момент переходного процесса конденсатор обладает нулевым сопротивлением (эквивалентен короткому замыканию), а в принужденном режиме его сопротивление увеличивается до бесконечности (разрыв цепи). В процессе заряда конденсатор выступает накопителем энергии электрического поля. К концу переходного процесса он накапливает энергию  $W_3 = \frac{C u^2}{2} = \frac{C U^2}{2}$ .

10.1.4. При переключении цепи  $r, C$  на сопротивление  $r_1$  (рис.10.3 ключ ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$(r + r_1)C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (10.10).$$

Решение этого уравнения относительно напряжения на конденсаторе имеет вид:

$u_C = u_{C_{np}} + u_{C_{св}}$ , где:  $u_{C_{np}}$  и  $u_{C_{св}}$  принужденная и свободная составляющие напряжения, соответственно.

$u_{C_{np}} = 0$ , определяется как установившееся после коммутации напряжение на конденсаторе.

$u_{C_{св}} = A e^{pt}$ , где:  $A$  – постоянная интегрирования;  
 $p$  – корень характеристического уравнения цепи разряда.

Для рассматриваемой цепи характеристическое уравнение имеет вид :

$$\frac{1}{pC} + (r + r_1) = 0, \quad \text{решение которого} \quad p = -\frac{1}{(r + r_1) C}.$$

Постоянная интегрирования  $A = u_{C_{св}}(0_+) = u_C(0_+) - u_{C_{np}}(0_+)$ .

Согласно 2-му закону коммутации  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = U$ , тогда  $A = U - 0 = U$ ,

$$u_C = u_{C_{np}} + u_{C_{св}} = Ue^{-\frac{t}{\tau_p}}, \quad (10.11),$$

где :  $\tau_p = I \frac{1}{p} I = (r + r_1)C$  - постоянная времени цепи разряда.

Ток разряда определяется дифференцированием по времени полученного напряжения :

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U}{r + r_1} e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (10.12),$$

Графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  представлены на рис. 10.4(б).

Из-за наличия сопротивления  $r_1$  в цепи разряда конденсатора происходит увеличение

постоянной времени цепи в  $\frac{\tau_p}{\tau_3} = \frac{r+r_1}{r}$  раз и соответствующее уменьшение тока в нулевой

момент времени. В процессе разряда энергия, накопленная конденсатором при заряде (предыдущий режим), выделяется в сопротивлениях  $r$  и  $r_1$  в виде тепла

Исходя из свойств дуальности электрических цепей, график напряжения  $u_C(t)$  в цепи  $r, C$  аналогичен графику тока  $i(t)$  в цепи  $r, L$ .

Аналогичны и графики  $i(t)$  в цепи  $r, C$  и график напряжения  $u_L(t)$  в цепи  $r, L$ .

## 10.2. Домашняя подготовка к работе.

10.2.1. Изучить тему "Переходные процессы в цепях постоянного тока при заряде и разряде цепи с конденсатором и цепи с индуктивностью".

10.2.2. В соответствии с номером варианта (табл.10.1) для рабочей схемы (рис.10.1) рассчитать ток переходного процесса  $i(t)$  и напряжение на индуктивности  $u_L(t)$ . при включении  $r, L$  к источнику постоянного напряжения  $U = 5B$  (электронный ключ ЭК замыкается) и при замыкании ее на резистор  $r_1$  (электронный ключ ЭК отключается).

Таблица 10.1

Номер Варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L, мГн$	5	7	10	12	15	17	5	7	10	12	15	17
$r, Ом$	50	75	100	100	150	150	75	100	125	150	125	125
$r_1, Ом$	75	50	100	75	100	100	50	75	75	100	75	100

10.2.3. Начертить расчетные графики  $i(t)$  и  $u_L(t)$  для рассмотренных в п.10.2.2 случаях. Основные расчеты величины занести в табл.10.2.

Таблица.10.2

Сравниваемые показатели переходного процесса	Включение цепи $r, L$ к источнику					Замыкание цепи $r, L$ на резистор $r_1$				
	$\tau_z,$ мс	$i(0_+),$ мА	$u_L(0_+),$ В	$i_{np},$ мА	$u_{Lnp},$ В	$\tau_p,$ мс	$i(0_+),$ мА	$u_L(0_+),$ В	$i_{np},$ мА	$u_{Lnp},$ В
Вычислено										
Измерено										

10.2.4. В соответствии с номером варианта (табл. 10.3) для рабочей схемы (рис. 10.4) рассчитать ток переходного процесса  $i(t)$  и напряжение на конденсаторе  $u_C(t)$  при включении цепи  $r, C$  к источнику постоянного напряжения  $U = 5B$  (электронный ключ ЭК замыкается) и при замыкании ее на резистор  $r_1$  (электронный ключ ЭК отключается).

Таблица 10.3

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$C, \text{ мкФ}$	0,1	0,2	0,25	0,35	0,5	0,75	0,1	0,2	0,25	0,35	0,5	0,75
$r, \text{ Ом}$	500	200	200	150	125	75	400	150	150	125	100	50
$r_1, \text{ Ом}$	300	150	150	125	50	50	350	200	200	150	75	75

10.2.5. Начертить расчетные графики  $i(t)$  и  $u_C(t)$  для рассмотренных в п.10.2.4 случаях. Основные расчеты величины занести в табл.10.4.

Таблица.10.4

Сравниваемые показатели переходного процесса	Включение цепи $r, C$ к источнику					Замыкание цепи $r, C$ на резистор $r_1$				
	$\tau_z,$ мс	$i(0_+),$ мА	$u_C(0_+),$ В	$i_{np},$ мА	$u_{Cnp},$ В	$\tau_p,$ мс	$i(0_+),$ мА	$u_C(0_+),$ В	$i_{np},$ мА	$u_{Cnp},$ В
Вычислено										
Измерено										

### 10.3. Порядок выполнения работы

- 10.3.1. В соответствии с номером варианта выбрать элементы цепи и собрать рабочую схему (рис. 10.1) с индуктивным элементом. На вход исследуемой цепи подать постоянное напряжение  $U = 5B$  (использовать источник постоянного регулируемого напряжения). Синхронизацию электронного ключа осуществить напряжением прямоугольной формы амплитудой 5-10В частотой 1 кГц (использовать блок переменного напряжения).
- 10.3.2. Подключая осциллограф к активному сопротивлению  $r$  и индуктивному элементу  $L$ , переснять с экрана осциллографа экспериментальные графики зависимостей тока  $i(t)$  и напряжения  $u_L(t)$  при включении и выключении электронного ключа (ЭК). Убедиться в экспоненциальном характере переходного процесса и с учетом масштабов времени  $m_t$ , напряжения  $m_u$  и тока  $m_i = m_u / r$  определить основные сравниваемые показатели процесса, заполнить табл.10.2.
- 10.3.3. В соответствии с номером варианта выбрать элементы цепи и собрать рабочую схему (рис.10.3) с емкостным элементом. На вход исследуемой цепи подать постоянное напряжение  $U = 5B$  (использовать источник постоянного регулируемого напряжения). Синхронизацию электронного ключа ЭК осуществить напряжением прямоугольной формы амплитудой 5-10 В частотой 1 кГц (использовать блок переменного напряжения).

- 10.3.4. Подключая осциллограф к активному сопротивлению  $r$  и конденсатору  $C$ , переснять с экрана осциллографа графики зависимостей тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при включении и выключении электронного ключа ЭК. Убедиться в экспоненциальном характере переходного процесса и с учетом масштабов вычислить основные показатели процесса, заполнить табл. 10.4.
- 10.3.5. Провести сравнительный анализ переходных процессов в  $r, L$  и  $r, C$  - цепях. Объяснить возможное расхождение теоретических и экспериментальных характеристик процесса.

#### 10.4. Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл постоянной времени цепи, как она определяется?
2. Сформулируйте законы коммутации, используемые при анализе переходных процессов.
3. Какова теоретическая и практическая деятельность переходного процесса?
4. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_L(t)$  при заряде, разряде индуктивного элемента цепи.
5. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при заряде, разряде емкостного элемента цепи.
6. Можно ли получить в исследуемых цепях колебательный характер переходного процесса путем подбора параметров элементов.
7. Какое влияние оказывает на переходный процесс сопротивление  $r_l$ ?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С $r, L, C$ – ЭЛЕМЕНТАМИ.

**Цель.** Исследование переходного процесса и анализ его количественных показателей в последовательном контуре  $r, L, C$ . Экспериментальная проверка расчетных графиков зависимостей напряжений и токов от времени.

### 11.1. Пояснения к работе

Исследуемая электрическая цепь (рис. 11.1) содержит последовательный контур  $r, L, C$ , электронный ключ ЭК, источник регулируемого постоянного напряжения  $U$  и разрядный резистор  $r_1$ . Для электронного ключа используется внутренняя синхронизация, что обеспечивает его коммутацию с частотой сети  $f=50\text{Гц}$  (Период  $T=0.02\text{ с}$ ).

Электронный ключ, осуществляя коммутацию цепи, половину периода длительностью  $0,1\text{ с}$  находится в замкнутом состоянии. За это время в контуре  $r, L, C$  происходит переходный процесс, в результате которого конденсатор заряжается до напряжения источника  $U$ . Параметры цепи заряда подобраны таким образом, что переходный процесс является периодическим и затухает раньше, чем произойдет размыкание ключа ЭК. Вторую половину периода коммутации ключ ЭК разомкнут и в цепи происходит разряд конденсатора через индуктивность и резисторы  $r$  и  $r_1$ . Сопротивление  $r_1$  подобрано таким образом, что этот процесс носит аperiodический характер. Его время затухания также меньше длительности разомкнутого состояния ключа ЭК и к началу следующего периода коммутации ЭК конденсатор полностью разряжен и новый процесс повторяется при нулевых начальных условиях.

Таким образом, оба переходных режима (заряд и разряд) повторяются с частотой сети и могут наблюдаться на экране осциллографа при условии, что развертка последнего также синхронизирована с сетью.

11.1. При включении цепи  $r, L, C$  на постоянное напряжение  $U$  (рис. 11.1 ключ ЭК замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на

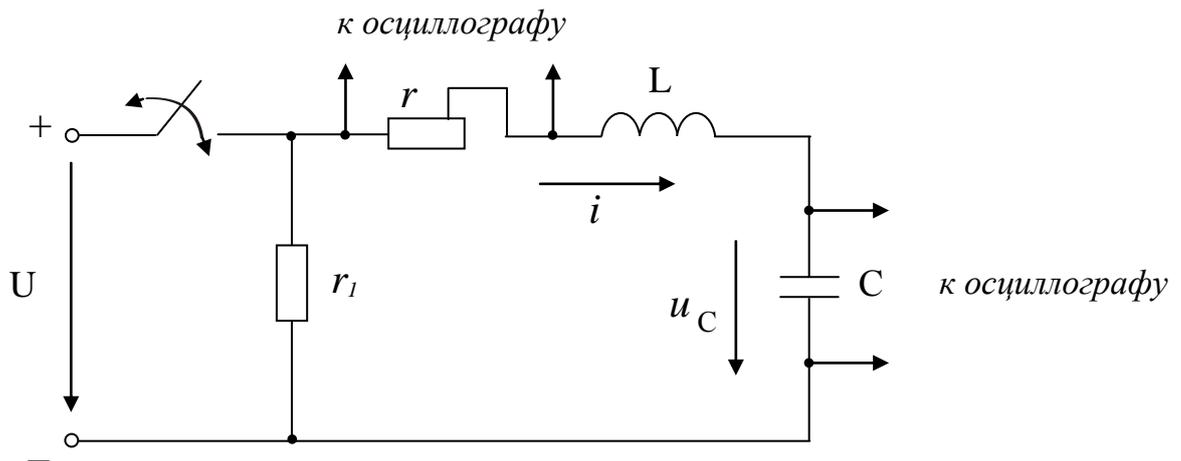


Рис. 11.1. Схема исследования переходных процессов в цепи  $r, L, C$ .

основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$i r + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U \quad (11.1).$$

Решение этого уравнения относительно тока и относительно напряжения на конденсаторе имеет вид (соответственно):

$i = i_{np} + i_{cв}$        $u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв}$ , где :  $i_{np}$ ,  $i_{cв}$ ,  $u_{Cnp}$ ,  $u_{Cсв}$  - принужденные и свободные составляющие тока и напряжения на конденсаторе.

$i_{np} = \frac{U}{r}$ ,  $u_{Cnp} = U$  определяются как установившиеся значения величин после коммутации.

Вид свободных составляющих  $i_{cв}$  и  $u_{Cсв}$  зависит от характера процесса и определяется соотношением параметров элементов  $r, L, C$ .

Для процесса заряда параметры элементов подобраны таким образом, что  $r < r_{кр}$ , и характер переходного процесса периодический (колебательный), что соответствует комплексно-сопряженным корням характеристического уравнения:

$$P_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} = -\delta \pm j\omega_0,$$

где :  $r_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  - критическое сопротивление,  $\delta$  - коэффициент затухания;,  
 $\omega_0$  - частота свободных колебаний.

Для рассматриваемого случая свободные составляющие отыскиваются в виде:

$$u_{Cсв}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_u) \quad \text{и,} \quad i_{cв}(t) = Be^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_i)$$

где :  $A, B, \psi_u, \psi_i$  - постоянные интегрирования.

Постоянные интегрирования определяются с помощью законов коммутации и законов Кирхгофа, из выражений для свободных составляющих и их производных при  $t = 0_+$ .

$$u_{Cсв}(0_+) = A \sin \psi_u = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+)$$

$$\frac{du_{Cсв}}{dt}(0_+) = -\delta A \sin \psi_u + \omega_0 A \cos \psi_u = \frac{du_C}{dt}(0_+) - \frac{du_{Cnp}}{dt}(0_+)$$

$$i_{cв}(0_+) = B \sin \psi_i = i(0_+) - i_{np}(0_+)$$

$$\frac{di_{cв}}{dt}(0_+) = -\delta B \sin \psi_i + \omega_0 B \cos \psi_i = \frac{di}{dt}(0_+) - \frac{di_{np}}{dt}(0_+)$$

В соответствии с законами коммутации  $u_C(0_+) = 0$ ,  $i(0_+) = 0$ , тогда

$$A \sin \psi_u = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+) = 0 - U = -U$$

$$-\delta A \sin \psi_u + \omega_0 A \cos \psi_u = \frac{du_C}{dt}(0_+) - \frac{du_{Cnp}}{dt}(0_+) = 0 - 0 = 0$$

$$A = -\frac{U}{\sin \psi_u}, \quad -\delta + \omega_0 \frac{1}{\operatorname{tg} \psi_u} = 0, \quad \psi_u = \operatorname{arctg} \frac{\omega_0}{\delta}.$$

$$B \sin \psi_i = i(0_+) - i_{np}(0_+) = 0 - 0 = 0$$

$$-\delta B \sin \psi_i + \omega_0 B \cos \psi_i = \frac{U}{L} - 0 = \frac{U}{L}$$

$$\sin \psi_i = 0, \quad \psi_i = 0, \quad \omega_0 B = \frac{U}{L}, \quad B = \frac{U}{\omega_0 L}.$$

После подстановки постоянных интегрирования выражения для напряжения на конденсаторе и тока имеют вид:

$$u_C(t) = U - \frac{U}{\sin \psi_u} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_u), \quad i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin \omega_0 t \quad (11.2).$$

Ток заряда и напряжение на конденсаторе в этом случае совершают колебания около своих установившихся значений (рис.11.2а).

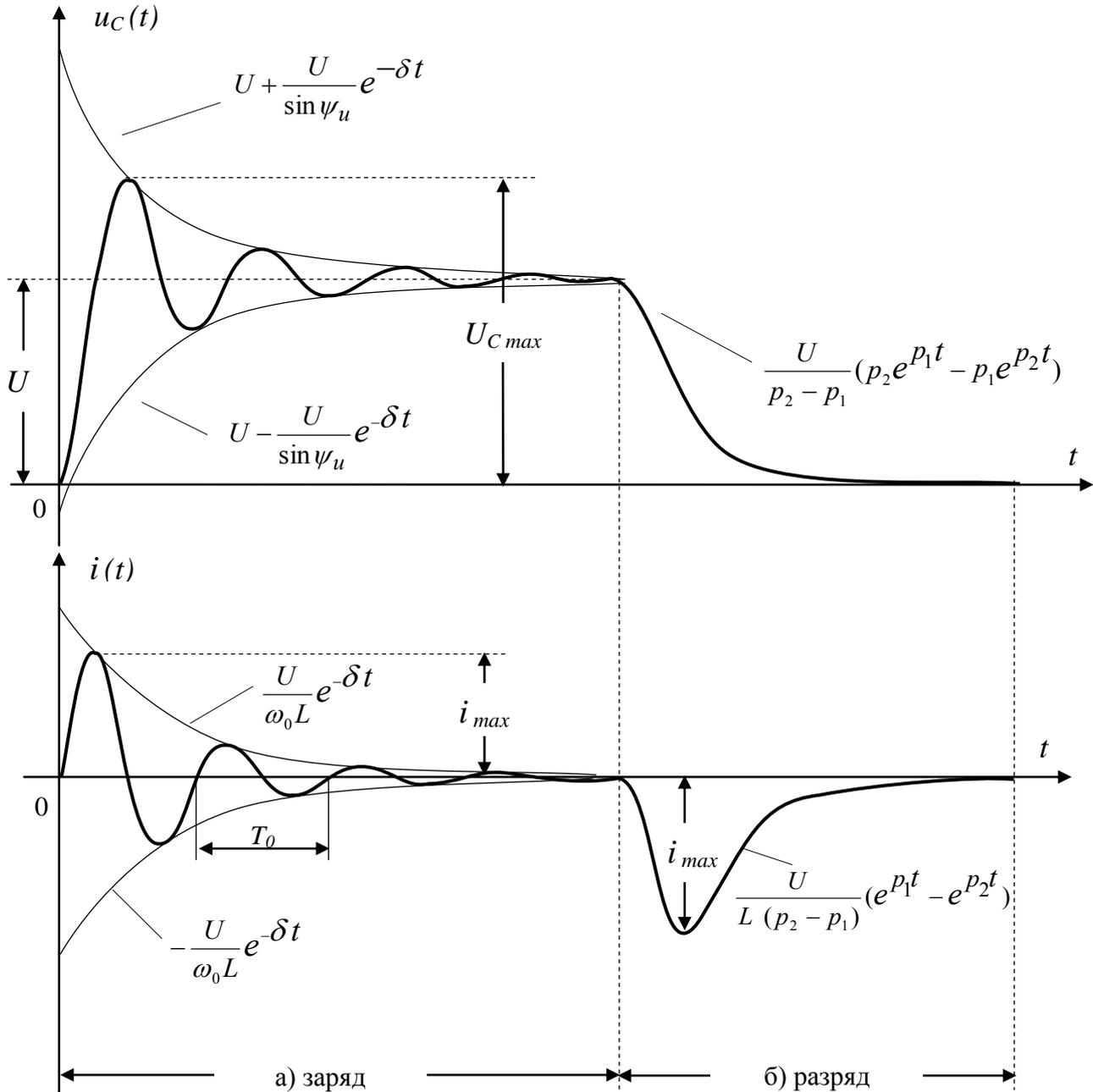


Рис. 11.2 График зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде цепи  $r, L, C$ .

Величина  $\delta = \frac{r}{2L} = \frac{I}{\tau}$  характеризует скорость затухания колебаний, а величины  $\omega_0$  и  $\psi_u$  - частоту и начальную фазу свободных колебаний.

Максимальное напряжение на конденсаторе  $u_{Cmax}$  стремится к значению  $2U$ , а максимальный ток - к значению  $i_{max} = \frac{U}{\omega_0 L}$ .

Апериодический процесс при включении цепи  $r, L, C$  на постоянное напряжение  $U$  наступает при условии  $r > r_{кр}$ , что соответствует двум разным отрицательным вещественным

корням характеристического уравнения:  $P_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$ .

Напряжение и ток заряда конденсатора в таком переходном процессе записывается в виде принужденной составляющей и суммы двух экспонент:

$$u_C(t) = U + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = U + \frac{U}{p_1 - p_2} \left[ p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t} \right], \quad (11.3)$$

$$i(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} \left[ e^{p_1 t} - e^{p_2 t} \right]. \quad (11.4)$$

В этом случае напряжение на конденсаторе плавно возрастает от нуля до напряжения источника, не превышая его.

При  $r = r_{кр}$  корни характеристического уравнения равны и процесс является граничным между апериодическим и колебательным.

11.2. При замыкании цепи  $r, L, C$  на резистор  $r_1$  (рис. 11.1 ключ ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$i(r + r_1) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (11.5).$$

Параметры цепи выбраны таким образом, что  $r > r_{кр}$  и характер процесса апериодический, что соответствует двум вещественным отрицательным корням характеристического уравнения:

$$P_{1,2} = -\frac{r + r_1}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r + r_1}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Решение уравнения (11.5) относительно тока и относительно напряжения на конденсаторе имеет вид (соответственно):

$$i = i_{np} + i_{св}, \quad u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв},$$

$i_{np} = 0$ ,  $u_{Cnp} = 0$ , определяются как установившиеся значения величин после коммутации.

Свободные составляющие напряжения и тока конденсатора записывается в виде суммы двух экспонент:

$u_{Cсв}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$ ,  $i_{св}(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}$ , где:  $A_1, A_2, B_1, B_2$  - постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий.

$$u_{Cсв}(0_+) = A_1 + A_2 = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+), \quad \frac{du_{Cсв}}{dt}(0_+) = p_1 A_1 + p_2 A_2 = \frac{du_C}{dt}(0_+) - \frac{du_{Cnp}}{dt}(0_+),$$

$$i_{св}(0_+) = B_1 + B_2 = i(0_+) - i_{np}(0_+), \quad \frac{di_{св}}{dt}(0_+) = p_1 B_1 + p_2 B_2 = \frac{di}{dt}(0_+) - \frac{di_{np}}{dt}(0_+).$$

В соответствии с законами коммутации  $u_C(0_+) = U$ ,  $i(0_+) = 0$ , тогда окончательно:

$$u_C(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = \frac{U}{p_1 - p_2} \left[ p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t} \right] \quad (11.6),$$

$$i(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} \left[ e^{p_1 t} - e^{p_2 t} \right] \quad (11.7).$$

В этом случае напряжение на конденсаторе с течением времени плавно уменьшается от начального значения  $u_C(0) = U$  до нуля, а ток, являясь отрицательным, сначала возрастает по абсолютной величине, а затем стремится к нулевому значению (рис.11.2б).

Практическая продолжительность переходного процесса определяется промежутком времени, за которое свободная составляющая уменьшается до величины, составляющей 5% от наибольшего значения.

## 11.2. Домашняя подготовка к работе.

11.2.1 В соответствии с номером варианта (табл.11.1) для схемы (рис.11.1) выполнить расчет переходного процесса при включении цепи  $r, L, C$  на постоянное напряжение  $U = 5В$  (замкнутое состояние ключа ЭК). Получить числовые выражения для  $u_C(t)$  и  $i(t)$ .

Таблица 11.1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$r, \text{ Ом}$	40	50	50	50	50	50	75	75	50	50	50	50
$r_1, \text{ Ом}$	700	800	1000	510	510	700	510	510	510	300	300	300
$L, \text{ мГн}$	50	70	70	70	70	100	100	90	90	70	70	50
$C, \text{ мкФ}$	1	1	0.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0

11.2.2. Для схемы (рис.11.1) выполнить расчет переходного процесса при разряде конденсатора  $C$  через последовательно включенные индуктивность  $L$  и резисторы  $r$  и  $r_1$  (разомкнутое состояние ключа ЭК). Получить числовые выражения для  $u_C(t)$  и  $i(t)$ .

11.2.3. Заполнить расчетную часть (табл.11.2) показателей переходного процесса при разряде и заряде конденсатора  $C$  в схеме (рис.11.1).

Таблица 11.2

№ п/п	Исследуемые показатели переходного процесса	Расчет	Эксперимент
1	2	3	4
1. Заряд конденсатора $0 < t < 0.01с$			
1.1	Критическое сопротивление контура $r_{кр}, \text{ Ом}$		
1.2	Коэффициент затухания $\delta = r/2L, \text{ }^1/с$		
1.3	Максимальное напряжение $U_{Cmax}, \text{ В}$		
1.4	Частота свободных колебаний $\omega_0, \text{ }^1/с$		
1.5	Период свободных колебаний $T_0, \text{ с}$		
1.6	Практическая длительность процесса $t_{n,n}, \text{ с}$		
2. Разряд конденсатора $0.01 < t < 0.02с$			
2.1	Корни характеристического уравнения $p_1$ и $p_2, \text{ }^1/с$		
2.2	Максимальный ток разряда конденсатора $i_{max}, \text{ мА}$		
2.3	Практическая длительность процесса $t_{n,n}, \text{ с}$		

### 11.3. Порядок выполнения работы.

11.3.1. В соответствии с номером варианта (табл.11.1) выбрать номера элементов цепи и собрать на наборном поле стенда УИИС рабочую схему (рис.11.1). В качестве сопротивления  $r$  использовать блок переменных сопротивлений стенда.

11.3.2. Включить осциллограф и с его помощью установить напряжение регулируемого источника  $U = 5 В$ .

11.3.3. Поочередно подключая осциллограф к конденсатору  $C$  и резистору  $r$ , переснять с экрана графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде конденсатора.

С учетом масштабов времени  $m_t$ , напряжения  $m_u$  и тока  $m_i = \frac{m_u}{r}$  определить основные сравниваемые показатели процесса и заполнить табл.11.2.

11.3.4. Сравнить расчетные и экспериментальные графики  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при разряде конденсатора, построив их в одной системе координат.

11.3.5. Изменяя величину сопротивления  $r$  получить на экране осциллографа и переснять график  $u_C(t)$  или  $i(t)$ , соответствующий граничному режиму переходного процесса (между апериодическим и колебательным). Опытным путем определить величину критического сопротивления цепи  $r_{кр}$  и занести в табл. 11.2.

11.3.6. Исследовать влияния величины индуктивности на характер переходного процесса при разряде конденсатора. Для этого сравнить графики  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при исходных значениях параметров  $r, L, C$  и при индуктивностях  $0,5L$  и  $2L$ . Сформулировать вывод о влиянии величины индуктивности на характер переходного процесса.

11.3.7. Исследовать влияние величины емкости на характер переходного процесса при заряде конденсатора. Для этого сравнить графики  $u_C(t)$ ,  $i(t)$  при исходных значениях параметров  $r, L, C$  и при емкостях  $0,5C$  и  $2C$ . Сформулировать вывод о влиянии величины емкости на характер переходного процесса.

### 11.4. Вопросы для самопроверки.

1. Каков физический смысл критического сопротивления цепи  $r, L, C$  и как его определить через параметры элементов?
2. Объясните с физической точки зрения возможность установления в  $r, L, C$  цепях токов и напряжений апериодического и колебательного характера.
3. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при апериодическом характере заряда конденсатора в цепи  $r, L, C$ , включенной на постоянное напряжение  $U$ .
4. Запишите выражения и приведите графики  $i(t)$  и  $u_C(t)$  при колебательном характере заряда конденсатора.
5. Как определяется практическая продолжительность апериодического и колебательного процессов?
6. Пользуясь рассчитанными при домашней подготовке выражениями тока  $i(t)$  при заряде и разряде конденсатора, получить выражения для напряжений на резисторе  $r$  и на индуктивности  $L$ .
7. Каким является механический аналог для электрической цепи  $r, L, C$ ?

Лабораторная работа 12.  
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

Цель: Исследование вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и проверка графических методов расчета электрических цепей, содержащих нелинейные резисторы.

12.1. Пояснения к работе.

Расчеты электрических цепей с нелинейными сопротивлениями построены на использовании графических методов преобразования цепей на основе законов Кирхгофа. Путем постепенной замены последовательно или параллельно соединенных элементов можно получить вольт-амперную характеристику всей цепи и ее отдельных участков, по которым определяют токи и напряжения в ветвях.

12.1.1. Для последовательного соединения нелинейных элементов (рис. 12.1а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется путем графического сложения напряжений каждого из элементов при одних значениях тока (рис. 12.1б)

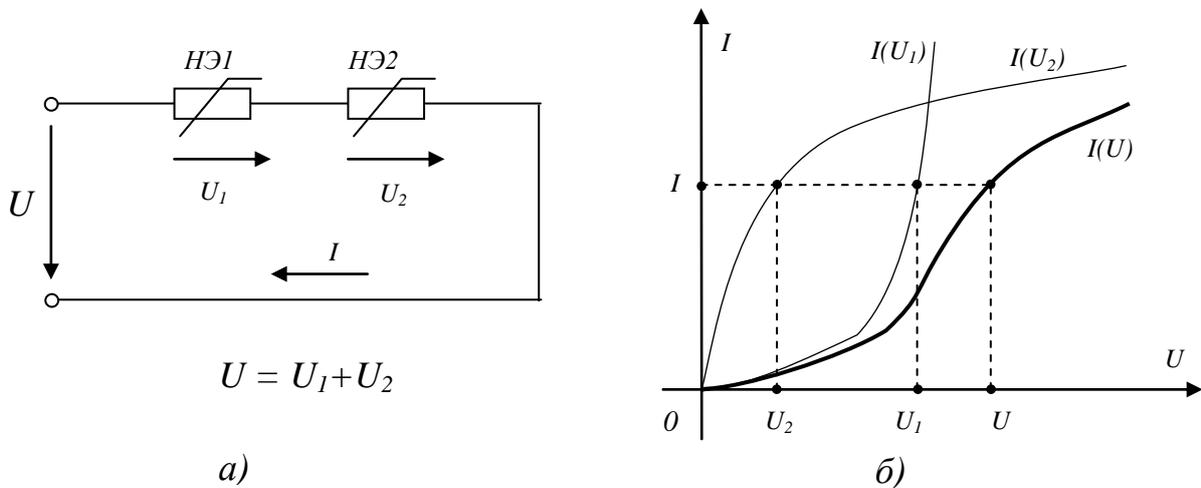


Рис. 12.1. Последовательное соединение нелинейных элементов

12.1.2. Для параллельного соединения нелинейных элементов (рис. 12.2а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется путем графического сложения токов каждого из элементов при одних значениях напряжения (рис. 12.2б).

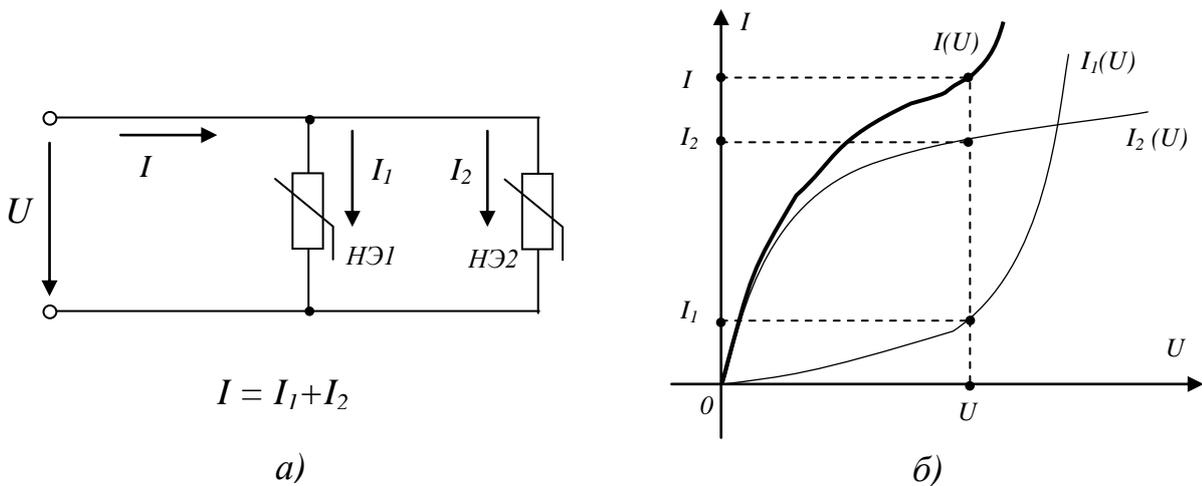


Рис. 12.2. Параллельное соединение нелинейных элементов

12.1.3. Для построения результирующей ВАХ смешанного соединения нелинейных элементов (рис. 12.3а) на первом этапе выполняется построение промежуточной ВАХ параллельно соединенных элементов  $(I_2+I_3)(U_{23})$ . Затем промежуточная ВАХ складывается с ВАХ нелинейного элемента, находящегося в общей части цепи, как для последовательного соединения (рис. 12.3б).

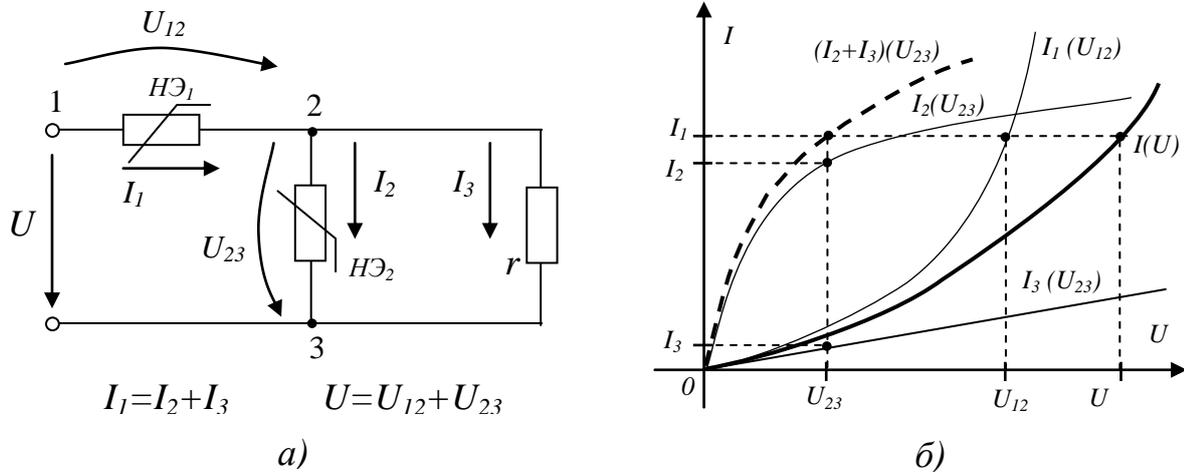


Рис. 12.3. Смешанное соединение нелинейных элементов

12.1.4. Расчет нелинейной электрической цепи (рис. 12.4а) методом двух узлов приведен на рис. 12.4б. На первом этапе выполняется построение вольт-амперных характеристик всех ветвей рассматриваемой цепи  $I_1(U_{ab})$ ,  $I_2(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$ . При этом используются выражения, полученные с помощью второго закона Кирхгофа:

$$U_{ab} = E_1 - U_1, \quad U_{ab} = U_2, \quad U_{ab} = E_3 - I_3 r.$$

Затем параллельно соединенные первая и третья ветви заменены эквивалентной с вольт-амперной характеристикой  $(I_1+I_3)(U_{ab})$ , полученной путем графического сложения токов. На основании первого закона Кирхгофа  $I_1+I_3=I_2$ , который выполняется в точке пересечения вольт-амперных характеристик  $(I_1+I_3)(U_{ab})$  и  $I_2(U_{ab})$  определены значения тока  $I_2$  и узлового напряжения  $U_{ab}$ . По полученному значению  $U_{ab}$ , с помощью вольт-амперных характеристик  $I_1(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$  определены токи  $I_1$  и  $I_3$ .

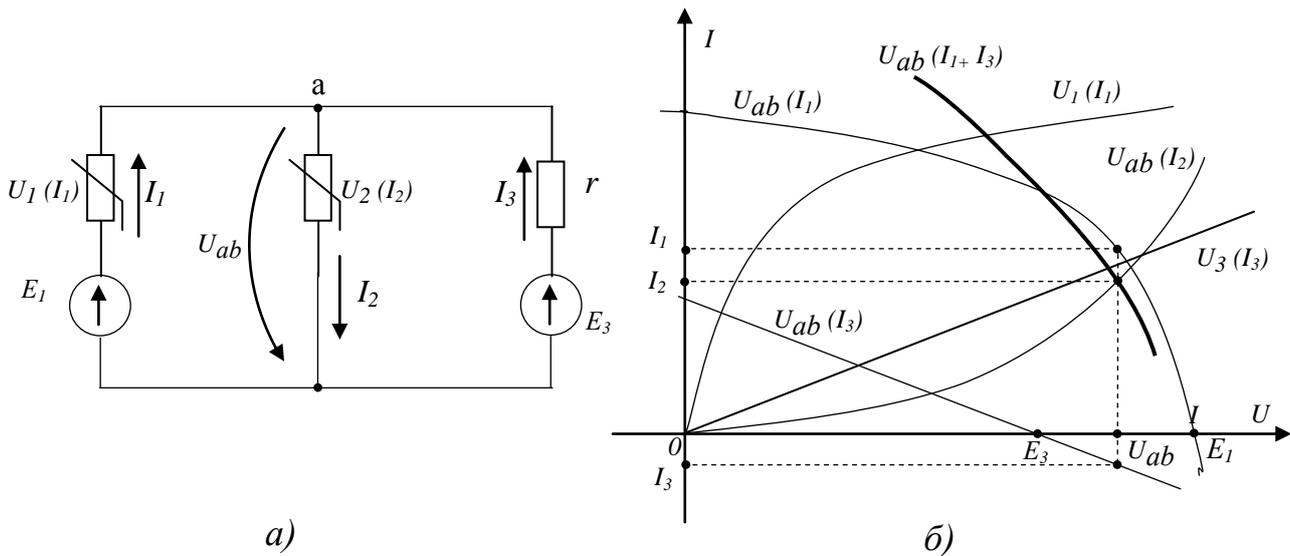


Рис. 12.4 Расчет нелинейной цепи методом двух узлов

## 12.2. Домашняя подготовка к работе

Начертить схемы и изучить графические методы расчета нелинейных электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях нелинейных элементов.

12.2.1. В соответствии с номером варианта (табл. 12.1) начертить рабочую схему (рис.12.4) и записать порядок ее расчета.

Таблица 12.1.

N вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$r_1, Ом$	200	300	400	250	350	450	200	300	400	250	350	450
$E_1, В$	20	10	-	10	20	-	18	20	-	20	18	-
$E_2, В$	12	-	12	20	-	20	20	-	2	16	-	18
$E_3, В$	-	20	20	-	12	14	-	18	16	-	20	20

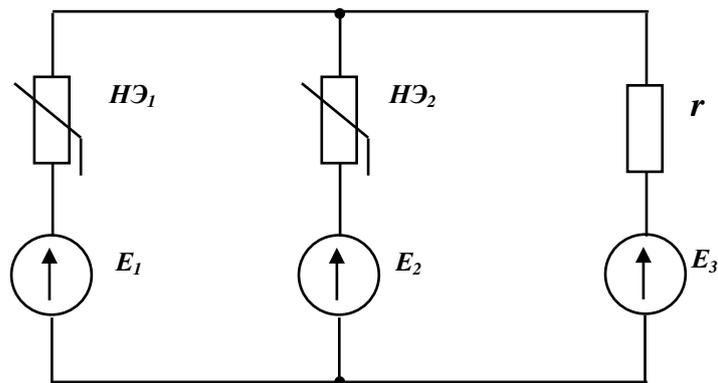


Рис. 12.4 Рабочая схема для исследования нелинейной цепи методом двух узлов

## 12.3. Порядок выполнения работы

12.3.1. Используя регулируемый источник постоянного тока, снять вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$ . Напряжение изменять от 0 до 20 В с интервалом 2 В. Данные занести в табл.12.2 и вычислить статические сопротивления элементов.

Таблица 12.2

№ п/п	Нелинейный элемент $HЭ_1$			Нелинейный элемент $HЭ_2$		
	$U, В$	$I, mA$	$r_{ст}, Ом$	$U, В$	$I, mA$	$r_{ст}, Ом$
1.						
2.						
.....						

12.3.2. По данным табл.12.2 в одной системе координат построить вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$  и зависимости их статических сопротивлений от напряжения источника.

12.3.3. В одной системе координат построить вольт-амперные характеристики нелинейных элементов и результирующие расчетные ВАХ цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединениях нелинейных элементов. В случае смешанного соединения использовать резистивный элемент  $r$  (табл.12.1), который следует подключить параллельно нелинейному элементу  $HЭ_2$ . Результаты расчета внести в табл.12.4.

12.3.4. Используя регулируемый источник постоянного напряжения, снять вольт-амперные характеристики цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединениях элементов.

Результаты измерений внести в табл.12.3. Сравнить экспериментальные  $I_3$  и расчетные  $I_p$  значения токов при одних и тех же значениях напряжения источника.

Таблица 12.3

Соединение элементов									
№ п/п	последовательное			параллельное			смешанное		
	$U, В$	$I_p, mA$	$I_3, mA$	$U, В$	$I_p, mA$	$I_3, mA$	$U, В$	$I_p, mA$	$I_3, mA$
1.									
2.									
.....									

12.3.5. Используя экспериментально полученные вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$ , в соответствии с номером варианта (табл.12.1) рассчитать методом двух узлов токи в ветвях рабочей схемы (рис.12.4). Результаты расчета внести в табл.12.4.

Таблица 12.4

Метод двух узлов	$U_{ab}, В$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$
Вычислено				
Измерено				

12.3.6. Собрать схему (рис.12.5) в соответствии с номером варианта (табл.12.1) измерить узловое напряжение и токи в ветвях. Результаты измерений внести в табл.12.4 и сопоставить их с расчетом.

#### 12.4. Вопросы для самоконтроля.

1. Какие цепи называются нелинейными?
2. Что называется вольт-амперной характеристикой нелинейного элемента?
3. Как определяются статические и дифференциальные сопротивления нелинейных элементов?
4. Как изменяется статическое сопротивление лампы накаливания с ростом напряжения?
5. Назовите области применения исследуемых в работе нелинейных элементов.
6. Приведите пример графического метода расчета нелинейных цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях элементов.
7. Объясните метод двух узлов применительно к расчету нелинейных электрических цепей.

## Лабораторная работа 13.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЕЙ С ВЕНТИЛЯМИ,  
СОДЕРЖАЩИХ ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО И СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЙ.

Цель: экспериментальная проверка напряжений и токов в цепях с полупроводниковым диодом, рассчитанных с использованием метода кусочно-линейной аппроксимации.

## 13.1. Пояснения к работе.

Сущность метода кусочно-линейной аппроксимации заключается в том, что реальную характеристику нелинейного элемента заменяют ломаной линией, состоящей из нескольких отрезков прямых. Для каждого линейного участка характеристики расчет выполняют с помощью методов, применяемых в линейных цепях. Для перехода к расчету на следующем линейном участке находят значения величин, соответствующих концу предыдущего линейного участка. Для каждого отрезка прямой нелинейный элемент в схеме представляют в виде последовательно соединенных пассивного линейного элемента и источника напряжения.

Наиболее просто метод кусочно-линейной аппроксимации реализуется в резистивных электрических цепях с вентилями, вольт-амперные характеристики которых чаще всего представляют в виде отрезков прямых.

В качестве примера рассмотрим схему (рис.13.1) с двумя источниками, тремя резисторами и полупроводниковым диодом.

Пусть :  $u(t) = 7.2 \sin \omega t$  В,  $E = 2.4$  В,  $r_1 = r_2 = 6$  Ом,  $r_3 = 12$  Ом.

Вольт-амперная характеристика диода представлена на рис.13.2 (идеальный диод). Используя метод кусочно-линейной аппроксимации, требуется определить токи в ветвях схемы и напряжение на диоде. Рассматривая работу схемы (рис.13.1) приходим к заключению, что возможны два режима и соответственно два интервала ее работы: при закрытом диоде ( $i_D = 0, u_D < 0$ ) и при открытом диоде ( $i_D > 0, u_D = 0$ ).

На рис.13.3 представлена схема замещения цепи для первого интервала времени, когда диод VD открыт и используется линейный участок 0-1 его вольт-амперной характеристики (рис.13.2). В этой схеме диод имеет нулевое сопротивление. Полученную цепь, в которой действуют источники синусоидального и постоянного напряжений, целесообразно, рассчитать по методу наложения:

$$i_1^1 = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \sin \omega t + \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} \frac{r_3}{r_1 + r_3} = 0,72 \sin \omega t + 0,16 \text{ А}$$

$$i_2^1 = i_D^1(t) = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \frac{r_3}{r_1 + r_3} \sin \omega t + \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} = 0,48 \sin \omega t + 0,24 \text{ А}$$

$$i_3^1 = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \frac{r_2}{r_2 + r_3} \sin \omega t - \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} \frac{r_1}{r_1 + r_3} = 0,24 \sin \omega t - 0,08 \text{ А}$$

$$u_D^1(t) = 0$$

Полученные выражения справедливы для тех значений  $\omega t$ , которые удовлетворяют условию:  $i_D^1 = i_2^1(t) \geq 0$ , т.е.  $0,48 \sin \omega t + 0,24 \geq 0$ , или  $\sin \omega t \geq 0,5$ .

Последнему неравенству соответствует два диапазона времени  $0 \leq \omega t \leq \omega t_1$  и  $\omega t_2 \leq \omega t \leq 360^\circ$  (в условиях рассматриваемой задачи  $\omega t_1 = 210^\circ$ ,  $\omega t_2 = 330^\circ$ ).

На рис. 13.4 представлена схема замещения цепи для второго интервала времени, когда диод VD заперт и используется участок 0-2 его вольт-амперной характеристики (рис.13.2). В этой схеме диод имеет бесконечно большое сопротивление (разрыв цепи). Токи в ветвях определяются только источником синусоидального напряжения:

$$i_1''(t) = i_3''(t) = \frac{U_m}{r_1 + r_3} \sin \omega t = 0,4 \sin \omega t, \text{ A}; \quad i_2''(t) = i_\delta''(t) = 0;$$

$$u_\delta''(t) = E + i_3''(t)r_3 - i_2''(t)r_2 = 4,8 \sin \omega t + 2,4 \text{ В.}$$

Полученные выражения справедливы для тех значений  $\omega t$ , которые удовлетворяют условию:  $u_\delta''(t) \leq 0$ , т.е.  $4,8 \sin \omega t + 2,4 \leq 0$ , или  $\sin \omega t \leq -0,5$ .

Последнему неравенству соответствует один диапазон времени:  $210^\circ \leq \omega t \leq 330^\circ$ .

По результатам расчета на рис. 13.5 представлены графики токов в ветвях, напряжение на диоде и входное напряжение сети.

Действующие и средние значения несинусоидальных токов определяются соответственно через интегралы вида:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt.$$

Приближенно они могут быть рассчитаны непосредственно по графикам в соответствии с выражениями:

$$I = \sqrt{\frac{\sum i_n^2}{n}}, \quad I_{cp} = \frac{\sum i_n}{n},$$

где:  $n$  - число участков, на которые разбивается период функции ( $n = 18 - 24$ );

$i_n$  - значение тока на каждом участке.

Тип диода выбирают по величине действующего значения тока в прямом направлении и по обратному максимальному напряжению в закрытом состоянии.

В нашем примере  $I_{\delta cp} = 0,441 \text{ A}$ ,  $I_\delta = 0,494 \text{ A}$ ,  $U_{\delta max} = 2,4 \text{ В}$ .

### 13.2. Домашняя подготовка к работе

13.2.1. В соответствии с номером варианта числовых значений параметров (табл. 13.1) для рабочей схемы (рис. 13.6, номер схемы соответствует номеру варианта) рассчитать мгновенные значения токов во всех ветвях электрической цепи и напряжения на диоде.

13.2.2. Построить расчетные графики токов  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  и напряжение  $u_\delta(t)$ .

13.2.3. Рассчитать средние и действующие значения токов в ветвях, а также максимальное обратное напряжение на диоде. Результаты расчета представить в табл. 13.2.

Таблица 13.1

Параметры электрической цепи		Номер варианта											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f=I \text{ кГц}$	$U_m, \text{ В}$	20	18	16	20	18	16	12	18	20	18	20	18
	$E, \text{ В}$	10	10	8	12	9	8	8	8	10	8	12	10
	$r_1, \text{ Ом}$	200	100	150	75	100	150	75	100	75	100	200	100
	$r_2, \text{ Ом}$	--	--	200	100	300	300	300	200	200	300	--	--
	$r_3, \text{ Ом}$	300	300	300	200	200	100	--	--	100	200	510	300

Таблица 13.2

Сравниваемые показатели	$I_{1 cp}$	$I_1$	$I_{2 cp}$	$I_2$	$I_{3 cp}$	$I_3$	$U_{\delta max}$
Расчет	А	А	А	А	А	А	А
Эксперимент							

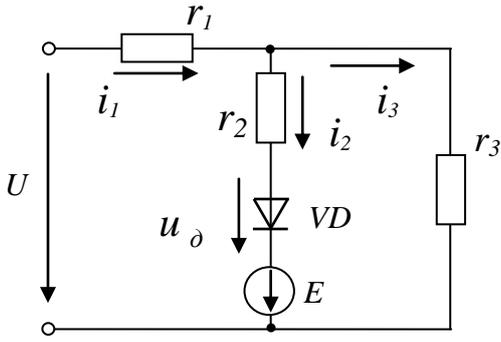


Рис. 13.1

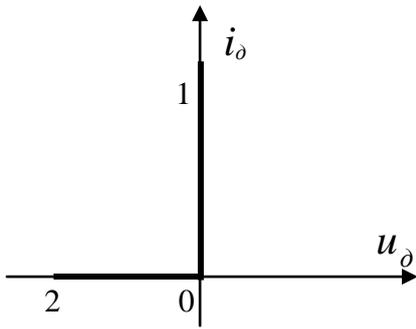


Рис. 13.2

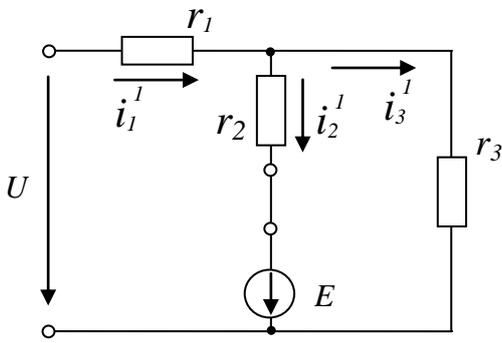


Рис. 13.3

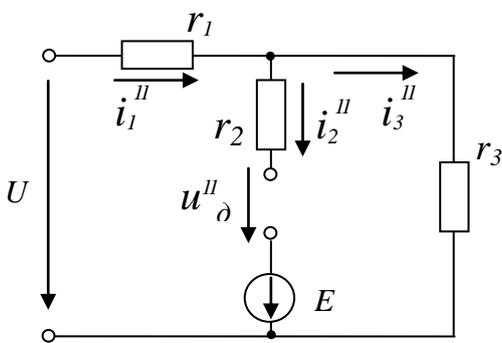


Рис. 13.4

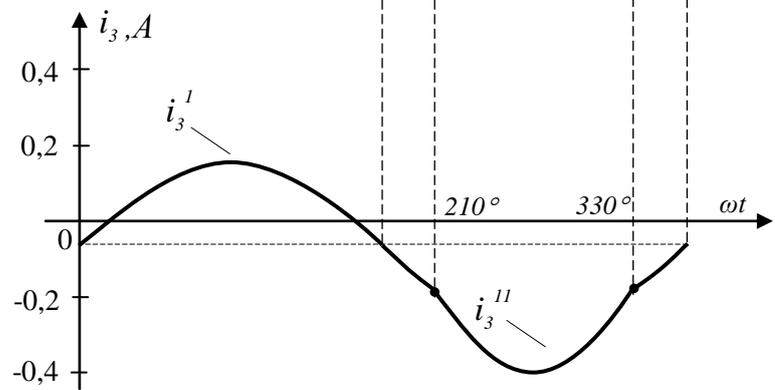
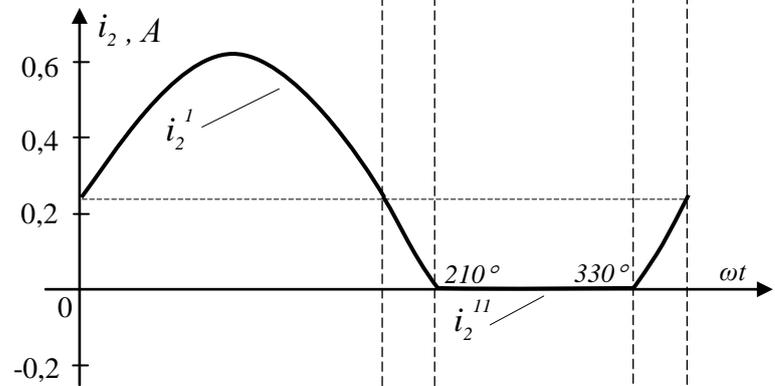
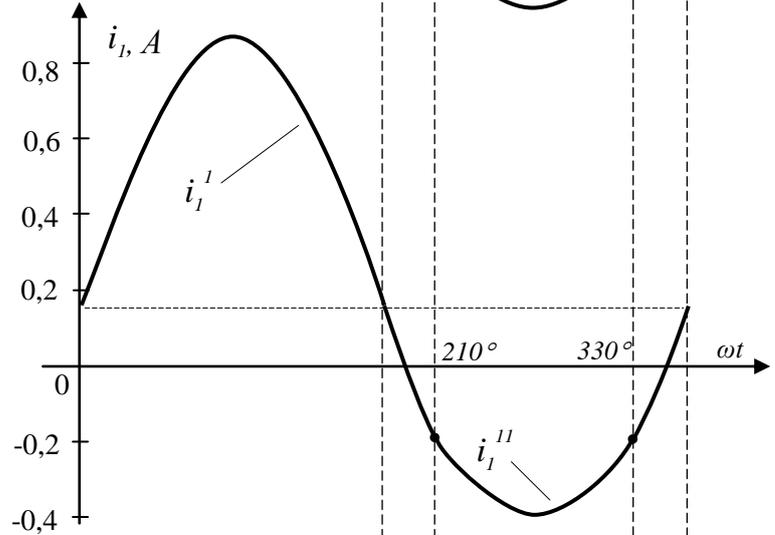
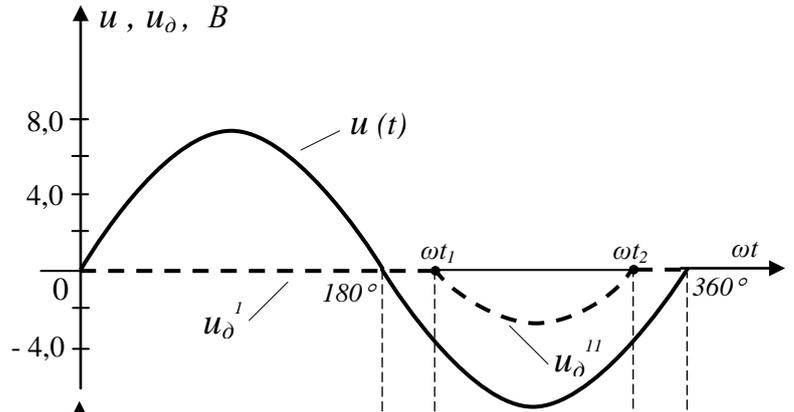


Рис. 13.5

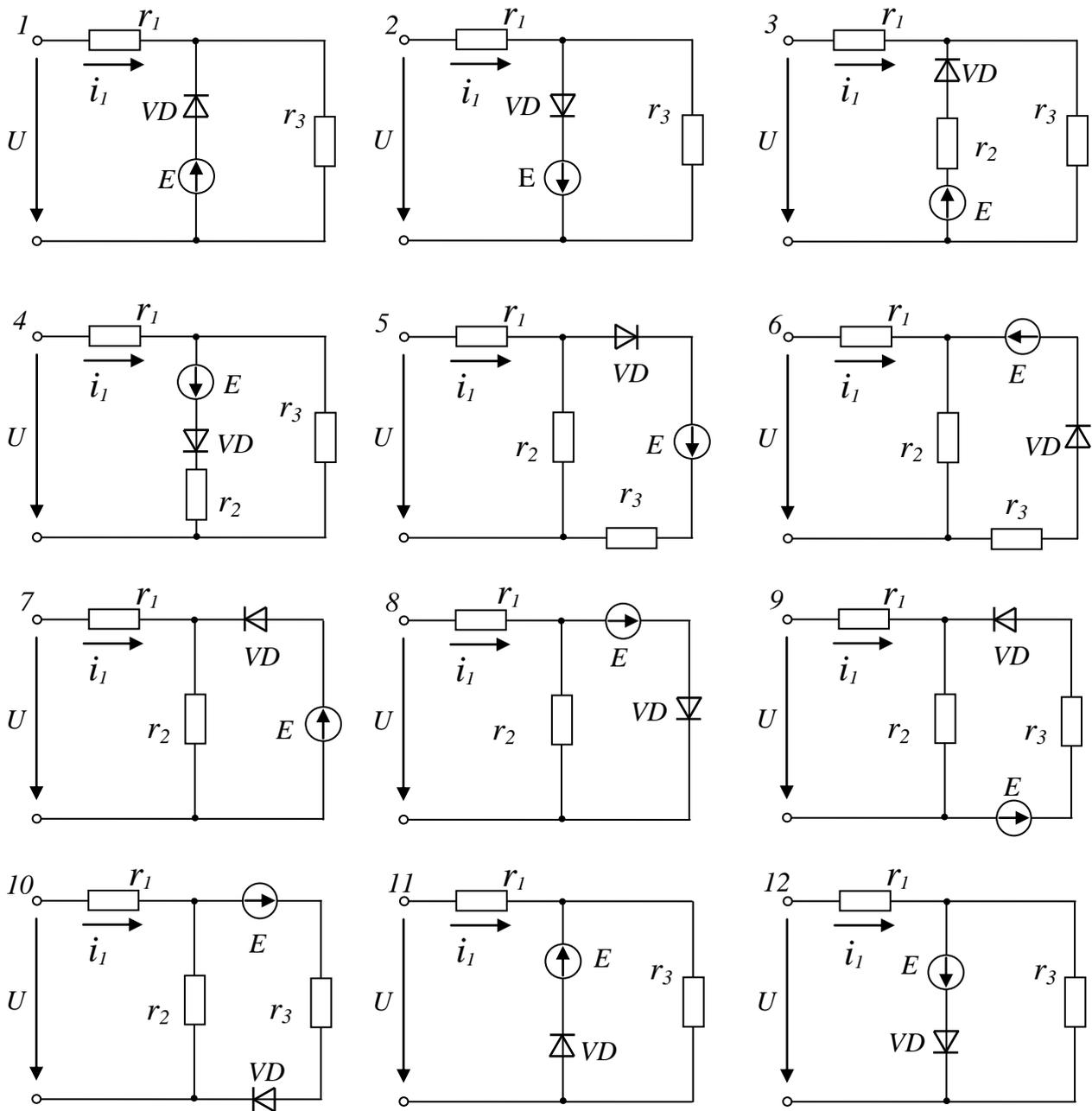


Рис.13.6

### 13.3. Порядок выполнения работы

13.3.1. В соответствии с номером варианта выбрать номера элементов цепи и собрать схему (рис. 13.6). В качестве источников энергии использовать источник регулируемого постоянного напряжения и источник регулируемого синусоидального напряжения частотой 1 кГц. В каждой ветви предусмотреть возможность включения амперметра.

13.3.2. Подключая поочерёдно осциллограф параллельно резисторам  $r_1, r_2, r_3$ , перенять с экрана осциллографа графики зависимости напряжений от времени, которые пропорциональны зависимостям  $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ . С учетом масштабов времени  $m_t$  и тока  $m_i = m_U / r$ , ( $m_U$  - масштаб напряжения) сравнить экспериментально полученные мгновенные токи в ветвях с расчетными зависимостями  $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$ .

13.3.3. Переснять с экрана осциллографа график зависимости мгновенного значения напряжения на диоде от времени и сравнить его с расчетным значением  $u_o(t)$ . Величину максимального обратного напряжения на диоде внести в табл. 13.2.

13.3.4. С помощью цифрового измерительного прибора типа Щ-4313 измерить действующие и средние значения токов в ветвях схемы (рис. 13.6) и внести их в табл. 13.2. При измерении средних значений токов переключатель прибора поставить в положение “Постоянный ток”, а при измерении действующих токов - “Переменный ток”.

13.3.5. Сравнить расчетные и экспериментальные значения токов в табл. 13.2 и сделать соответствующие выводы.

#### 13.4. Вопросы для самоконтроля

1. В чем состоит сущность метода кусочно-линейной аппроксимации?
2. Приведите другие возможные методы расчета напряжений и токов исследуемой цепи с вентилем.
3. Нарисуйте ВАХ реального и идеального полупроводникового диода.
4. По каким параметрам выбирается полупроводниковый диод?
5. Из каких соображений определяют временные границы интервалов аппроксимации?
6. Как вычисляют действующие и средние значения несинусоидальных напряжений и токов?
7. Приборы каких систем могут быть использованы для измерений действующих и средних значений несинусоидальных токов.

## Лабораторная работа 14.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**Цель.** Изучение однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей, содержащих ёмкостной фильтр.

## 14.1. Пояснения к работе

Выпрямитель - устройство, служащее для преобразования переменного тока в постоянный. Основным элементом выпрямителей является полупроводниковый диод, обладающий односторонней проводимостью. На рис. 14.1,а приведена схема однополупериодного выпрямителя, а на рис. 14.1,б - временная диаграмма тока в нагрузке, подключённой к выпрямителю. Схема двухполупериодного выпрямителя ( мостовая ) и временная диаграмма тока в резисторе  $r_H$  показаны на рис.14.2,а,б.

Основными величинами, характеризующими работу различных схем выпрямителя, являются: среднее значение выпрямленного тока нагрузки ( нулевая гармоника )  $I_{Hcp}$ , действующее значение тока нагрузки  $I_H$ , среднее значение напряжения на нагрузке  $U_{Hcp}$ , действующее напряжение на нагрузке  $U_H$ , активная мощность нулевой гармоники  $P_0$ , активная мощность нагрузки  $P_H$ , коэффициент эффективности выпрямителя  $\eta$  и др.

Эти величины определяются следующими выражениями:

$$I_{Hcp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d\omega t, \quad I_H = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\omega t) d\omega t}, \quad U_{Hcp} = I_{Hcp} r_H,$$

$$U_H = I_H r_H, \quad P_0 = U_{Hcp} I_{Hcp}, \quad P_H = U_H I_H, \quad \eta = \frac{P_0}{P_H} \cdot 100\%$$

Для повышения эффективности выпрямителя и снижения пульсаций тока в нагрузке применяют сглаживающие фильтры. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром представлена на рис. 14.3,а, зависимости напряжения сети и напряжения на нагрузке от времени показаны на рис. 14.3,б. Токи и напряжения в схеме (рис. 14.3,а) определяют с помощью метода кусочно-линейной аппроксимации. При этом напряжение и ток в нагрузке описываются выражениями:

$$u_H(\omega t) = u_C(\omega t) = \begin{cases} U_m \cdot \sin(\omega t) & \omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2 \\ U_m \cdot \sin \omega t_2 \cdot e^{\frac{-\omega t - \omega t_2}{\omega r_H C}} & \omega t_2 \leq \omega t \leq 2\pi + \omega t_1 \end{cases}, \quad i_H(\omega t) = \frac{u_H(\omega t)}{r_H},$$

где:  $\omega t_1$  и  $\omega t_2$  – соответственно моменты отпирания и запираания диода.

Момент запираания диода  $\omega t_2$  определяется из условия равенства нулю тока диода

$$i(\omega t_2) = i_H(\omega t_2) + i_C(\omega t_2) = \frac{U_m}{r_H} \sin \omega t_2 + U_m \omega \cos \omega t_2 = 0,$$

откуда  $\omega t_2 = \arctg(-\omega r_H \cdot C)$ . Отпирание диода происходит в моменты времени  $\omega t_1, 2\pi + \omega t_1$

и т.д. Момент отпирания диода можно найти из условия:  $u_D = u - u_C = 0$ .

В момент времени  $2\pi + \omega t_1$ :





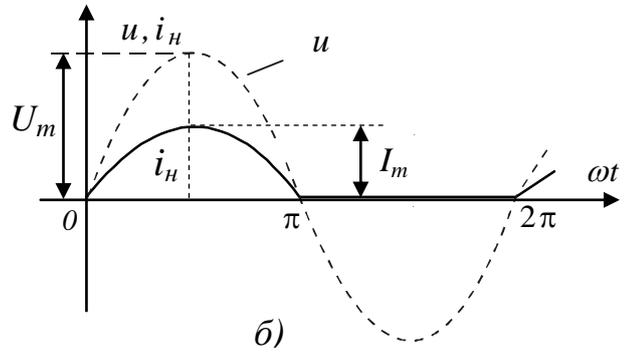
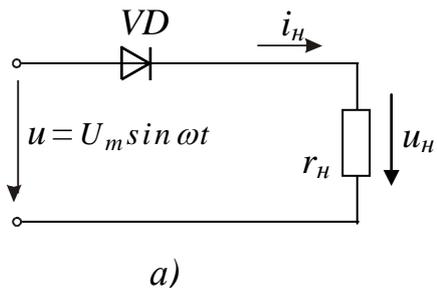


Рис.14.1

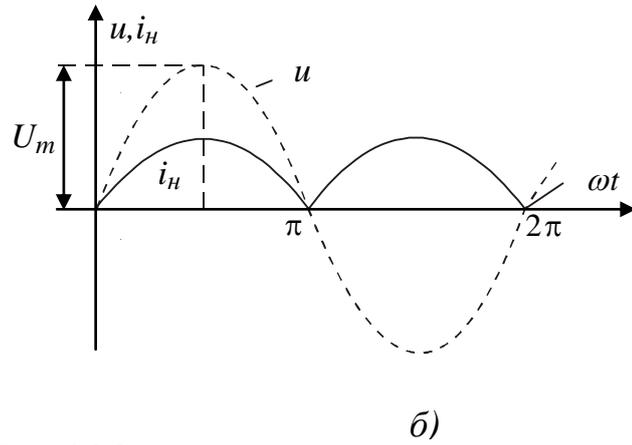
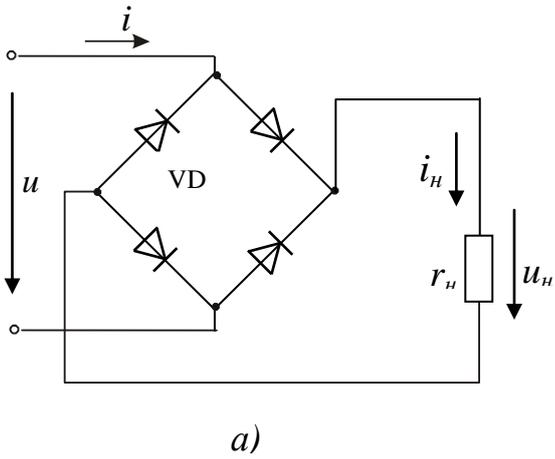


Рис.14.2

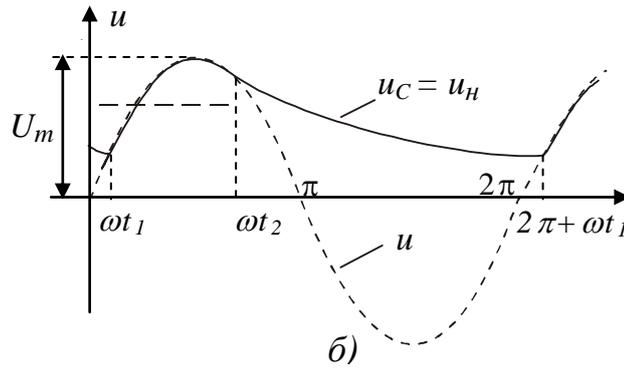
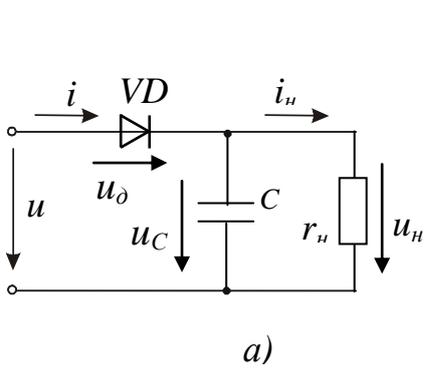


Рис.14.3

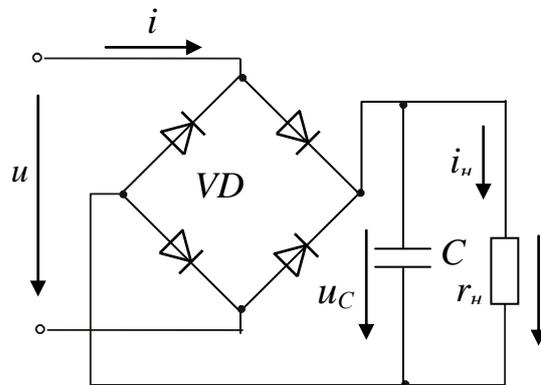


Рис.14.4

### 14.3. Порядок выполнения работы

14.3.1. В соответствии с номером варианта выбрать номера элементов цепи и собрать схему однополупериодного выпрямителя без конденсатора (рис.14.1). предусмотреть возможность включения амперметра в цепи резистора. Установить с помощью осциллографа требуемую, согласно табл.14.1 величину амплитудного напряжения источника. Снять с экрана осциллографа графики  $u_H(t)$  и  $i_H(t)$  и сравнить их с расчетными зависимостями.

14.3.2. С помощью измерительного прибора Щ-4313 измерить действующие и средние значения напряжения и тока на нагрузке схемы (рис.14.1), результаты измерений занести в табл.14.2. Определить остальные величины, характеризующие работу выпрямителя.

14.3.3. Собрать схему однофазного однополупериодного выпрямителя с конденсатором (рис.14.3). Для емкости конденсатора (табл.14.1.) снять с экрана осциллографа графики напряжения и тока на нагрузке  $u_H(t)$  и  $i_H(t)$ , сравнить их с расчетными зависимостями. Определить моменты отпирания  $\omega t_1$  и запираания  $\omega t_2$  диода, занести их в табл.14.2.

14.3.4. С помощью измерительного прибора Щ-4313 измерить действующие и средние значения напряжения и тока на нагрузке схемы (рис.14.3), занести их в табл.14.2. Определить остальные величины, характеризующие работу выпрямителя.

14.3.5. В схеме однополупериодного выпрямителя с конденсатором (рис.14.3) изменить емкость конденсатора ( $C=5$  мкФ и  $10$  мкФ) и согласно табл.14.2 определить все величины, характеризующие работу выпрямителя. Сделать вывод о влиянии емкости конденсатора на основные характеристики выпрямителя.

14.3.6. Собрать мостовую схему двухполупериодного выпрямителя (рис.14.2) и выполнить работу, указанную в п. 14.3.1 и 14.3.2.

14.3.7. Собрать мостовую схему двухполупериодного выпрямителя с конденсатором (рис.14.4) и выполнить работу, указанную в п. 14.3.3 - 14.3.5. Сделать вывод о влиянии емкости конденсатора на основные характеристики выпрямителя.

### 14.5. Вопросы для самоконтроля

1. Какие устройства являются выпрямителями?
2. Назовите известные Вам схемы выпрямителей.
3. Какие величины характеризуют работу выпрямителя?
4. Как можно уменьшить пульсации тока в нагрузке выпрямителя?
5. Какой системы приборы используются для измерения средних и действующих значений выпрямленного тока и напряжения?
6. Какое влияние оказывает конденсатор, включенный параллельно нагрузке, на основные характеристики выпрямителя?

## Список рекомендуемой литературы

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники: В 3 ч.- Ч.1. Линейные электрические цепи. - М.: Энергия, 1978. - 592 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высш. шк., 1984. - 558 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов П.В. Основы теории цепей. - М.: Энергия, 1975. - 752 с.
4. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. - М.: Высш. шк., 1977. - 281 с.
5. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники В 2 т. - Л.: Энергоиздат, 1981.— Т.1. - 536 с.; Т.2. - 416 с.
6. Татур Т.А. Основы теории электрических цепей: Справ, пособие.-М.: Высш. шк., 1980. - 271 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения о стенде УИЛС-2 .....	3
Лабораторная работа 10. Исследование переходных процессов в электрических цепях постоянного тока с одним накопителем энергии.....	5
Лабораторная работа 11. Исследование переходных процессов в последовательной электрической цепи постоянного тока с R, L, C -элементами.....	13
Лабораторная работа 12. Исследование нелинейных цепей постоянного тока....	19
Лабораторная работа 13. Исследование разветвленных цепей с вентилями, содержащих источники постоянного и синусоидального напряжений.....	23
Лабораторная работа 14. Исследование однофазных выпрямителей синусоидального тока.....	28
Список рекомендуемой литературы.....	33