

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Декан (директор) ЭЛТИ

\_\_\_\_\_ А.П.Суржиков

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2010 г.

**В.А.Колчанова, Е.О.Кулешова,  
С.В.Пустынников. Ю.Н.Исаев**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Руководство к лабораторным работам по теоретическим основам  
электротехники в среде Electronics Workbench. Часть 2.  
Переходные процессы в линейных электрических цепях.  
Установившиеся режимы нелинейных цепей и  
цепей с распределёнными параметрами.  
Для студентов ЭЛТИ и ИДО

Издательство  
Томского политехнического университета

2010

УДК 621.3.01 (076.5)

ББК 31.21я7

ТЗЗ

Колчанова В.А.

Руководство к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники в среде Electronics Workbench . Часть 2. Для студентов ЭЛТИ и ИДО. Переходные процессы и нелинейные электрические цепи. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 53 с.

**УДК 621.3.01 (076.5)**

**ББК 31.21я7**

Рецензент профессор,  
доктор технических наук

Ю.П. Усов

Руководство рассмотрено и рекомендовано к изданию методическим семинаром кафедры теоретической и общей электротехники ЭЛТИ  
" 12 " ноября 2009 г.

Зав. кафедрой  
доц., канд. техн. наук

В.А.Лукутин

Одобрено учебно-методической комиссией ЭЛТИ.  
Председатель учебно-методической комиссии

В.И. Готман

## ВВЕДЕНИЕ

Руководство предназначено для студентов Электротехнического института Томского политехнического университета (ЭЛТИ ТПУ), которые изучают курс «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и выполняют лабораторные работы по этой дисциплине.

Руководство содержит описания лабораторных работ по переходным процессам линейных электрических цепей и установившимся режимам нелинейных цепей с методическими указаниями по их выполнению с учетом специфики среды Electronics Workbench и возможностей реализации в ней цели каждой из лабораторных работ.

### Общие правила проведения лабораторных работ

1. В лаборатории необходимо соблюдать тишину, чистоту и порядок.
2. Для выполнения работ студенты объединяются в постоянные бригады по 2-3 человека.
3. К предстоящей лабораторной работе студенты готовятся заранее, ознакомившись с описанием работы и рекомендованной литературой. Результаты подготовки записываются в тетрадь протоколов, наличие которой обязательно для каждого студента.
4. В тетрадь протоколов при подготовке необходимо внести цель работы, основные соотношения, схемы, заготовки таблиц, ответы на контрольные вопросы.
5. По результатам выполненной работы каждым студентом аккуратно оформляется отчёт. В отчёте приводятся: цель работы, электрическая схема, основные соотношения, таблицы с результатами опытов и расчётов, примеры расчётов, графики зависимостей, сопровождаемые пояснениями, анализ полученных результатов и выводы.
6. Преподаватель принимает отчёты по предыдущей работе и проверяет готовность студента к предстоящей работе. **Н е п о д г о т о в л е н н ы е** студенты, у которых отсутствуют отчёты или тетрадь протоколов, к работе не допускаются.
7. Получив допуск к работе, студенты собирают цепь на закреплённом за ними рабочем месте. Собранный цепь предъявляется на проверку преподавателю.
8. После проверки цепи преподавателем студенты приступают к экспериментам. Результаты наблюдений и вычислений вносятся в таблицы протокола.
9. По окончании работы протокол предъявляется преподавателю. **Т о л ь к о п о с л е п о д п и с и** протокола преподавателем, студенты разбирают цепь.
10. На основании протоколов студенты производят обработку результатов наблюдений и оформляют отчёты.

## РАБОТА 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

**Цель работы.** Исследование переходных процессов в цепях с конденсатором, характеризующихся дифференциальными уравнениями первого порядка.

#### *Пояснения к работе*

При всяком изменении режима работы цепи, содержащей хотя бы один накопитель электрической энергии (индуктивность  $L$  или емкость  $C$ ) возникают переходные процессы – процессы перехода от одного установившегося режима к другому. Мощность реальных источников в цепи конечна, поэтому связанные с энергией величины – ток в индуктивности и напряжение на емкости – могут изменяться только плавно, без скачков. В этом суть законов коммутации.

Решение системы дифференциальных уравнений, характеризующих состояние цепи, может быть найдено в виде суммы принужденной и свободной составляющих. Например, для тока:  $i = i_{пр} + i_{св}$ . Принужденная составляющая при постоянных и периодических источниках определяется из расчета установившегося режима ( $t \rightarrow \infty$ ) послекоммутационной цепи и вид ее соответствует характеру источников. Свободная составляющая записывается в виде суммы экспонент  $i_{св} = \sum A_k e^{p_k t}$  при различных вещественных корнях характеристического уравнения  $p_k$ . Постоянные интегрирования  $A_k$  определяются из начальных условий – зависимых и независимых.

Независимые условия (начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости) определяются по законам коммутации и требуют предварительного расчета установившегося режима докоммутационной цепи. Начальные же значения остальных величин (зависимые условия) определяются из уравнений, описывающих состояние послекоммутационной цепи в первый момент после коммутации ( $t = +0$ ).

В цепи с одним накопителем свободная составляющая содержит только один корень и одну экспоненту. Например, для схемы рис. 12.1,а  $i_{св} = A_k e^{p_k t}$ , причем  $i = i_{св}$ , поскольку в установившемся режиме постоянный ток через конденсатор не течет и  $i_{пр} = 0$ . До коммутации конденсатор не был заряжен, так что по второму закону коммутации  $u_C(+0) = u_C(-0) = 0$ . Поэтому  $A = i_{св}(0) = [U - u_C(+0)]/R$ . Тогда ток и напряжение при заряде конденсатора

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \\ u_C(t) &= U - i(t)R = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

Здесь корень характеристического уравнения  $p = -(RC)^{-1}$ , а постоянная времени  $\tau = \frac{1}{|p|} = RC$ . Она может быть найдена по экспериментально полученной зависимости  $i(t)$  как длина подкасательной (рис.12.1, б).

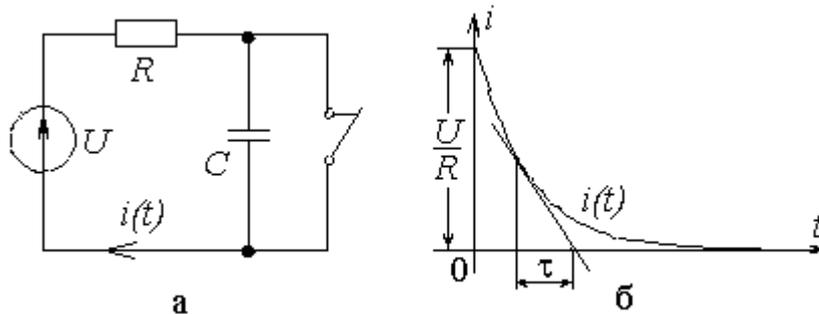


Рис.12.1

Аналогичным образом могут быть получены выражения для тока и напряжения при разряде конденсатора на сопротивление  $R$ :

$$i(t) = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}; \quad u_C(t) = U e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (12.2)$$

*Схема электрической цепи*

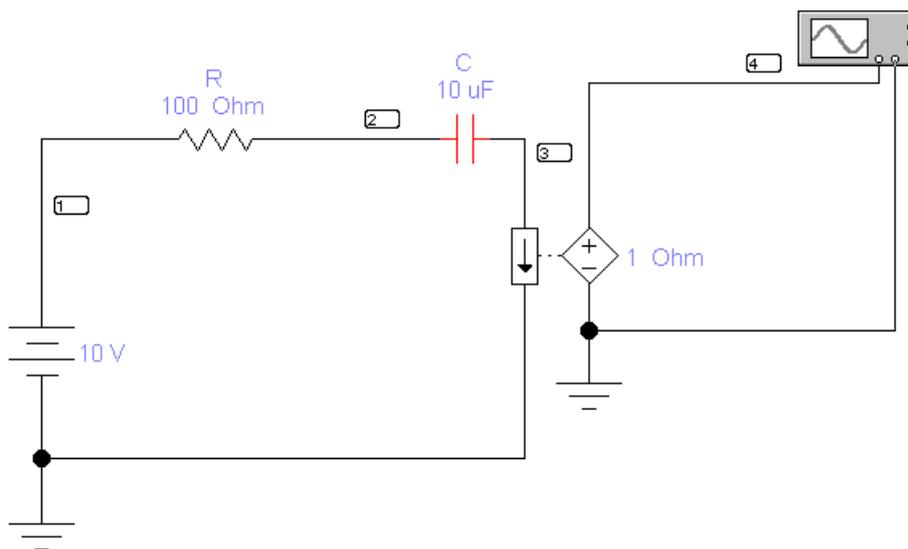


рис. 12.2.

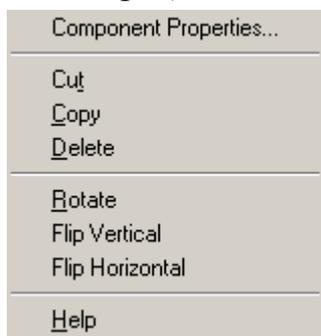
Для исследования процессов заряда и разряда конденсатора используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 12.2. Питание цепи осуществляется от источника постоянного напряжения, величина которого  $U$ , а также значения  $R$  и  $C$  выбираются в соответствии с вариантом, указанным преподавателем из табл. 12.1.

Таблица 12.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U$	В	10	11	12	13	14	3	4	4	5	6
$R$	кОм	100	122	133	147	200	22	22	33	33	47
$C$	мкФ	100	100	100	100	100	470	470	470	470	470
Вариант		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$U$	В	10	11	12	13	14	3	4	4	5	6
$R$	кОм	200	222	233	247	300	32	32	43	43	57
$C$	мкФ	100	100	100	100	100	470	470	470	470	470
Вариант		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$U$	В	10	11	12	13	14	3	4	4	5	6
$R$	кОм	110	130	143	160	190	42	52	53	63	67
$C$	мкФ	100	100	100	100	100	470	470	470	470	470

### Исследование переходных процессов в среде Electronics Workbench

Процесс создания схемы начинается с выбора элементов и приборов из



библиотек программы (перетаскиванием мышью необходимых элементов на рабочий стол), расположение компонентов схемы в соответствии подготовленным эскизом. При размещении компонентов на рабочем поле можно воспользоваться динамическим меню, всплывающим после щелчка правой кнопки мыши по компоненту, с помощью которого можно копировать (**Copy**), удалять (**Delete**), вырезать (**Gut**), вставлять (**Paste**) и поворачивать элемент (**Rotate**) и менять его параметры (**Component Properties**), отобразить по вертикали или по горизонтали (**Flip Vertical, Flip Horizontal**).

После размещения компонентов производится соединение их выводов проводниками. Курсор мыши подводится к выводу компонента, и после появления жирной черной точки (узла) нажимается левая кнопка мыши и появляющийся при этом проводник протягивается к выводу другого компонента до появления на нем такой же жирной точки, после чего левая кнопка мыши опускается и соединение готово. Подключение измерительных приборов выполняется аналогично подключению компонентов схемы. При этом можно использовать цветные проводники, которые выделяют подключенный прибор и окрашивают в соответствующий цвет выводимые графики. Для изменения цвета проводника нужно два раза щелкнуть левой кнопкой мыши на изображение и в открывшем-

ся окне выбрать нужный цвет. Для начала анализа схемы системой необходимо активизировать схему нажатием кнопки **6**, для остановки анализа – кнопку **7**. Чтобы сохранить рабочий лист (документ) под нужным названием, необходимо щелкнуть мышью по третьей кнопке в третьей строке сверху – пиктограмме с изображением дискеты. Появится диалоговое окно **Save as** (Сохранение). В текстовом поле **File name** (Имя файла) нужно дать имя файлу (документу). Система автоматически добавит расширение .ewb.

Итак, перед нами готовая схема (рис. 12.3).

Если переходный процесс возникает в результате включения схемы, как в данном случае, то никаких коммутаторов не требуется.

Сначала необходимо установить нумерацию контрольных точек в схеме. Для этого необходимо раскрыть диалоговое окно **Show Hide** (по пути Circuit > Schematic Options > Show/Hide). Окно показано на рис. 12,4. В окошке Show nodes курсором мыши необходимо сделать отметку. Щелкнуть кнопку ОК, после чего появится нумерация точек соединения элементов

Наиболее быстрый способ пронумеровать узлы – кликнуть правой клавишей мыши на свободном участке рабочего поля, в выпавшем меню выбрать пункт Schematic Options, что приведёт к открытию окна показанного на рис. 12.4. Необходимо поставить маркер рядом с пунктом Show nodes и нажать ОК.

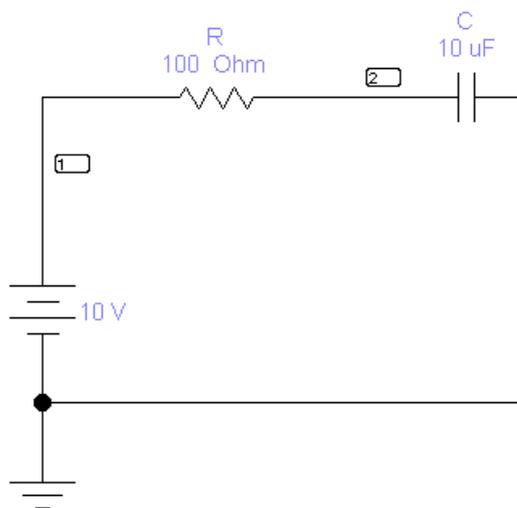


Рис.12.3.

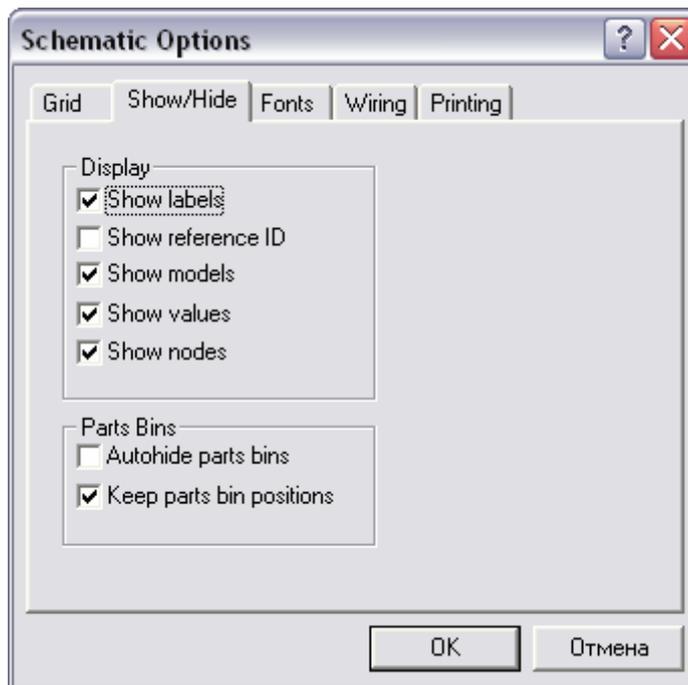


Рис. 12.4.

Следующий необходимый шаг для проведения расчёта переходного режимов – это открытие диалогового окна команды Transient Analysis (рис. 12.5.) по пути Analysis < Transient.

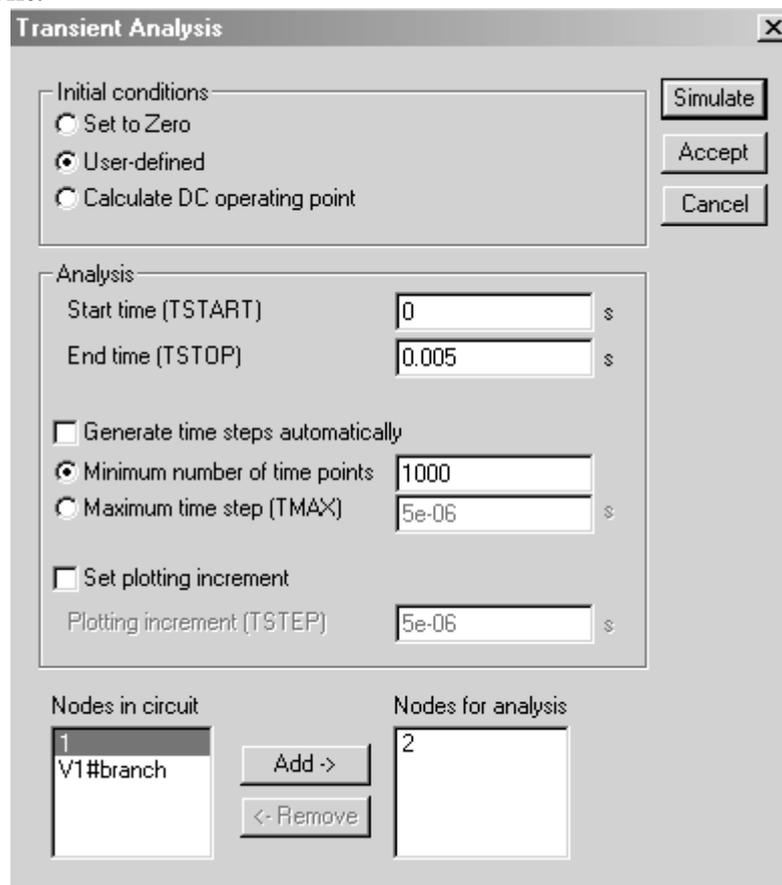


Рис. 12.5.

Диалоговое окно команды содержит следующие данные:

**Initial conditions** – установка начальных условий моделирования (*Set to Zero* – установка в нулевое исходное состояние контрольно-измерительных приборов перед началом моделирования, *User-defined* – управление процессом моделирования проводится пользователем,

*Calculate DC operating point* – выполнение расчета режима по постоянному току).

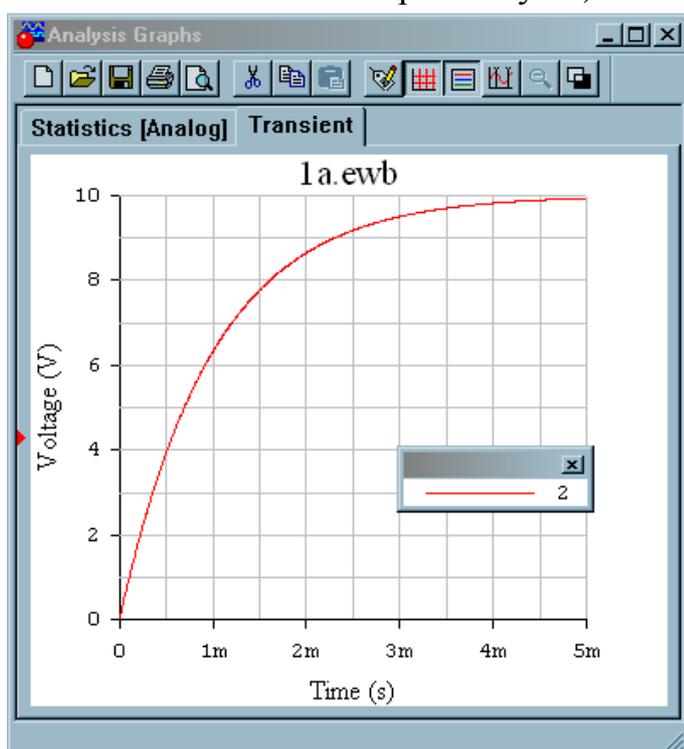
**Analysis** – параметры анализа (*TSTART* – время начала анализа переходных процессов; *TSTOP* – время окончания анализа; *Generate time steps automatically* – расчет переходных процессов с переменным шагом, выбираемым автоматически в соответствии с допустимой относительной ошибкой *RELTOL*, задаваемой в окне *Analysis Options*);

**Nodes in circuit** – список всех узлов цепи.

**Nodes for analysis** – номера узлов, для которых рассчитывается переходные процессы, перечень таких узлов устанавливается нажатием кнопок *Add* >(добавить) и *Rename* <(удалить), предварительно выделив курсором выбранный узел.

Для анализа переходного процесса:

Прежде всего, должен быть отмечен пункт *User-defined* в разделе **Initial conditions**. В полях **Start time** и **End time** задаём необходимое нам время начала и конца анализа переходного процесса в *секундах*. (Для данной схемы – начало переходного процесса – 0; Время окончания переходного процесса -  $5\tau = 5 \cdot RC$ ). Далее указываем анализируемые узлы (потенциал узла 2 на схеме рис 12.3 определяет напряжение конденсатора  $U_C = \varphi_2 - 0$ , т.к. потенциал заземленной точки схемы равен нулю).



Так же есть возможность определить количество рассчитываемых точек – можно задать минимальное значение количества расчётных точек или же определить максимальный шаг времени до следующей расчетной точки, пункты *Minimum number of time points* и *Maximum time step* (TMAX) соответственно. По умолчанию выбор количества точек происходит автоматически.

Анализ переходных процессов инициализируется нажатием кнопки **Simulate**, после чего на экране появляются осциллограммы переходных процессов в уменьшенном масштабе. Увеличенное изображение графиков можно получить, нажав кнопку увеличения размера изображения.

нажав кнопку увеличения размера изображения.

Для удобства обработки результатов переходных процессов в верхней части окна имеется ряд функциональных кнопок. Укажем на важнейшие из них.

Кнопка **1** раскрывает диалоговое окно (рис. 12.6), позволяющее при закладке General установить ряд опций:

*Font* – выбрать шрифт надписей;

*Grid* – ширину сетки экрана и ее цвет;

*Grid on; Cursors on* – удаление сетки и визиров с экрана;

*Single Trace* – выбор для анализа отдельного графика, при этом номер графика выбирается установкой его номера в окошке Trace;

*All Traces* – одновременный анализ всех графиков.

Кнопка **2** устанавливает и удаляет сетку экрана.

Кнопка **3** выводит информационное окно с номерами узлов и цветом соответствующих графиков (верхний правый угол экрана). Курсором мыши это окно можно переместить в любое место экрана.

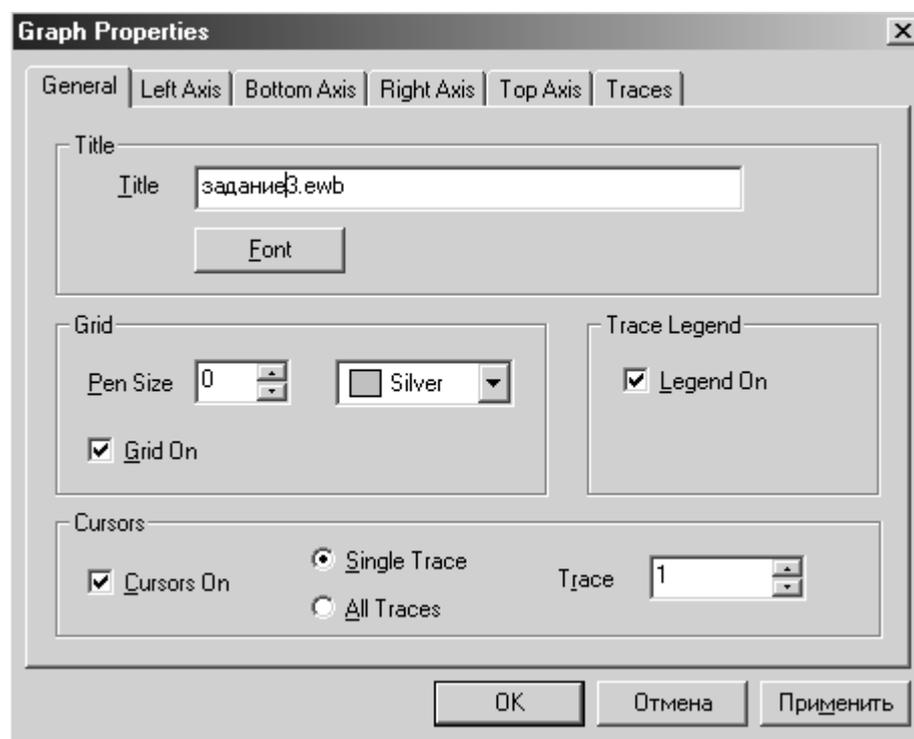


Рис. 12.6

Кнопка **4** выводит на экран два измерительных визира (рис 3.14). За верхние треугольники визеры можно перемещать курсором мыши в любое место графиков и измерять значение координат графика.

Кнопка **5** изменяет цвет фона экрана.

На экран (правый верхний угол) выводится также цифровая информация о точках графика, на которые установлены визеры. Информация помещается в отдельном окне, содержание которого изменится в зависимости от положения визиров.

Обозначения переменных величин информационного окна следующее:

$x_1, y_1$  – координаты точки графика для первого визира;

$x_2, y_2$  – координаты точки графика для второго визира;  
 $\min x, \max x; \min y, \max y$  – минимальные и максимальные значения координат графика на интервале времени переходного процесса.

Для получения осциллограмм тока (в данном случае  $i(t)$ ) можно использовать источник напряжения, управляемый током с коэффициентом передачи 1 Ом, подключаемый к осциллографу.

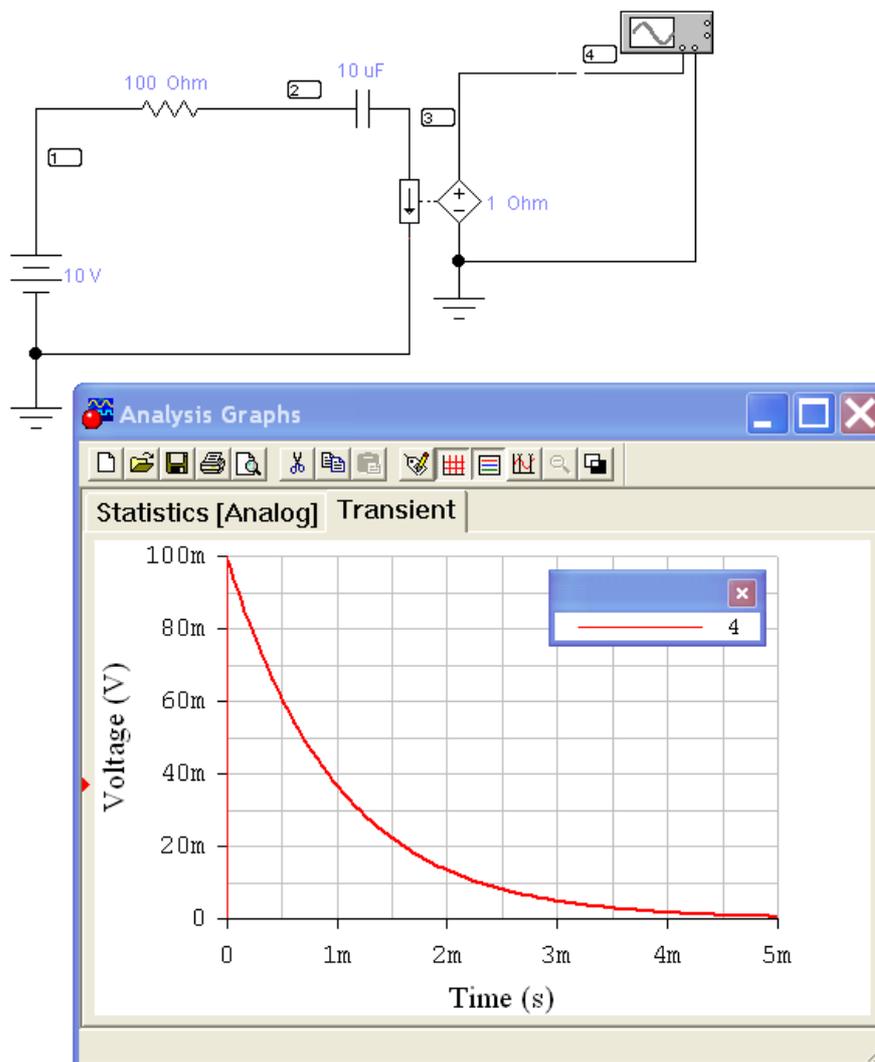


Рис. 12.7.

Введём последовательно в цепь источник напряжения, управляемый током, напряжение на котором пропорционально проходящему по нему току (Current-Controlled Voltage Source). Выставим переходное сопротивление (Transresistance) источника, которое является коэффициентом между входным током и выходным напряжением данного источника. Получим схему, представленную на рис. 12.7. и соответствующую осциллограмму тока.



5. Аналитически рассчитать зависимости  $i(t)$  и  $u_C(t)$  по формулам (12.1) и (12.1).

*Указание.* Целесообразно числовые значения тока и напряжения найти в моменты времени  $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau$ . Результаты расчета внести в табл.12.2.

6. Построить расчетные кривые  $i(t)$  и  $u_C(t)$  в тех же осях, что и кривые п.3.
7. Проанализировать полученные результаты, сделать выводы по работе.

## РАБОТА 13

### ИЗУЧЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ЗАКОНОВ КОММУТАЦИИ

**Цель работы.** Экспериментальная проверка закона сохранения суммарного заряда конденсаторов, подключенных к общему узлу, при импульсных переходных процессах. Экспериментальное исследование перераспределения энергии во время этих процессов.

#### *Пояснения к работе*

При переходных процессах в цепях с индуктивными сечениями и емкостными контурами может наблюдаться очень быстрая импульсная начальная часть процесса, сменяемая более медленной частью или установившимся режимом. Для упрощения анализа переходного процесса импульсную часть обычно считают происходящей мгновенно. При этом приходится признать возможным нарушение законов коммутации, связанных с непрерывностью напряжений на конденсаторах и токов в индуктивностях.

В то же время законы Кирхгофа требуют соблюдения в момент коммутации ( $t = 0$ ) более общих закономерностей:

***суммарный заряд конденсаторов в ветвях, подключенных к общему узлу, и суммарное потокосцепление индуктивностей в ветвях, образующих контур, в первый момент после коммутации ( $t = +0$ ) сохраняют те же значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией ( $t = -0$ ).***

Так что для каждого из узлов контура, составленного только из емкостей,

$$\Sigma q(+0) = \Sigma q(-0) \text{ или } \Sigma C u_C(+0) = \Sigma C u_C(-0),$$

а для каждого контура, в который входят индуктивности, связанные в узел,

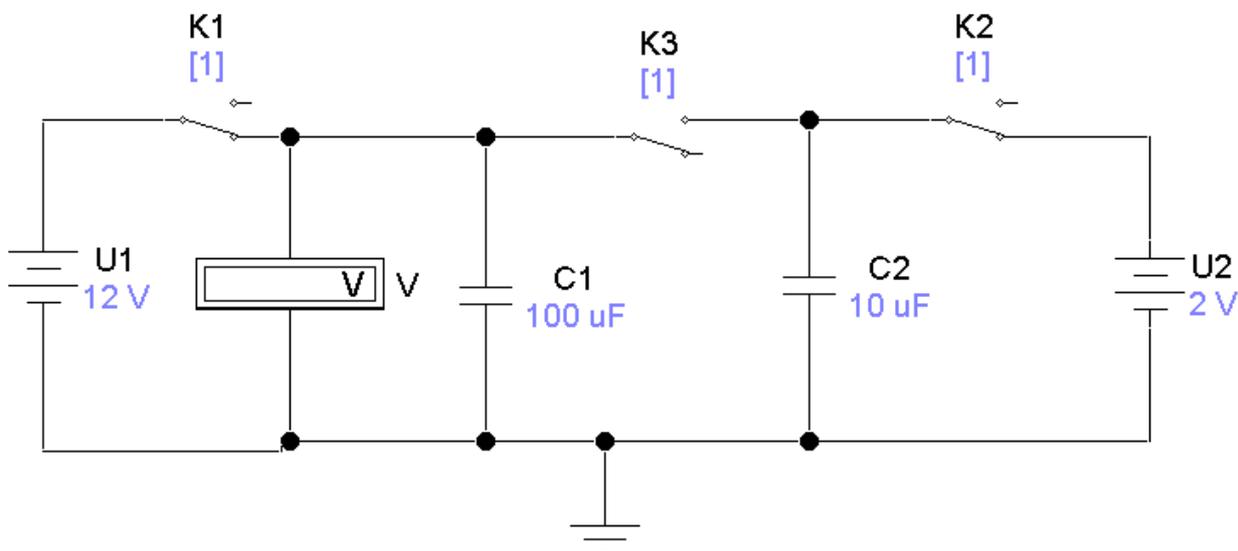
$$\Sigma \Psi(+0) = \Sigma \Psi(-0) \text{ или } \Sigma L i_L(+0) = \Sigma L i_L(-0).$$

Во время импульсной части переходного процесса в конденсаторах возникают значительные (в идеализированных схемах – бесконечно большие) импульсы тока перезарядки малой длительности (в идеале – происходящие мгновенно). А на индуктивностях возникают импульсы перенапряжений из-за перераспределения суммарного потокосцепления между ними.

В то же время энергия электромагнитного поля, связанного с цепью (в конденсаторе запасается  $W_C = Cu_C^2 / 2$ , в индуктивности –  $W_M = Li_L^2 / 2$ ), изменяется на конечную величину. Из-за предположения о мгновенной коммутации такое изменение происходит скачком (так называемая «некорректная» коммутация). «Пропавшая» при этом энергия  $\Delta W = \sum W(-0) - \sum W(+0)$  выделяется в виде тепла в электрической дуге между контактами переключателя и в соединительных проводах, а также частично излучается в окружающее пространство.

*Схема электрической цепи*

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 13.1. Конденсатор  $C_1=100$  мкФ подключается к источнику постоянного напряжения  $U_1= 12$  В с помощью ключа  $K_1$ . Ключ  $K_3$  при этом разомкнут.



*Рис. 13.1*

В свою очередь с помощью ключа  $K_2$  конденсатор  $C_2$  (10 или 470 мкФ), соединяется с источником постоянного регулируемого напряжения и заряжается до установленной величины  $U_2 = 2 \div 15$  В. Рекомендуемые значения этого напряжения выбираются из табл. 13.1 согласно варианту, указанному преподавателем.

**Таблица 13.1**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_2, \text{ В}$	2	3	4	3	2	3	4	5	2	4
	6	5	6	7	5	6	7	8	4	8
	10	7	8	11	8	9	10	11	6	12
	14	10	10	14	11	12	13	14	10	14

При размыкании  $K_1$  и  $K_2$  конденсаторы отсоединяются от источников, сохраняя заряд, приобретенный до коммутации.

В исходном положении (ключи  $K_1$  и  $K_2$  замкнуты,  $K_3$  – разомкнут) конденсатор  $C_1$  заряжается до напряжения  $U_1$  (конденсатор  $C_2$  – до напряжения  $U_2$ ). После срабатывания ключей происходит соединение двух конденсаторов с разными напряжениями одинаковой полярности. Это позволяет проверить обобщенный закон коммутации о сохранении суммарного заряда конденсаторов, подключенных к общему узлу, даже если они образуют емкостный контур. Напряжения на конденсаторах контролируются вольтметром постоянного напряжения  $V$ . Сопротивление вольтметра необходимо установить в максимальное значение.

### Подготовка к работе

1. Сформулировать обобщенные законы коммутации. Записать их в явном виде применительно к схемам рис. 13.2, а, б.
2. Записать в явном виде формулы для вычисления суммарного заряда конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , заряженных перед коммутацией до напряжений  $U_1$  и  $U_2$  соответственно, а после коммутации – до общего напряжения  $U_C(+0)$ . Сделать то же самое для суммарной энергии, запасенной в этих конденсаторах до коммутации  $W(-0)$  и непосредственно после нее  $W(+0)$ .
3. Вывести соотношение между энергией, переходящей во время коммутации из конденсатора  $C_1$ , заряженного до напряжения  $E$ , в незаряженный до этого конденсатор  $C_2$ , и энергией, теряемой безвозвратно (для случая  $C_1 = C_2$  в схеме рис. 13.2,б).

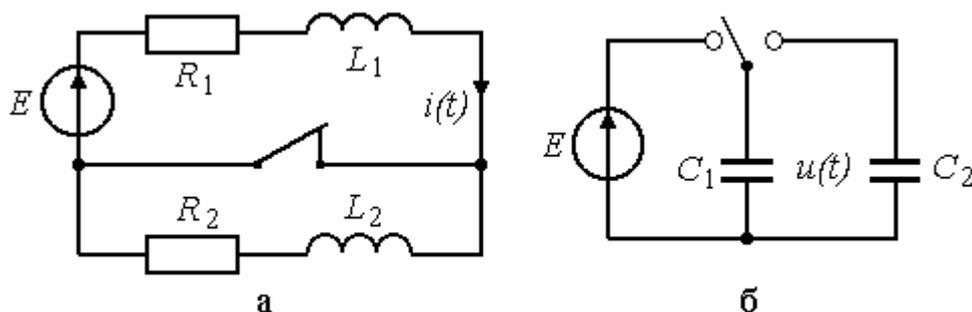


Рис.13.2

### Программа работы

1. Собрать цепь по схеме рис. 13.1, включив в нее конденсатор  $C_2 = 10$  мкФ. Ключи  $K_1$  и  $K_2$  замкнуты,  $K_3$  – разомкнут. Установить напряжение  $U_2$ , соответствующее варианту. Включить схему.
2. Одновременно замкнуть ключ  $K_3$ , ключи  $K_1$  и  $K_2$  разомкнуть. Записать показание вольтметра  $V$  – значение напряжения  $U_C(+0)$  в табл. 13.2.

- Повторить пункты 1 и 2 при различных, соответствующих варианту значения напряжения  $U_2$ . Результаты измерений напряжений на конденсаторах до и после коммутации внести в табл. 13.2.
- Повторить опыты при  $C_2 = 470$  мкФ. Результаты измерений напряжений на конденсаторах до и после коммутации внести в ту же таблицу.

**Таблица 13.2**

$U_1 =$ В	До коммутации			После коммутации			
	$U_2$	$\Sigma q(-0)$	$\Sigma W(-0)$	$U_C(+0)$	$\Sigma q(+0)$	$\Sigma W(+0)$	$\Delta W$
$C_1 =$ $= 100$ мкФ	В	мкКл	мДж	В	мкКл	мДж	мДж
$C_2 =$ $= 10$ мкФ							
$C_2 =$ $= 470$ мкФ							

- Вычислить суммарный заряд конденсаторов и энергию электрического поля, запасенную в них до и после коммутации, а также изменение суммарной энергии  $\Delta W$  за время коммутации для всех опытов по пунктам 1 ÷ 4. Результаты внести в табл. 13.2.
- Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по работе.

## РАБОТА 14

### АПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

**Цель работы.** Исследовать переходный процесс в активно-емкостной цепи с двумя конденсаторами.

#### *Пояснения к работе*

Линейная электрическая цепь после коммутации характеризуется линейными дифференциальными уравнениями второго порядка, если содержит два необъединяемых накопителя энергии: две индуктивности, две емкости или индуктивность и емкость. В зависимости от вида корней характеристического уравнения ( $p_{1,2}$ ) различают три режима переходных процессов:

- апериодический (корни  $p_1$  и  $p_2$  вещественные и различные),
- критический (корни  $p_1 = p_2 = p$  вещественные и равные),

колебательный (корни  $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega$  комплексные, сопряженные).

Корни характеристического уравнения определяются структурой цепи и параметрами ее элементов после коммутации. При этом ЭДС и задающие токи источников не влияют на корни характеристического уравнения. Для составления характеристического уравнения и определения его корней можно, например, использовать комплексное сопротивление цепи после коммутации: это сопротивление приравнивается к нулю и  $j\omega$  заменяется на  $p$ .

Если электрическая цепь содержит после коммутации два необъединяемых индуктивных или два емкостных элемента, то возможен только аperiodический режим. В этом случае свободная составляющая любого тока или напряжения может быть записана в виде:

$$x_{CB} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Здесь  $A_1$  и  $A_2$  – постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий.

#### Схема электрической цепи

Для исследования аperiodического процесса используется цепь, схема которой показана на рис. 14.1. Цепь питается от источника постоянного напряжения. Ее параметры выбираются по табл. 14.1 в соответствии с вариантом, указанным преподавателем.

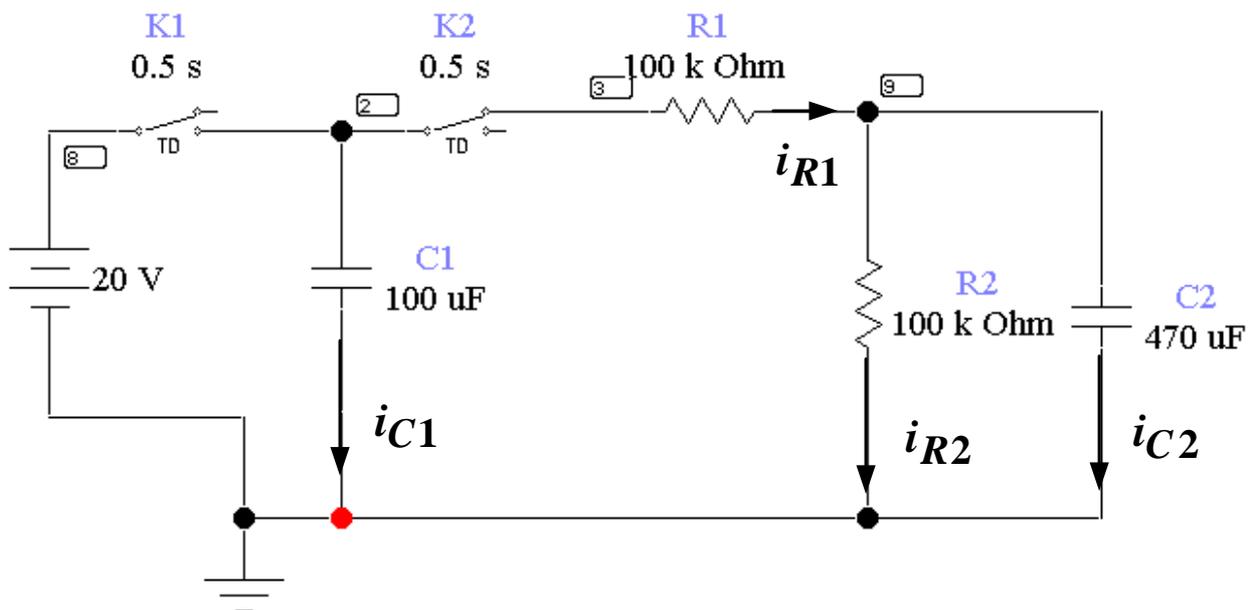


Рис. 14.1.

Таблица 14.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
$U$	В	14	14	13	13	12	12	11	11	10	10
$C_1$	мкФ	100	470	100	470	100	470	100	470	100	470
$C_2$	мкФ	470	100	470	100	470	100	470	100	470	100

$R_1$	кОм	100	100	100	100	200	200	80	80	100	100
$R_2$	кОм	100	100	47	47	47	47	100	100	80	80

При замкнутом положении ключа  $K_1$  конденсатор  $C_1$  заряжается до напряжения  $U$  (конденсатор  $C_2$  не заряжен –  $K_2$  разомкнут). После срабатывания ключей начинается переходный процесс в цепи с двумя конденсаторами при начальных условиях  $u_{C1}(+0) = u_{C1}(-0) = U$  и  $u_{C2}(+0) = u_{C2}(-0) = 0$ , а также  $i_{C2}(+0) = i_{R1}(+0) = -i_{C1}(+0) = U/R_1$ . Для получения осциллограмм напряжений воспользуйтесь анализом переходных процессов в среде EWB, описанным в методических указаниях к лабораторной работе №12.

### *Подготовка к работе*

Проработав теоретический материал, письменно ответить на следующие вопросы.

1. Какая цепь называется цепью второго порядка? В каких цепях возможен только апериодический переходный процесс?
2. Как составляется характеристическое уравнение? При каких корнях получается апериодический переходный процесс?
3. Чему равны принужденные составляющие напряжений и токов в цепи рис. 14.1?
4. Для цепи, показанной на рис. 14.1, вывести в общем виде формулы для расчета напряжений на конденсаторах  $u_{C1}(t)$  и  $u_{C2}(t)$ , а также токов  $i_{C1}(t)$ ,  $i_{C2}(t)$  во время переходного процесса при срабатывании ключей.

### *Программа работы*

1. Собрать цепь по схеме рис. 14.1, параметры которой соответствуют варианту, указанному преподавателем и зарядить конденсатор  $C_1$  до напряжения  $U$ . Записать значение  $U$ , а также  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  в верхнюю строку табл. 14.2.
2. После срабатывания ключей снять временные зависимости напряжений  $u_{C1}(t)$  и  $u_{C2}(t)$ . Результаты измерений внести в табл. 14.2.

**Таблица 14.2**

$t$	$U = \dots В$		$C_1 = \dots мкФ$	$C_2 = \dots мкФ$	$R_1 = \dots кОм$	$R_2 = \dots кОм$	
	<i>Эксперимент</i>					<i>Расчет</i>	
	$u_{C1}$	$u_{C2}$	$i_{C1}$	$i_{C2}$	$i_{R2}$	$u_{C1}$	$u_{C2}$
$c$	В	В	мкА	мкА	мкА	В	В
0		0			0		0
5							
10							
...							

3. По экспериментальным значениям  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$ , используя законы Ома и Кирхгофа, вычислить значения токов  $i_{C1}$ ,  $i_{C2}$  и  $i_{R2}$  в те же моменты времени. Результаты также внести в табл. 14.2 (раздел «Эксперимент»).
4. По данным пп. 2 и 3 построить графики зависимостей  $u_{C1}(t)$  и  $u_{C2}(t)$  в одних осях, а графики  $i_{C1}(t)$ ,  $i_{C2}(t)$  и  $i_{R2}(t)$  – в других осях.
5. Для трех-четырех моментов времени по формулам п. 4 «Подготовки к работе» рассчитать значения  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$ , внести их в ту же таблицу (раздел «Расчет»), а затем отметить эти значения на графиках п. 4 «Программы работы».
6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по работе.

## РАБОТА 15

### КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС В ЦЕПИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

**Цель работы.** Экспериментальное исследование колебательного переходного процесса в цепи с последовательным соединением  $R$ ,  $L$ ,  $C$  при включении ее на постоянное напряжение.

#### *Пояснения к работе*

Принципиальная схема исследуемой цепи показана на рис. 15.1. По второму закону Кирхгофа

$$u_R + u_L + u_C = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = E. \quad (15.1)$$

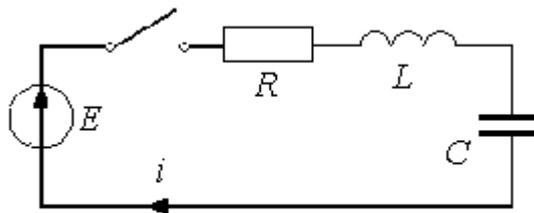


Рис.15.1

Выражение (15.1) дифференцированием приводится к однородному дифференциальному уравнению второго порядка

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0. \quad (15.2)$$

В решении его классическим методом принужденная составляющая отсутствует, а форма записи свободной составляющей зависит от вида корней ха-

рактического уравнения, которое получается из (15.2) заменой  $\frac{d^2i}{dt^2}$  на  $p^2$ ,  $\frac{di}{dt}$  на  $p$ ,  $p^0 = 1$ . Отсюда корни

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (15.3)$$

Возможны три случая:

- 1) корни вещественные различные  $p_2 < p_1 < 0$  (подкоренное выражение в (15.3) положительно), процесс *апериодический*;
- 2) корни комплексно сопряженные

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_{св}, \quad \text{где } \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_{св} = \sqrt{(LC)^{-1} - \delta^2}, \quad (15.4)$$

(подкоренное выражение в (15.4) отрицательно), процесс *колебательный*; в этом случае

$$i(t) = Ae^{-\delta t} \cos(\omega_{св}t + \alpha) = \frac{E}{\omega_{св}L} e^{-\delta t} \sin\omega_{св}t; \quad (15.5)$$

- 3) корни вещественные равные

$$p_1 = p_2 = -\delta = -\frac{R}{2L}, \quad (15.6)$$

подкоренное выражение в (15.4) равно нулю, что получается при

$$R = R_{кр} = 2\sqrt{L/C} - \quad (15.7)$$

*критический* или граничный (предельный) процесс.

Если  $R < R_{кр}$ , то процесс колебательный, если  $R > R_{кр}$  – процесс апериодический.

Построение графика  $i(t)$  в случае колебательного процесса выполняется следующим образом. Вычисляются постоянная интегрирования  $A = E/(\omega_{св}L)$ , постоянная времени огибающей  $\tau_{св} = \delta^{-1}$  и период свободных колебаний  $T_{св} = 2\pi/\omega_{св}$  по формулам (15.4, 15.5), после чего строятся огибающие по четырем точкам  $t = 0, \tau_{св}, 2\tau_{св}, 3\tau_{св}$  и в них вписывается затухающая синусоида, которая пересекает ось абсцисс ( $i = 0$ ) в моменты времени  $t = 0, T_{св}/2, T_{св}$  и т.д. и касается огибающих примерно в моменты  $t = T_{св}/4, 3T_{св}/4$  и т.д. (рис. 15.2).

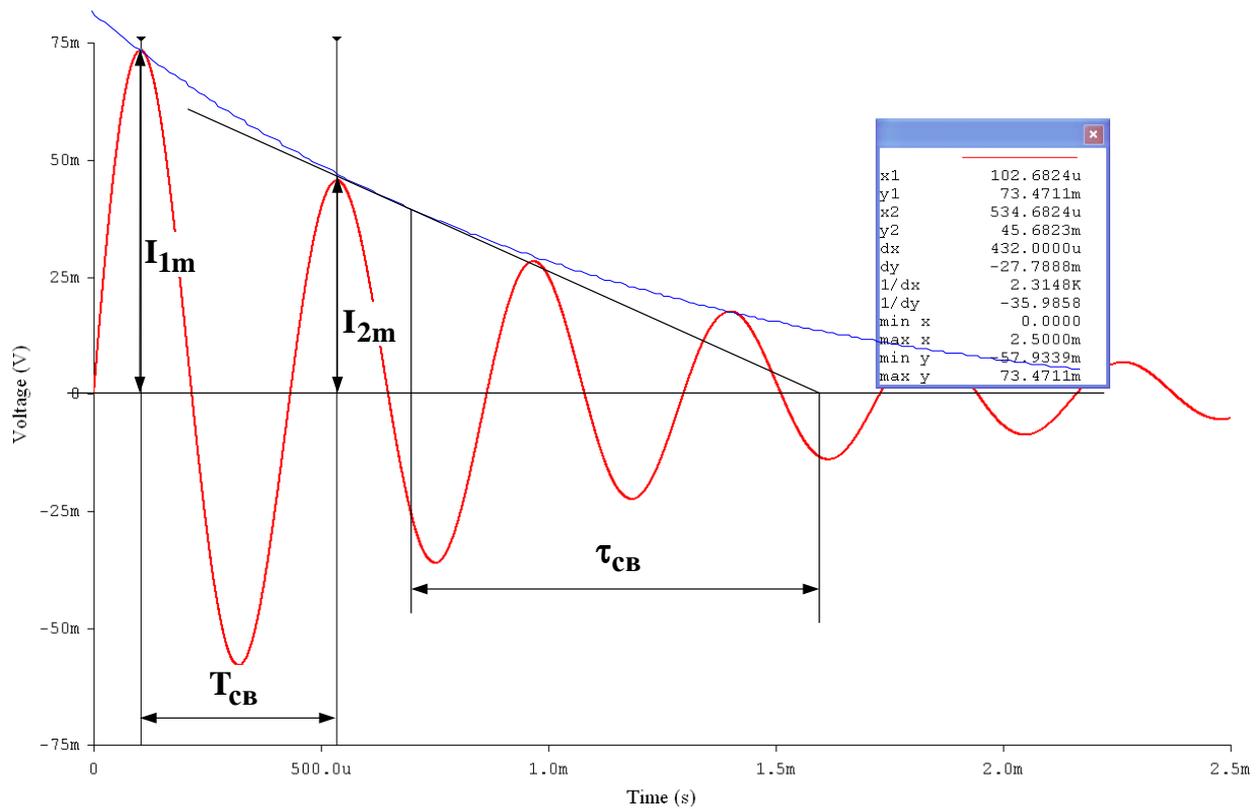


Рис. 15.2

Для оценки быстроты протекания колебательного процесса используются *декремент колебания*, равный отношению значений свободной составляющей тока в моменты времени, отличающиеся на период,

$$\Delta = \frac{i(t)}{i(t + T_{CB})} = e^{\delta T_{CB}} \quad (15.8)$$

и логарифмический декремент колебания

$$\theta = \ln \Delta = \delta T_{CB} = T_{CB} / \tau_{CB} . \quad (15.9)$$

При определении декремента колебания по экспериментально полученной кривой тока (осциллограмме) удобно найти его как отношение амплитуд первого  $I_{1m}$  и второго  $I_{2m}$  периодов затухающих колебаний:

$$\Delta = I_{1m} / I_{2m} . \quad (15.10)$$

Чтобы по той же осциллограмме найти логарифмический декремент, нужно измерить на оси времени расстояние, соответствующее периоду  $T_{CB}$ , и длину подкасательной (с учетом масштаба времени  $\tau_{CB}$ ) и взять их отношение  $T_{CB} / \tau_{CB}$  (рис. 15.2).

### Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Как составляется характеристическое уравнение?
2. Какие переходные режимы возможны в цепи  $R, L, C$  в зависимости от вида корней характеристического уравнения?

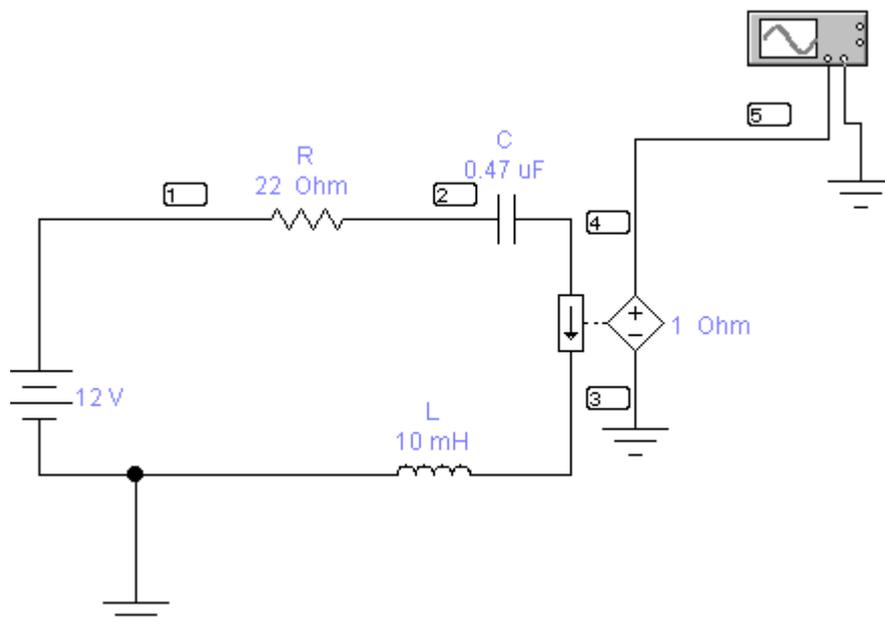
3. Как определяются независимые и зависимые начальные условия? Определить  $i(0)$ ,  $u_C(0)$ ,  $u_L(0)$ ,  $i'(0)$  для схемы рис. 15.1.
4. Как определяются постоянные интегрирования в выражении для свободных составляющих? Определить их в формуле (15.5) с учетом начальных условий.

*Указание.* Предварительно следует записать выражение производной  $i(t)$  в общем виде.

5. Как по значению комплексного корня определить постоянную времени огибающей и период свободных колебаний? Как те же величины найти по осциллограмме?
6. Что такое декремент колебания, как он вычисляется и что характеризует?

### *Схема электрической цепи*

Схема электрической цепи показана на рис. 15.3. Напряжение, пропорциональное току переходного процесса, подается на осциллограф и на его экране можно получить кривую  $i(t)$ . Анализ переходного процесса происходит через открытие диалогового окна команды Transient Analysis по пути Analysis < Transient и рассчитать переходный процесс узла 5. Анализ переходных процессов инициализируется нажатием кнопки **Simulate**, после чего на экране появляются осциллограммы переходных процессов в уменьшенном масштабе. Увеличенное изображение графиков можно получить, нажав кнопку увеличения размера изображения. Длительность временного интервала развертки необходимо корректировать параметром TSTOP.



*Рис. 15.3*

Таблица 15.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E$	В	300	350	400	550	600	70	80	90	100	120
$L$	мГн	10	10	40	40	40	40	100	100	140	200
$C$	мкФ	0,47	1	0,1	0,22	0,47	1	0,1	0,22	0,1	0,1
$R$	Ом	22	22	100	100	100	100	220	220	150	220

### Программа работы

1. Собрать цепь по схеме рис. 15.3, параметры которой соответствуют варианту, указанному преподавателем (табл. 15.1). Значения  $L$ ,  $C$ ,  $R$  внести в табл. 15.2.
2. Срисовать осциллограмму тока в цепи.
3. По осциллограмме определить период свободных колебаний  $T_{CB}$  и постоянную времени огибающей  $\tau_{CB}$  а также амплитуды тока в первом и втором периодах  $I_{1m}$ ,  $I_{2m}$ . Оценить декремент колебания  $\Delta$  по формуле (15.10) и логарифмический декремент  $\theta$  по формуле (15.9). Значения всех перечисленных величин внести в табл. 15.2.
4. Вычислить коэффициент затухания  $\delta = \tau_{CB}^{-1}$ , угловую частоту свободных колебаний  $\omega_{CB} = 2\pi/T_{CB}$  ( $c^{-1}$ ), а также постоянную интегрирования  $A = E / (\omega_{CB}L)$ . Результаты вычислений внести в табл. 15.2 и записать в числах формулу (15.5) для расчета тока при колебательном процессе.
5. Рассчитать по этой формуле значения тока в моменты времени  $t = 0$ ,  $T_{CB}/4$ ,  $T_{CB}/2$ ,  $3T_{CB}/4$ ,  $T_{CB}$  и построить расчетную кривую в одних осях с осциллограммой.

Таблица 15.2

Параметры цепи	$E = \text{В}$	$L = \dots \text{мГн}$	$C = \dots \text{мкФ}$	$R_{\text{ш}} = \dots \text{Ом}$
Из осциллограмм	$T_{CB} = \dots \text{мс}$ $\omega_{CB} = \dots \text{мс}^{-1}$	$\tau_{CB} = \dots \text{мс}$ $\delta = \dots \text{мс}^{-1}$	$I_{1m} = \dots \text{мА}$ $I_{2m} = \dots \text{мА}$ $\theta = \dots$	
Расчет	$T_{CB} = \dots \text{мс}$ $\omega_{CB} = \dots \text{мс}^{-1}$	$\tau_{CB} = \dots \text{мс}$ $\delta = \dots \text{мс}^{-1}$	$\theta = \dots$	$\Delta = \dots$

6. Сделать выводы по работе.

## РАБОТА 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы.** Экспериментальное исследование свойств некоторых нелинейных элементов, использование этих свойств для стабилизации напряжения, освоение и проверка графического метода построения эквивалентной вольтамперной характеристики последовательно-параллельного соединения элементов.

#### *Пояснения к работе*

Для расчета цепей постоянного тока, содержащих нелинейные элементы, необходимо знать вольтамперные характеристики (ВАХ) этих элементов, т.е. зависимость напряжения на зажимах каждого из них от тока в нем. ВАХ, отдельные точки которой получены при постоянных во времени токах и напряжениях, называется статической. В основе расчета сложных нелинейных цепей лежит их систематическое упрощение, выполняемое иногда в несколько этапов.

Так, участок цепи с последовательным соединением нелинейных элементов может быть заменен одним эквивалентным элементом, ВАХ которого определяется на основании второго закона Кирхгофа

$$U(I) = \sum_{k=1}^n U_k(I)$$

по характеристикам исходных элементов путем сложения напряжений на них при одинаковых значениях тока.

Участок цепи, состоящий из параллельного соединения нелинейных элементов, также может быть заменен одним эквивалентным элементом, ВАХ которого строится на основании первого закона Кирхгофа

$$I(U) = \sum_{k=1}^n I_k(U)$$

по характеристикам исходных элементов путем сложения токов в них при одинаковых значениях напряжения.

Можно подобрать такие нелинейные элементы и таким образом включить их в цепь, что напряжение на одном из участков этой цепи будет меняться в значительно меньшей степени, чем напряжение в сети (стабилизатор напряжения). Можно сделать и так, что ток в одной из ветвей будет весьма мало зависеть от величины сопротивления в той же ветви при изменении его в довольно широких пределах (стабилизатор тока).

## Подготовка к работе

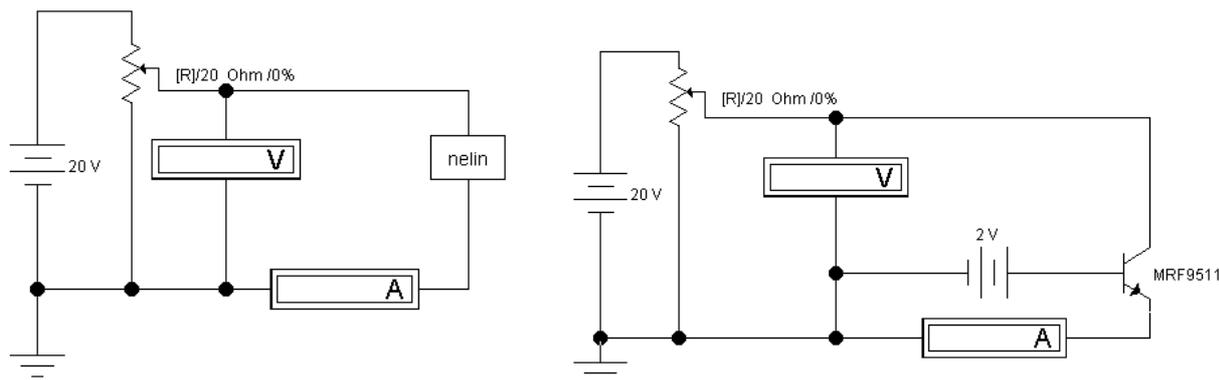
Проработав необходимый материал, ответить на вопросы.

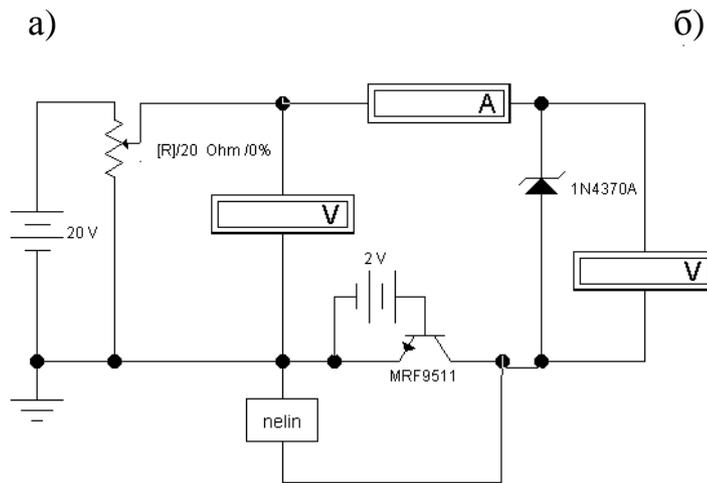
1. Какой элемент называется нелинейным? Что такое его статическое и дифференциальное сопротивления и как их определить по ВАХ элемента?
2. Какие законы и теоремы линейных цепей справедливы для расчета нелинейных цепей без накопителей электрической энергии?
3. Как получить эквивалентную ВАХ последовательно соединенных нелинейных элементов и на каком законе основано это построение?
4. Как получить эквивалентную ВАХ параллельно соединенных нелинейных элементов и на каком законе основано это построение?
5. Какой должна быть характеристика нелинейного элемента, чтобы его можно было использовать для стабилизации тока, включив последовательно с приемником?
6. Какой должна быть характеристика нелинейного элемента, чтобы его можно было, включив параллельно приемнику, использовать для стабилизации напряжения?

### Схемы электрических цепей

В работе используется электрическая цепь, части которой показаны на рис. 16, а, б, в. Цепь питается от источника постоянного регулируемого напряжения  $U_1 = 0 \div 20$  В и содержит не меняющуюся в процессе работы часть (источник, потенциометр  $R$  и вольтметр). Для ее сборки следует открыть файл LW16 и в качестве нелинейного элемента (HELIN) извлечь из поля вспомогательных компонентов Favorites (в верхнем левом углу экрана в начале второй строки меню) подсхему (Subcircuit) из набора AD1  $\div$  AD10 (номер варианта указывает преподаватель).

Верхний предел изменения сопротивления нагрузки  $R_H$  (1000 Ом), равно как и процентное изменение  $R_H$ , следует установить при сборке схемы. В процессе работы для изменения этого сопротивления на заданную (в процентах от наибольшего значения) величину необходимо либо нажать управляющую клавишу  $R$  (в этом случае сопротивление уменьшается на такую величину), либо одновременно  $Shift+R$  (тогда сопротивление настолько же увеличивается).





в)  
Рис. 16.

К этой под схеме подключаются либо лампа (рис.16,а), либо транзистор (рис.16,б), либо смешанное соединение трёх нелинейных элементов лампа, транзистор, стабилитрон (рис.16,в). При этом снимаются соответствующие вольтамперные характеристики:  $U_L(I_L)$ ,  $U_T(I_T)$ ,  $U_{CT}(I_{CT})$ ,  $U_Z(I_Z)$ .

**Таблица 16.1**

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$	кОм	1	2,2	1,68	2,53	3,2	3,67	1,22	1,47	1,68	2,44
$U_{1P}$	В	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

*Программа работы*

1. Открыть файл LW16 и в качестве нелинейного элемента (HELIN) извлечь из поля вспомогательных компонентов Favorites (в верхнем левом углу экрана в начале второй строки меню) подсхему (Subcircuit) из набора AD1 ÷ AD10 (номер варианта указывает преподаватель).
2. Экспериментальное определение ВАХ лампы накаливания по схеме рис.16,а и транзистора по схеме рис. 16,б (8÷10 точек во всем диапазоне изменения входного напряжения  $U_1$ ). Показания приборов внести в табл. 16.2.
3. Экспериментальное определение ВАХ цепи со смешанным соединением элементов по схеме рис. 16,в. Показания приборов также внести в табл. 16.2.
4. Построить ВАХ каждого из нелинейных элементов по данным п.1,2 в общих осях.
5. Построить в тех же осях эквивалентную ВАХ смешанного соединения нелинейных элементов путем графического сложения характеристик отдельных элементов в соответствии со схемой их соединения (рис. 16,в).
6. Построить на том же графике ВАХ смешанного соединения элементов по данным п. 2. Сравнить с характеристикой п. 4.
7. Определить по ВАХ лампы накаливания п.1 значения статического  $R_{СТ}$  и дифференциального  $R_{Д}$  сопротивлений при напряжении  $U_{1P}$ .
8. Сделать выводы по работе.

**Таблица 16.2**

Лампа		Транзистор		Смешанное соединение		
$U_1 = U_L$	$I = I_L$	$U_1$	$I = I$	$U_1 = U_Э$	$I = I_Э$	$U_2$
В	мА	В	мА	В	мА	В

## РАБОТА 17

### НЕЛИНЕЙНЫЙ РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В ЦЕПИ С ИСТОЧНИКОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

[1: 25.1-25.3; 2: 15.1, 15.2, 15.8, 15.53]

**Цель работы.** Научиться осциллографировать характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений и определять по ним форму тока при воздействии гармонического напряжения.

#### Пояснения к работе

Анализ нелинейных цепей при периодических воздействиях производится с учетом динамических характеристик нелинейных элементов. Если при этом ставится цель определить форму или гармонический состав реакции цепи, то используются характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений.

При сравнительно невысоких частотах переменных токов и напряжений динамические характеристики безынерционных нелинейных элементов практически совпадают с их статическими характеристиками.

В данной работе в качестве нелинейного резистивного элемента рассматривается полупроводниковый диод (вентиль) при воздействии гармонического напряжения промышленной частоты. Вольтамперная характеристика диода  $i(u)$  для низких частот имеет вид, показанный на рис. 17.1, а.

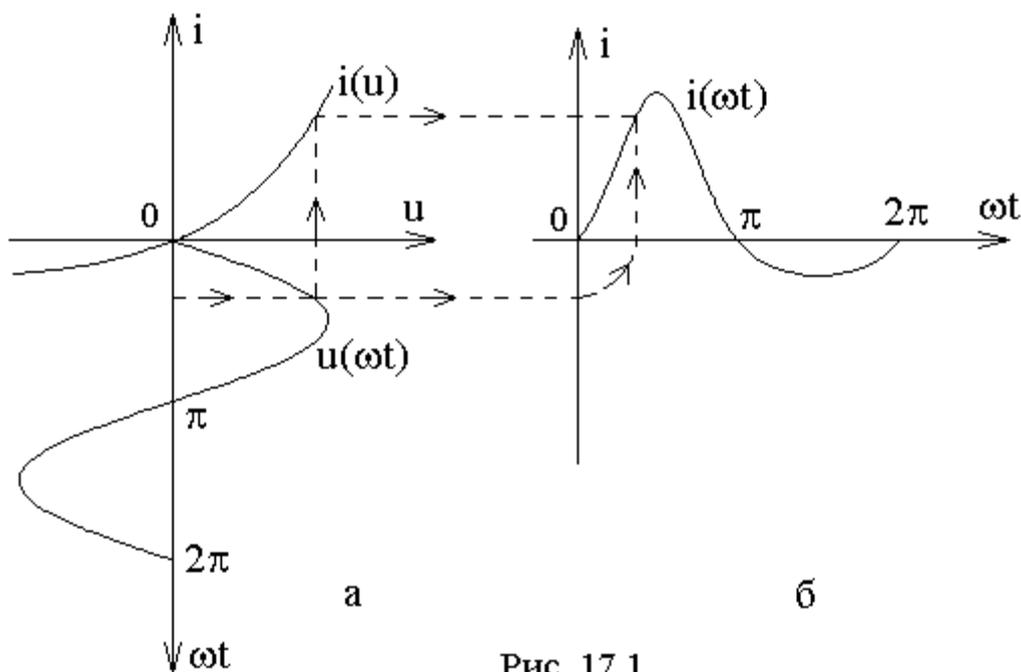


Рис. 17.1

Здесь же построена волновая диаграмма воздействующего на диод синусоидального напряжения  $u(\omega t)$ . Если перенести последовательно ряд точек с

этой диаграммы при определенных значениях  $\omega t$  на характеристику  $i(u)$  и найти по ней соответствующие значения реакции диода – тока  $i$ , то легко можно построить и зависимость  $i(\omega t)$ , которая показана на рис. 17.1, б. Реакция оказывается несинусоидальной, причем спектр ее содержит и постоянную составляющую, и все гармоники.

### Схема электрической цепи

Для определения с помощью осциллографа вольтамперной (для мгновенных значений) характеристики последовательного соединения полупроводникового диода  $D$  и реостата  $R$ , используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 17.2.

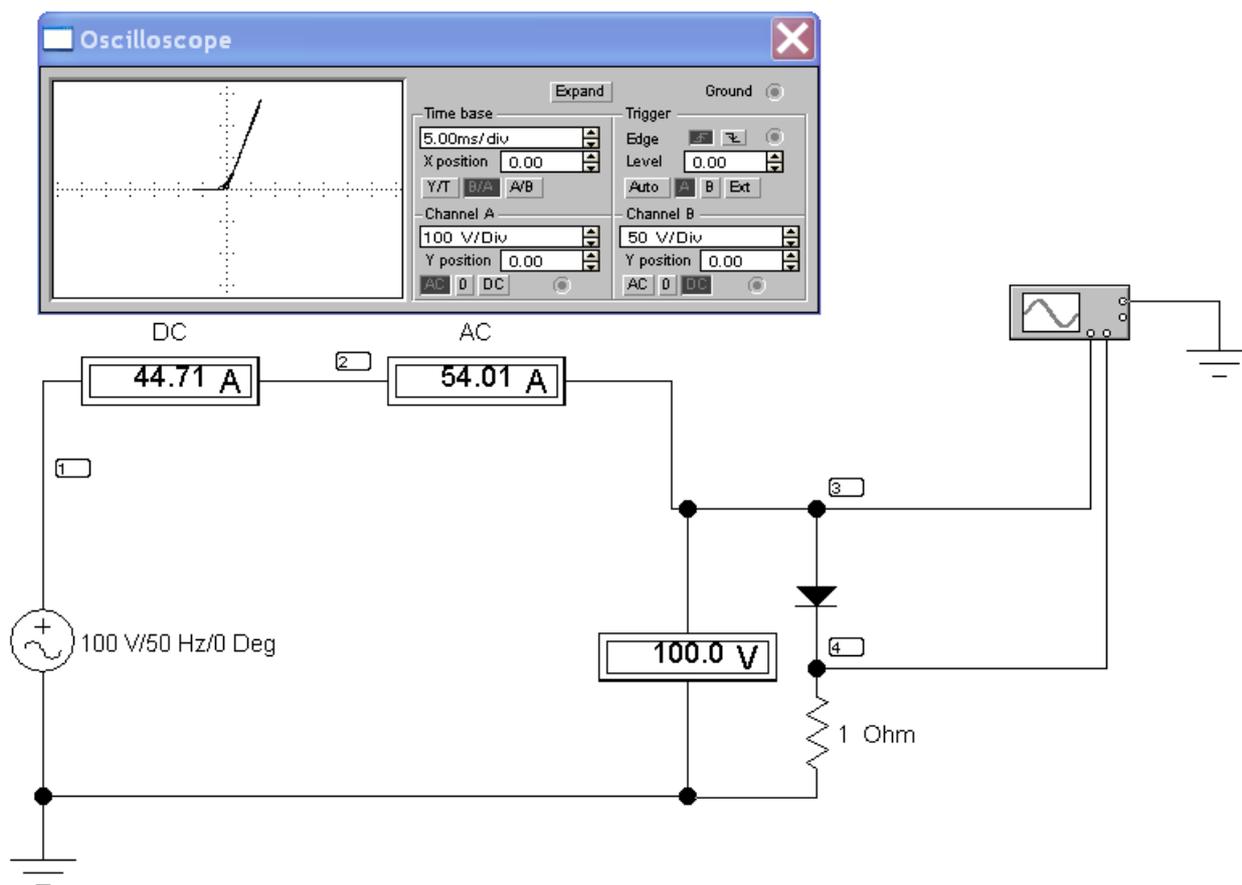


Рис. 17.2

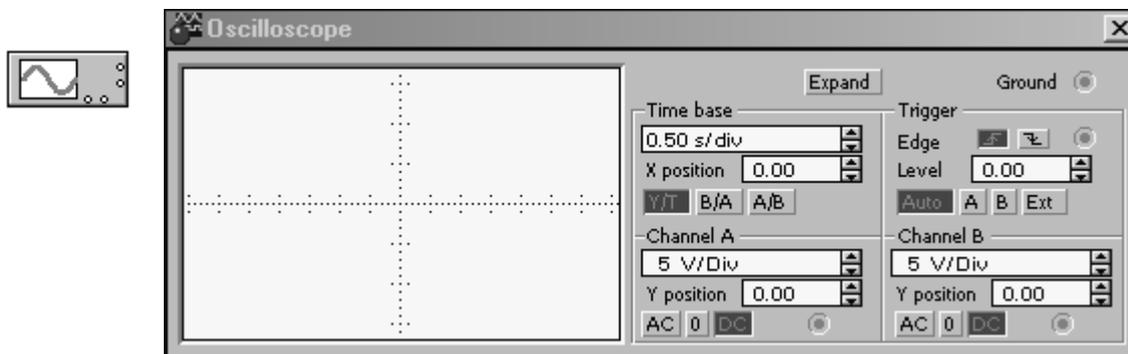
Цепь питается от сети переменного тока, напряжение на выходе которого контролируется вольтметром  $V$ . Амперметры измеряют среднее и действующее значения тока через резистор.

$U$  и  $I$  - показания электромагнитного вольтметра и электродинамического амперметра..

Для регистрации кривых  $u(\omega t)$  и  $i(\omega t)$  достаточно открытие диалогового окна команды Transient Analysis (рис.2.1.3) по пути Analysis < Transient. И рассчитать потенциалы узлов **4** и **5**. Те же характеристики можно получить, кликнув на пиктограмму «характеристики»  панели инструментов.

ВАХ нелинейного элемента можно получить, изменив режим развертки осциллографа, выбрав кнопку В/А , тогда по оси абсцисс вольтамперной характеристики располагаем ось токов, а по оси ординат - напряжений.

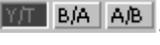
### Осциллограф (Oscilloscope)



#### Лицевая панель осциллографа

Осциллограф имеет два канала (CHANNEL) А и В с отдельной регулировкой по чувствительности в диапазоне от 10мкВ/дел ( $\mu\text{V}/\text{Div}$ ) до кВ/дел ( $\text{kV}/\text{Div}$ ) и регулировкой смещения по вертикали (Y POS). Выбор режима по входу осуществляется нажатием кнопок AC O DC.

Режим AC предназначен для наблюдения только сигналов переменного тока. В режиме O входной зажим замыкается на землю. В режиме DC можно проводить осциллографические измерения как постоянного, так и переменного тока.

Режим развертки выбирается кнопками . В режиме Y/T (обычный режим, включен по умолчанию) реализуется следующий режим развертки: по вертикали – напряжение сигнала, по горизонтали – время; в режиме В/А: по вертикали – сигнал канала В, по горизонтали – сигнал канала А; в режиме А/В: по вертикали – сигнал канала А, по горизонтали – сигнал канала В.

В режиме развертки Y/T длительность развертки (TIME BASE) может быть задана в диапазоне от 0,1нс/дел (ns/div) до 1нс/дел (s/div) с возможностью установки смещения в тех же единицах по горизонтали, т.е по оси X (X POS).

В режиме Y/T предусмотрен также ждущий режим (TRIGGER) с запуском развертки (EDGE) по переднему или заднему фронту запускающего сигнала (выбирается нажатием кнопок ) при регулируемом уровне (LEVEL) запуска, а также в режиме AUTO (от канала А или В,) от канала А, от канала В или от внешнего источника (EXT), подключаемого к зажиму в блоке управления TRIGGER. Названные режимы работы выбираются кнопками .

Заземление осциллографа осуществляется с помощью клеммы GROUND в правом верхнем углу прибора.

При нажатии на кнопку ZOOM лицевая панель осциллографа существенно меняется – увеличивается размер экрана, появляется возможность сканирования с помощью визирных линий (синего и красного цвета), которые могут быть установлены курсором за треугольные ушки (они обозначены также цифрами 1 и 2) в любое место экрана. При этом в индикаторных окошках под экраном

приводятся результаты измерения напряжения, временных интервалов и их приращений (между визирными линиями).

Изображение можно инвертировать нажатием кнопки REVERSE и записать данные в файл нажатием кнопки SAVE. Возврат к исходному состоянию осциллографа – нажатием кнопки REDUCE.

### *Подготовка к работе*

Изучив теоретический материал, ответить на следующие вопросы:

1. В чем принципиальное отличие динамических характеристик от статических?
2. Как по вольтамперной характеристике последовательно соединенных диода и резистора с сопротивлением  $R$  определить характеристику диода?
3. Нарисуйте форму кривой тока для цепи в идеальном диоде при синусоидальном напряжении.
4. Что показывают амперметры магнитоэлектрической и электродинамической систем в цепи по рис. 17.2?

### *Программа работы*

1. При заданном напряжении источника  $U$ , перерисовать снятые осциллограммы в отчет, расположив их как на рис. 17.1. Построить ВАХ  $i(u)$ . Убедиться, что с помощью кривой  $i(u)$  можно по воздействию  $u(\omega t)$  найти реакцию  $i(\omega t)$ . Сравнить с вольтамперной характеристикой, полученной при помощи осциллографа. При этом амплитуду входного напряжения выбрать из табл. 17.1 по варианту, указанному преподавателем
2. Показания приборов внести в табл. 17.2.
3. Разложить кривую  $i(\omega t)$  в гармонический ряд и построить ее амплитудно-частотный спектр. Вычислить среднее и действующее значения выпрямленного тока и сравнить с показаниями амперметров.

$$i(\omega t) = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \dots,$$

$I_0$  - постоянная составляющая (среднее значение),

$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$  – действующее значение тока,

где  $I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}$ ;  $I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}$ ;  $I_3 = \frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}$  – действующие значения гармоник тока.

4. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по работе.

Таблица 17.1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R$	Ом	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$U$	В	100	90	80	70	95	85	75	125	150	140	30

Таблица 17.2.

$U$	$I_{эд}$	$I_{мэ}$	$R$	$I$	$I_0$
В	А	А	Ом	А	А

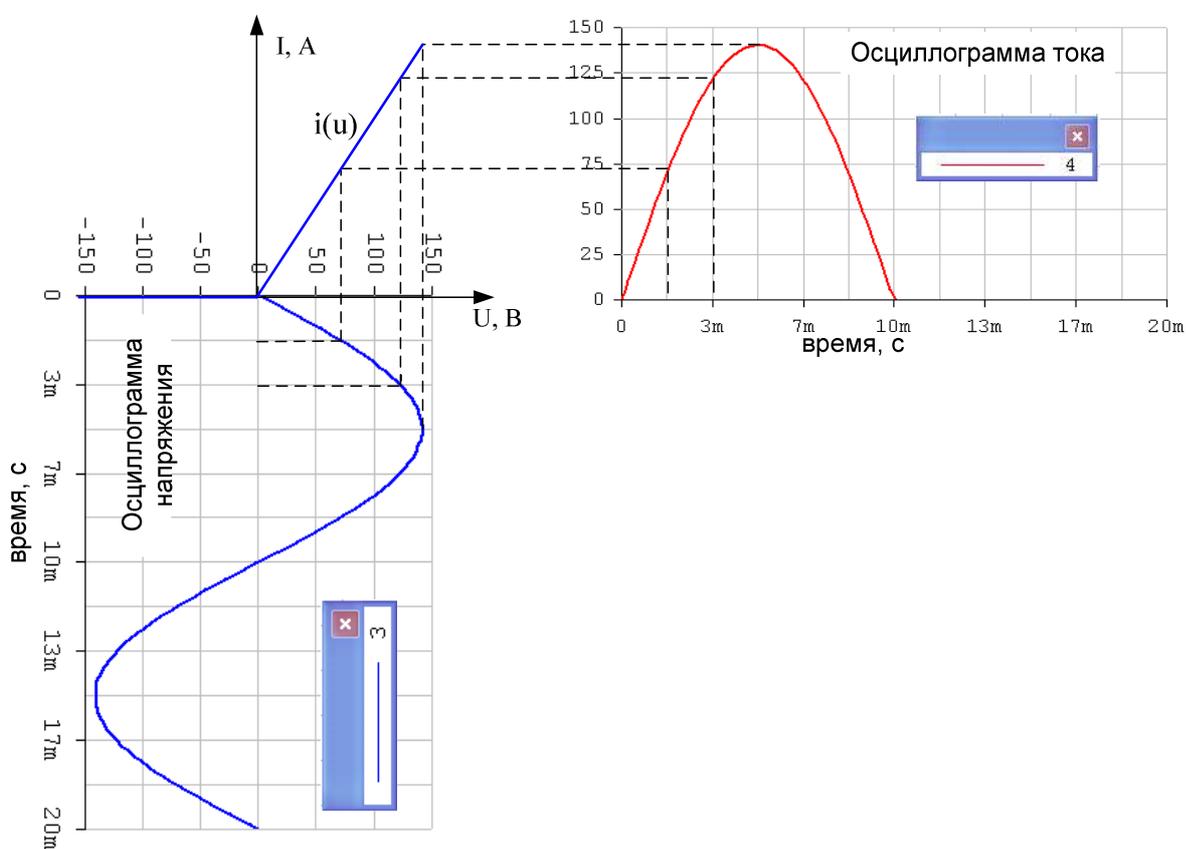


Рис 17.3

Для разложения кривой тока в ряд Фурье можно использовать метод 12 ординат, например, в среде Mathcad.

## Документ Mathcad

Вектор исходных данных

$$Y := (0 \quad 69.35 \quad 120.85 \quad 141.1 \quad 120.85 \quad 69.35 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$T := 2 \cdot 180 \quad Y := Y^T \quad Mt := 1 \quad \text{ORIGIN} := 0$$

$$p := \text{length}(Y) \quad dt := \frac{T}{p} \quad f := \frac{1}{T} \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$p = 12$  Четное число интервалов деления периода  $T$  равно числу отсчетов функции (числу заданных точек).

$k := 1..6$  Задаем число гармоник, не превосходящее  $p/2$ .

Находим коэффициенты гармонического ряда, используя формулы Фурье, заменив точные выражения приближенными.

$$A_0 := \frac{1}{p} \cdot \sum_i Y_i \quad i := 0..p-1 \quad B_k := \frac{2}{p} \cdot \sum_i Y_i \cdot \sin\left(k \cdot i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{p}\right)$$

$$j := \sqrt{-1} \quad C_k := \frac{2}{p} \cdot \sum_i Y_i \cdot \cos\left(k \cdot i \cdot \frac{2 \cdot \pi}{p}\right)$$

$$Z_k := B_k + j \cdot C_k$$

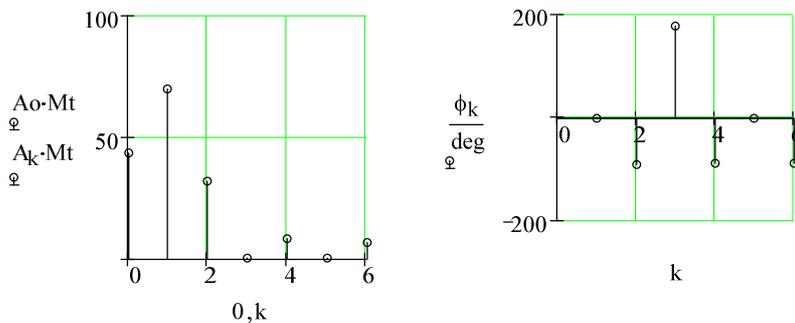
$A_k := |Z_k| \quad \phi_k := \arg(Z_k)$  Значения амплитуд гармоник и их фазы.

$$F(t) := A_0 + \sum_k [A_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \phi_k)]$$

$A_k =$	$\frac{\phi_k}{\text{deg}} =$
69.961	8.729·10 <sup>-1</sup>
32.1	-90
0.4	180
8.183	-90
0.189	-1.079·10 <sup>1</sup>
6.35	-90

$$t := 0..T$$

Дискретные спектры амплитуд и фаз (Рис. 2.2).



Постоянная составляющая  $A_0 = 43.458$

Действующее значение.  $I := \sqrt{A_0 + \sum_k \frac{(A_k)^2}{2}} \quad I = 55.315$

$A_0 \cdot Mt = 43.458$  Показание амперметра магнитоэлектрической системы.

$I \cdot Mt = 55.315$  Показание амперметра электродинамической системы.

## РАБОТА 18

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы.** Экспериментальное исследование цепей переменного тока с последовательным и параллельным соединением элементов и их расчет методом эквивалентных синусоид.

#### *Пояснения к работе*

При анализе нелинейных цепей переменного тока используются динамические характеристики нелинейных элементов:

- а) для мгновенных значений,
- б) для первых гармоник,
- в) для действующих значений.

Нелинейный элемент, характеристика которого для мгновенных значений линейная, а характеристика для действующих – нелинейная, называется инерционным или условно-нелинейным. При периодических воздействиях кривые тока и напряжения для такого элемента подобны. Примером инерционного элемента может служить лампа накаливания.

Элементы с нелинейной характеристикой для мгновенных значений называются безынерционными. Форма кривых тока и напряжения для таких элементов различны. В качестве примера безынерционного элемента может служить катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником.

Расчет нелинейных цепей с инерционными элементами и с источниками синусоидальных ЭДС и токов можно вести либо комплексным (символическим) методом, либо на основе векторных диаграмм, используя характеристики для действующих значений: вольтамперную (ВАХ)  $U(I)$  и фазоамперную (ФАХ)  $\varphi(I)$ , снятые на соответствующей частоте.

Аналогичный подход распространяют иногда и на цепи переменного тока с безынерционными элементами, если целью анализа не является изучение гармонического состава кривых тока и напряжения. В этом случае реальные несинусоидальные кривые  $u(t)$  и  $i(t)$  заменяются эквивалентными синусоидами с тем же периодом, теми же действующими значениями  $U$ ,  $I$  и с таким углом сдвига фаз  $\varphi$ , который обеспечивает получение той же активной мощности, что и при несинусоидальном воздействии.

В расчете методом эквивалентных синусоид нередко используется упрощение схем путем замены участков с последовательным или параллельным соединением нелинейных элементов одним эквивалентным элементом.

Так, в случае последовательного соединения  $n$  элементов характеристики эквивалентного элемента определяются на основании второго закона Кирхгофа в комплексной форме:

$$U_{\Sigma}(I)e^{j\varphi_{\Sigma}(I)} = \sum_{k=1}^n U_k(I)e^{j\varphi_k(I)}.$$

Здесь  $U_k$  и  $\varphi_k$  – значения напряжения и угла сдвига фаз на  $k$ -м элементе при определенном действующем значении тока  $I$  (одинаковом для всех элементов), найденные по характеристикам этого элемента. В расчетах начальная фаза тока принимается равной нулю.

Качественная векторная диаграмма для последовательно соединенных лампы (нелинейное инерционное активное сопротивление) и катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником (нелинейный безынерционный элемент активно-индуктивного характера) показана на рис. 18.1. Если известны действующие значения напряжений  $U_L$ ,  $U_K$ , и  $U_{\Sigma}$ , то положение вершины треугольника напряжений, не лежащей на векторе тока, может быть найдено с помощью засечек циркулем. А углы сдвига фаз напряжений  $\underline{U}_K$  и  $\underline{U}_{\Sigma}$  по отношению к току  $\underline{I}$  могут быть найдены по теореме косинусов:

$$\varphi_K = \arccos \frac{U_{\Sigma}^2 - U_L^2 - U_K^2}{2U_L U_K}, \quad \varphi_{\Sigma} = \arccos \frac{U_{\Sigma}^2 + U_L^2 - U_K^2}{2U_L U_{\Sigma}}. \quad (18.1)$$

Характеристики эквивалентного элемента при параллельном соединении  $n$  исходных нелинейных двухполосников определяются на основании первого закона Кирхгофа в комплексной форме:

$$I_{\Sigma}(U)e^{-j\varphi_{\Sigma}(U)} = \sum_{k=1}^n I_k(U)e^{-j\varphi_k(U)}.$$

Входящие в это выражение значения токов  $I_k$  всех  $n$  элементов определяются при одном и том же действующем значении напряжения  $U$  по ВАХ для действующих значений. В этом случае начальная фаза напряжения полагается равной нулю. А значения углов сдвига фаз  $\varphi_k$  и  $\varphi_{\Sigma}$  находятся по ФАХ соответственно для найденных ранее  $I_k$  и  $I_{\Sigma}$ .

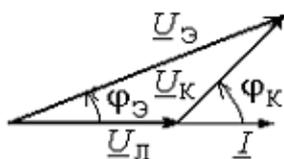


Рис. 18.1.

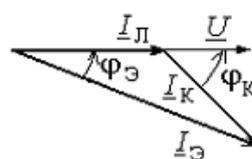


Рис. 18.2.

Качественная векторная диаграмма для тех же самых параллельно соединенных элементов (лампы и катушки) показана на рис. 18.2. Если известны действующие значения токов  $I_L$ ,  $I_K$ , и  $I_{\Sigma}$ , то положение вершины треугольника токов, не лежащей на векторе напряжения, может быть найдено с помощью засечек циркулем. А углы сдвига фаз токов  $\underline{I}_K$  и  $\underline{I}_{\Sigma}$  по отношению к напряжению  $\underline{U}$  могут быть найдены по теореме косинусов:

$$\varphi_K = \arccos \frac{I_{\text{Э}}^2 - I_{\text{Л}}^2 - I_{\text{К}}^2}{2I_{\text{Л}}I_{\text{К}}}, \quad \varphi_{\text{Э}} = \arccos \frac{I_{\text{Э}}^2 + I_{\text{Л}}^2 - I_{\text{К}}^2}{2I_{\text{Л}}I_{\text{Э}}}. \quad (18.2)$$

### *Подготовка к работе*

Изучив соответствующий теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Дать определение инерционного и безынерционного элементов. К какому виду относится лампа накаливания и катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником?
2. Объяснить различие ожидаемых осциллограмм тока в схемах с лампой накаливания и с катушкой при питании от источника синусоидальной ЭДС.
3. Что понимают под эквивалентными синусоидами тока и напряжения?
4. Какие характеристики используют при расчете цепи методом эквивалентных синусоид?
5. Какой вид имеют вольтамперная и фазоамперная характеристики линейного элемента?
6. Как найти эквивалентные характеристики последовательно соединенных лампы и катушки, характеристики которых известны?
7. Как найти эквивалентные характеристики параллельного соединения лампы и катушки, характеристики которых известны?

### *Схема электрической цепи*

Схема, изображенная на рис. 18.3, в которой по ходу работы меняется правая часть, которая позволяет снять вольтамперные характеристики каждого из нелинейных элементов (схема а), а также их последовательного и параллельного соединений (б). В качестве нелинейных элементов используются лампа накаливания и катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником без воздушного зазора. При этом величину индуктивности выбрать из табл. 18 по варианту, указанному преподавателем

Таблица 18

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>L</i>	Гн	0,2	1,4	0,8	0,6	1,2	1,2	1,5	1,8	2,1	0,5	0,01

В нижнем положении ключа (схема 18.3, а) в цепи исследуется нелинейный элемент (nелin), а в верхнем – катушка индуктивности.

При последовательное соединении (схема 18.3, б) нелинейных элементов – ключ К2 разомкнут, при параллельном соединении – ключ К2 замкнут.

Для снятия фазоамперных характеристик используется *Bode Plotter*.

Питание осуществляется от синусоидального напряжения 100 В источника через делитель напряжения (потенциометр 1 кОм).

Верхний предел изменения сопротивления нагрузки  $R_H$  (1000 Ом), а также процентное изменение  $R_H$ , следует установить при сборке схемы. В процессе работы для изменения этого сопротивления на заданную (в процентах от наибольшего значения) величину необходимо либо нажать управляющую клавишу **R** (в этом случае сопротивление уменьшается на такую величину), либо одновременно **Shift+R** (тогда сопротивление настолько же увеличивается).

Переменные напряжение и ток измеряются вольтметром и амперметром.

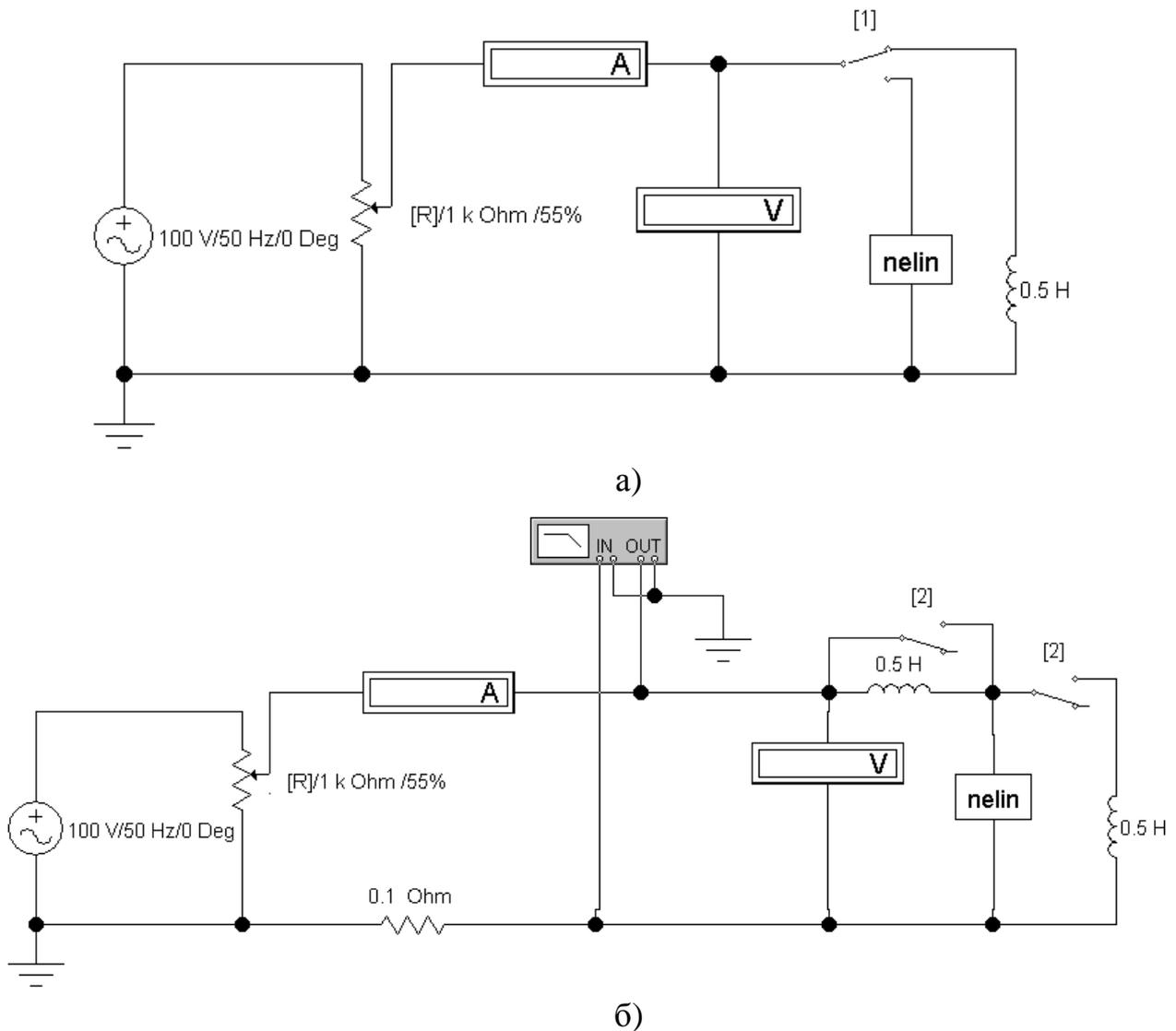
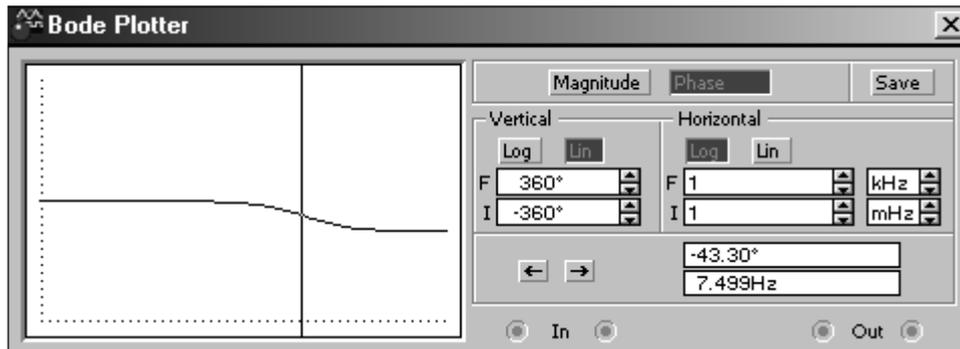


Рис. 18.3



## Измеритель АЧХ и ФЧХ (Bode Plotter)



Измеритель АЧХ И ФЧХ предназначен для анализа амплитудно-частотных (при нажатой кнопке MAGNITUDE, включена по умолчанию) и фазо-частотных (при нажатой кнопке PHASE) характеристик при логарифмической (кнопка LOG) или линейной (кнопка LIN) шкале по осям Y (VERTICAL) и X (HORIZONTAL).

Настройка измерителя заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи и вариации частоты с помощью кнопок в окошках F – максимальное и I – минимальное значение.

Значение частоты и соответствующее ей значение коэффициента передачи или фазы индицируется в окошках в правом нижнем углу измерителя. Значение указанных величин в отдельных точках АЧХ и ФЧХ можно получить с помощью вертикальной визирной линии, находящейся в исходном состоянии в начале координат и перемещаемой по графику мышью или кнопками  $\leftarrow \rightarrow$ . Результаты измерения можно записать также в текстовый файл. Для этого необходимо нажать кнопку SAVE и в диалоговом окне указать имя файла (по умолчанию предлагается имя схемы). В полученном таким образом текстовом файле с расширением .bod АЧХ и ФЧХ представляются в табличном виде.

Подключение прибора к исследуемой схеме осуществляется с помощью зажимов IN (вход) и OUT (выход). Левые клеммы зажимов подключаются соответственно ко входу и выходу исследуемого устройства, а правые к общей шине. Ко входу устройства необходимо подключить функциональный генератор или другой источник переменного напряжения, при этом каких-либо настроек в этих устройствах не требуется.

### Программа работы

1. Собрать схемы по рис. 18.3,а,б, и, изменяя потенциометром напряжение, экспериментально определить вольтамперные характеристики лампы накаливания, катушки с сердечником, их последовательного и параллельного соединений. Соответствующие друг другу показания амперметра и вольтметра (6-8 значений) внести в табл. 18.1.

**Таблица 18.1**

Лампа		Катушка			Послед. соед.			Парал. соед.		
$I_L$	$U_L$	$I_K$	$U_K$	$\varphi_K$	$I_{\Delta}'$	$U_{\Delta}'$	$\varphi_{\Delta}'$	$I_{\Delta}''$	$U_{\Delta}''$	$\varphi_{\Delta}''$
мА	В	мА	В	мА	В	мА	В			

2. Построение ВАХ  $U_L(I_L)$ ,  $U_K(I_K)$ ,  $\varphi_K(I_K)$ ,  $U_{\Delta}'(I_{\Delta}')$ ,  $\varphi_{\Delta}'(I_{\Delta}')$ ,  $U_{\Delta}''(I_{\Delta}'')$ , и по данным табл. 18.1 в общих осях  $U$  и  $I$ .
3. Расчет фазоамперных характеристик катушки и последовательного соединения нелинейных элементов. Следует задаться тремя значениями тока  $I_{\Delta}'$ , согласно табл. 18.3 и варианту, указанному преподавателем, и по графикам п.2  $U_L(I_L)$ ,  $U_K(I_K)$ ,  $U_{\Delta}'(I_{\Delta}')$  определить  $U_L$ ,  $U_K$  и  $U_{\Delta}'$ . Затем по формулами (18.1)  $\varphi_{\Delta}'$ . Результаты внести в табл. 18.2.

**Таблица 18.2**

Последовательное соединение					Параллельное соединение				
$I_{\Delta}'=I_K'$	$U_L$	$U_K$	$U_{\Delta}'$	$\varphi_{\Delta}'$	$U_{\Delta}''$	$I_L$	$I_K''$	$I_{\Delta}''$	$\varphi_{\Delta}''$
мА	В	В	В	град	В	мА	мА	мА	град

4. Расчет фазоамперных характеристик катушки и параллельного соединения нелинейных элементов. Следует задаться тремя значениями напряжения  $U_{\Delta}''$ , согласно табл. 18.3 и варианту, указанному преподавателем, и по графикам п.2  $U_L(I_L)$ ,  $U_K(I_K)$ ,  $U_{\Delta}'(I_{\Delta}')$  определить  $I_L$ ,  $I_K''$  и  $I_{\Delta}''$ . Затем по формулами (18.2)  $\varphi_{\Delta}''$ . Результаты также внести в табл. 18.2.
5. Построение по данным табл. 18.2 в общих осях  $\varphi$  и  $I$  фазоамперных характеристик последовательного соединения  $\varphi_{\Delta}'(I_{\Delta}')$  и параллельного соединения  $\varphi_{\Delta}''(I_{\Delta}'')$ .
6. Построение векторных диаграмм. В отчете достаточно привести по одной диаграмме для последовательного и параллельного соединений согласно данным табл. 18.2.

Таблица 18.3

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{\text{Э}}$	мА	10	11	12	13	14	15	10	11	12	13
		20	21	22	23	24	25	21	22	23	24
		30	31	32	33	34	35	32	33	34	35
$U_{\text{Э}}$	В	10	5	6	7	8	9	5	6	7	8
		20	15	16	17	18	19	16	17	18	19
		30	25	26	27	28	29	27	28	29	30

7. Сделать выводы по работе.

## РАБОТА 19

### КАТУШКА С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В ЦЕПИ ИСТОЧНИКА ГАРМОНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

**Цель работы.** Экспериментальное подтверждение свойства безынерционного нелинейного элемента преобразовывать спектр частот воздействующего на него сигнала.

#### Пояснения к работе

В современных электромагнитных приборах и аппаратах для усиления магнитных потоков обмоток используются магнитопроводы из ферромагнитных материалов. Магнитная проницаемость таких материалов существенно зависит от напряженности магнитного поля  $H$ . Поэтому катушка с ферромагнитным сердечником представляет собой нелинейный элемент с веберамперной характеристикой (ВБАХ)  $\psi(i)$ .

Если принять  $\psi = BS_w$  и  $wi = Hl$ , где  $B$  – магнитная индукция,  $S$  – сечение магнитопровода,  $w$  – число витков катушки,  $l$  – средняя длина магнитной линии, то окажется, что кривая  $\psi(i)$  подобна зависимости  $B(H)$ , называемой кривой намагничивания материала.

Эти кривые снимают экспериментально для конкретного материала и определенного вида магнитного поля. В частности для периодически изменяющегося магнитного поля снимают динамические кривые намагничивания – зависимости между мгновенными значениями  $B$  и  $H$  (или в другом масштабе  $\psi$  и  $i$ ), которые образуют гистерезисные петли. Площадь гистерезисной петли пропорциональна сумме потерь энергии на перемагничивание ферромагнитного материала сердечника и потерь на вихревые токи. Для уменьшения этих потерь, выделяемых в виде тепла, сердечник набирается из отдельных, изолированных друг от друга листов электротехнической стали. Это магнитомягкий материал,

у которого петля гистерезиса весьма узкая, поэтому зависимость  $\psi(i)$  для катушки с таким сердечником приближенно можно считать однозначной и представить в виде симметричной относительно начала координат кривой, которая показана на рис. 19.1.

Катушка с ферромагнитным сердечником – безынерционный нелинейный элемент, поэтому ее реакция на синусоидальное воздействие оказывается несинусоидальной. Так, если катушку подключить к источнику гармонического напряжения  $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ , то и потокосцепление будет гармоническим (рис. 19.1):

$$\psi(\omega t) = \int u dt = \Psi_m \sin(\omega t), \text{ где } \Psi_m = U_m / \omega = \frac{\sqrt{2}U}{\omega}.$$

Поскольку ВБАХ катушки симметрична относительно начала координат, то кривая  $i(\omega t)$  – реакция катушки на синусоидальное воздействие  $\psi(\omega t)$  – окажется симметричной относительно оси времени (рис. 19.1), а ее разложение в ряд Фурье будет содержать лишь нечетные гармоники. Если ограничиться учетом трех наибольших из них, то можно записать:

$$i(\omega t) = I_{1m} \sin(\omega t) - I_{3m} \sin(3\omega t) + I_{5m} \sin(5\omega t).$$

Амплитуды первой, третьей и пятой гармоник определяются по методу трех ординат, которые представляют собой значения тока в моменты времени

$t_1 = \frac{T}{12}$ ,  $t_2 = \frac{T}{6}$ ,  $t_4 = \frac{T}{4}$ . Если на осциллограмме  $i(\omega t)$  измерить ординаты

$i_1 = i\left(\frac{\pi}{6}\right)$ ,  $i_2 = i\left(\frac{\pi}{3}\right)$ ,  $i_3 = i\left(\frac{\pi}{2}\right)$ , то нетрудно найти амплитуды трех учитываемых в разложении гармоник:

$$I_{1m} = (i_1 + i_3 + \sqrt{3}i_2)/3, \quad I_{3m} = (i_3 - 2i_1)/3, \quad I_{5m} = (i_1 + i_3 - \sqrt{3}i_2)/3.$$

Действующее значение тока  $I = \sqrt{(I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2)}/2$ .

Коэффициент гармоник  $k_\Gamma = \sqrt{I_{3m}^2 + I_{5m}^2} / I_{1m}$  характеризует степень отличия кривой тока от синусоиды (уже при  $k_\Gamma \leq 0,05$  ток можно считать гармоническим).

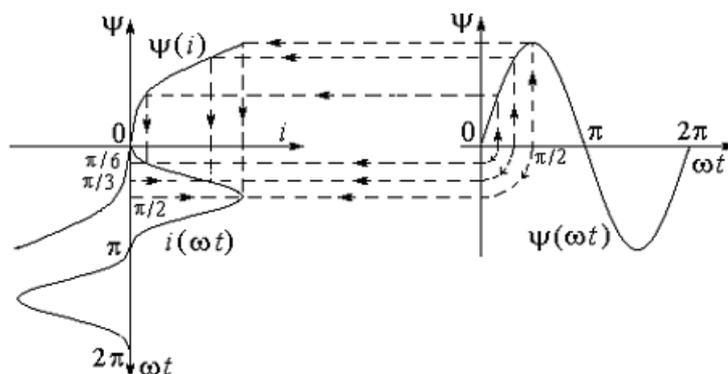


Рис. 19.1.

### Схема электрической цепи

Для осциллографирования кривой тока  $i(\omega t)$  используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 19.2.

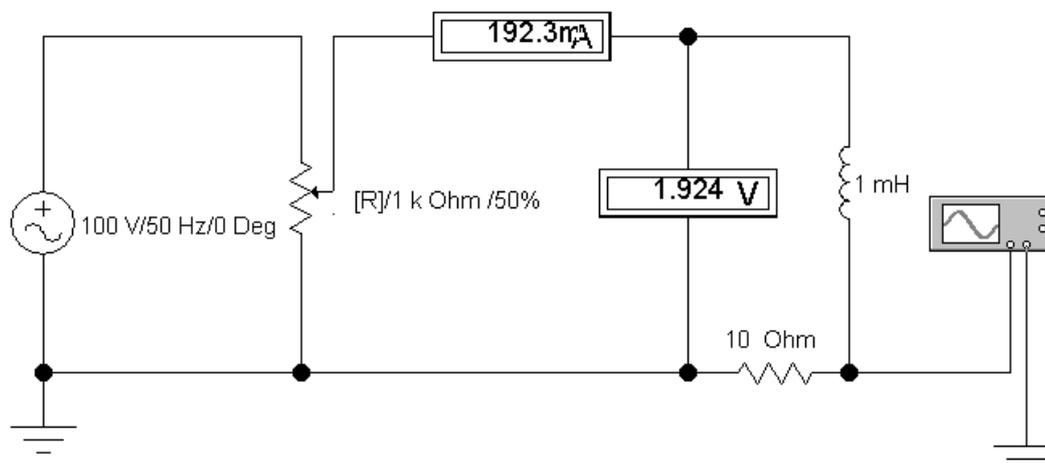


Рис. 19.2.

Питание осуществляется от фазного синусоидального напряжения 100 В через делитель напряжения (потенциометр 1 кОм).

В качестве нелинейной индуктивности используется дроссель Др – катушка с ферромагнитным сердечником без воздушного зазора. Так как шунт представляет собой линейное сопротивление ( $R_{Ш} = 10 \text{ Ом}$ ), то напряжение, подаваемое с него на осциллограф, повторяет по форме кривую тока  $i(\omega t)$ .

С учетом закона Ома масштаб тока (мА/мм) вычисляется по формуле:  
 $m_i = 10^3 / (R_{Ш})$ .

Приборы переменного тока измеряют действующие значения напряжения на катушке и тока в ней.

### Подготовка к работе

1. Какой зависимостью характеризуют катушку с ферромагнитным сердечником и какой вид имеет эта зависимость? В чем причина ее нелинейности?
2. Из какого материала должен быть изготовлен сердечник катушки, чтобы можно было пренебречь явлением гистерезиса?
3. Каков гармонический состав кривой тока в катушке при подключении ее к источнику синусоидального напряжения?
4. Вывести формулы для определения амплитуд первой, третьей, и пятой гармоник по методу трех ординат.

### Программа работы

1. Собрать цепь по схеме рис. 19.2. С помощью делителя отрегулировать на ее входе напряжение таким образом, чтобы показание вольтметра соответствовало табл. 19.1 (вариант указывает преподаватель).

**Таблица 19.1**

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U$	В	27	68	66	64	62	6	58	56	54	52

2. Включить осциллограф. Зарисовать осциллограмму. Определить масштаб тока. Масштаб и показания приборов внести в табл. 19.2.
3. Вычислить амплитуду потокосцепления  $\Psi_m$  и построить на миллиметровке синусоиду  $\psi(\omega t) = \Psi_m \sin(\omega t)$ , выбрав масштаб (рад/мм) безразмерного времени  $\omega t$  таким же, как и на осциллограмме. Перенести на тот же лист миллиметровки и осциллограмму тока  $i(\omega t)$ , уменьшив масштаб тока (мА/мм) в два раза (увеличив амплитуду тока в два раза).

**Таблица 19.2**

Измерения		Результаты расчета					
$U$	$I$	$m_i$	$I_{1m}$	$I_{3m}$	$I_{5m}$	$I$	$k_{\Gamma}$
В	мА	мА/мм	мА	мА	мА	мА	–

4. Построить согласно рис. 19.1 веберамперную характеристику  $\psi(i)$  катушки, используя временные зависимости  $i(\omega t)$  и  $\psi(\omega t)$ . Проградуировать оси тока, потокосцепления и безразмерного времени в мА, мВб и рад соответственно.
5. Разложить кривую  $i(\omega t)$  в ряд Фурье по методу трех ординат. Вычислить действующее значение тока  $I$  и сравнить его с показанием амперметра. Вычислить также коэффициент гармоник. Результаты расчетов внести в табл.19.2.
6. Сформулировать выводы по работе.

## РАБОТА 20

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВЕНТИЛЯМИ

**Цель работы.** Экспериментальное подтверждение способности нелинейных элементов выпрямлять переменный ток. Сравнительный анализ различных схем выпрямителей.

#### *Пояснения к работе*

Анализ нелинейных цепей при периодических воздействиях производится с учетом динамических характеристик нелинейных элементов. Если при этом ставится цель определить форму или гармонический состав реакции цепи, то используются характеристики нелинейных элементов для мгновенных значений.

При сравнительно невысоких частотах переменных токов и напряжений динамические характеристики безынерционных нелинейных элементов практически совпадают с их статическими характеристиками.

Для выпрямления переменного тока используют нелинейные безынерционные резисторы с резко выраженной несимметрией вольтамперной характеристики (ВАХ) относительно начала координат. Такие элементы, фактически проводящие ток в одном направлении, называются *электрическими вентилями*. К вентилям относятся полупроводниковые и вакуумные диоды, газотроны, тиристоры и др.

На рис. 20.1,а представлена ВАХ диода  $i(u)$  при воздействии на него гармонического напряжения  $u(\omega t)$  промышленной частоты (эта зависимость показана на том же рисунке). Если перенести последовательно ряд точек с этой диаграммы при определенных значениях  $\omega t$  на характеристику  $i(u)$  и найти по ней соответствующие значения реакции диода – тока  $i$ , то легко можно построить и зависимость  $i(\omega t)$ , которая показана на рис. 20.1,б. Реакция диода оказывается несинусоидальной, причем спектр ее содержит постоянную составляющую, основную (с угловой частотой  $\omega$ ) и высшие гармоники.

Легко заметить, что амплитуда положительной полуволны тока гораздо больше амплитуды отрицательной полуволны. Различие этих амплитуд тем больше, чем больше амплитуда напряжения источника. Зачастую различие настолько велико, что током отрицательной полуволны можно пренебречь. В этом случае характеристику реального диода можно заменить характеристикой идеального вентиля, которая показана пунктиром на рис. 20.1,а. Сопротивление такого вентиля положительной полуволне напряжения равно нулю, а для отрицательной полуволны бесконечно велико. Схематическое изображение идеального вентиля показано на рис. 20.1,в. В данной работе в качестве вентилях используются полупроводниковые диоды с характеристиками, близкими по свойствам к идеальным.

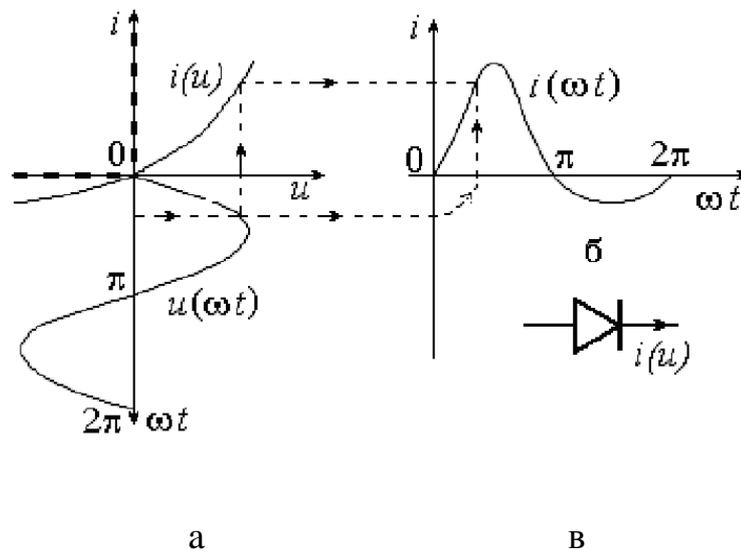


Рис. 20.1.

Устройства с электрическими вентилями, предназначенные для преобразования переменного напряжения в постоянное, именуются *выпрямителями*. О качестве выпрямления судят по величине *коэффициента пульсации*  $k_{\Pi}$ . Коэффициент пульсации определяется как отношение действующего значения переменной составляющей  $U_{\tilde{2}}$  напряжения на выходе выпрямителя  $u_2$  к его постоянной составляющей  $U_0$ :

$$k_{\Pi} = \frac{U_{\tilde{2}}}{U_0} = \frac{\sqrt{U_2^2 - U_0^2}}{U_0}. \quad (20.1)$$

Чем меньше величина этого коэффициента, тем лучше качество выпрямления.

### Схемы электрических цепей

Схемы электрических цепей, сравнительное исследование которых проводится в работе, показаны на рис. 20.2 ÷ 20.5. Питание осуществляется от трехфазного генератора, причем на вход первых двух схем подается его фазное напряжение. Действующее значение этого напряжения контролируется в схемах 20.2 ÷ 20.4 вольтметром переменного напряжения  $V_1$ . В последней же схеме этот вольтметр измеряет линейное напряжение.

На выходе каждого из выпрямителей включена нагрузка с сопротивлением  $R = 10$  кОм. Вольтметры постоянного напряжения  $V_0$  и переменного напряжения  $V_2$  измеряют соответственно постоянную составляющую  $U_0$  и действующее значение переменной составляющей  $U_{\tilde{2}}$  выходного напряжения  $u_2(\omega t)$ . Это же напряжение подается и на осциллограф, на экране которого можно наблюдать кривую  $u_2(\omega t)$ .

1. Однополупериодный выпрямитель (рис. 20.2).

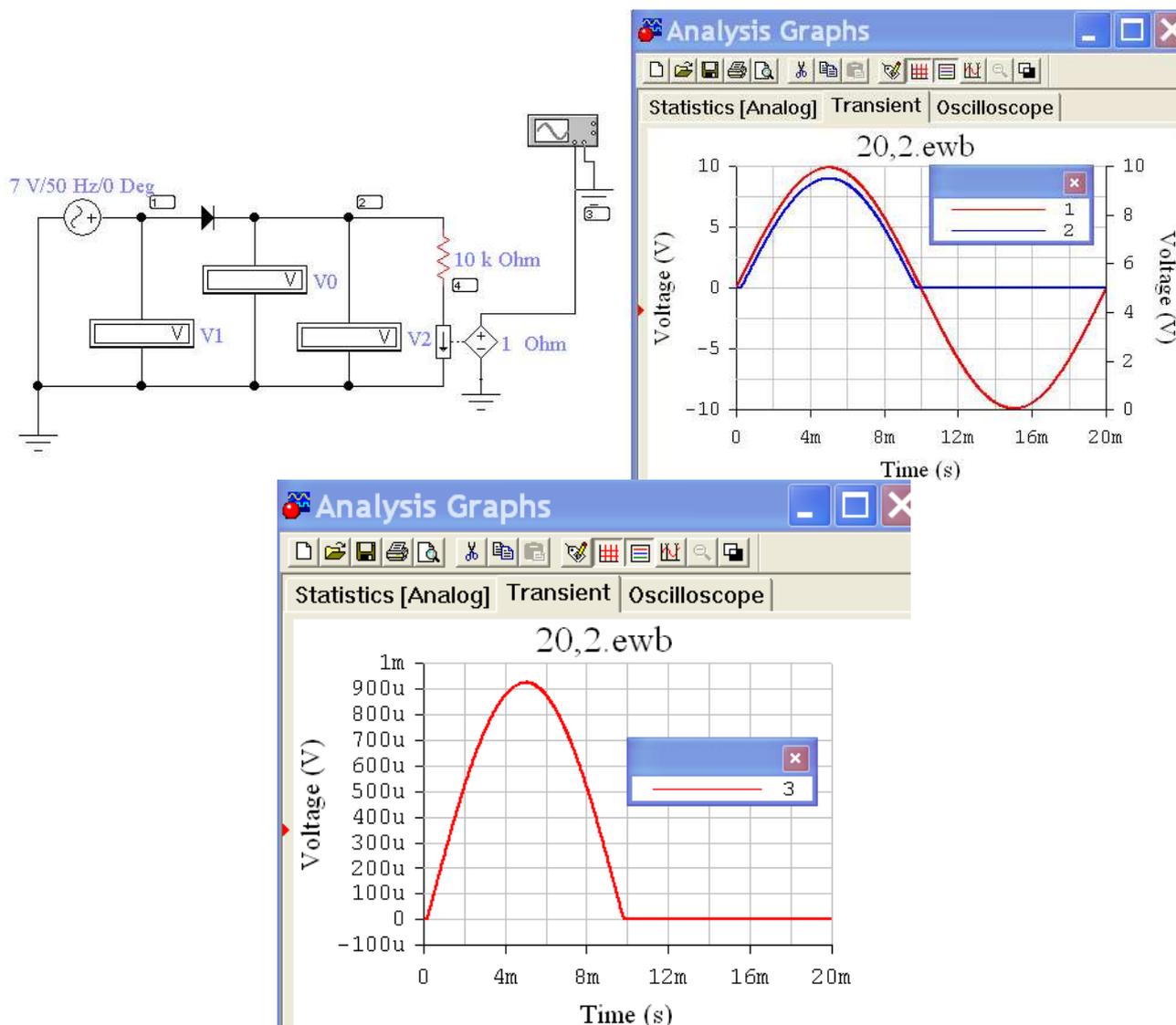
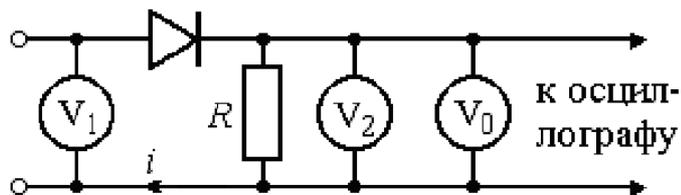


Рис. 20.2.

В течение положительного полупериода входного напряжения  $u_1(\omega t)$  диод открыт и по нему протекает ток прямого направления. В отрицательный полупериод диод закрыт – ток отсутствует. Таким образом, в нагрузке течет пульсирующий ток – переменный по величине, но имеющий постоянное направление. Осциллограмма напряжения на нагрузке повторяет форму кривой тока и ее разложение в ряд Фурье имеет вид:

$$u_2(\omega t) = \frac{U_m}{\pi} \left[ 1 + \frac{\pi}{2} \sin(\omega t) - 2 \left( \frac{1}{1 \cdot 3} \cos(2\omega t) + \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \dots \right) \right]. \quad (20.2)$$

Очевидно, частота основной гармоники выходного напряжения равна частоте входного ( $f = 50$  Гц). Одинаковы и амплитуды  $U_m$  этих напряжений. Поэтому  $U_0 = U_m / \pi = 0,45 \cdot U_1$ ,  $U_2 = 0,5 \cdot U_m = 0,707 \cdot U_1$ .

## 2. Двухполупериодный выпрямитель (рис. 20.3).

В положительный полупериод входного напряжения открыты диоды  $D_1$  и  $D_2$ , а диоды  $D_3$  и  $D_4$  заперты. В отрицательный же полупериод, наоборот, открыты диоды  $D_3$  и  $D_4$ , а диоды  $D_1$  и  $D_2$  заперты. В результате ток в нагрузке имеет одно и то же направление в оба полупериода. Разложение в ряд Фурье выходного напряжения имеет вид:

$$u_2(\omega t) = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} \left[ 1 - 2 \left( \frac{1}{1 \cdot 3} \cos(2\omega t) + \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \dots \right) \right]. \quad (20.3)$$

Частота основной гармоники этого напряжения в два раза превышает частоту входного напряжения. Постоянная составляющая и действующее значение выходного напряжения равны соответственно

$$U_0 = 2 \cdot U_m / \pi = 0,9 \cdot U_1, \quad U_2 = 0,707 \cdot U_m = U_1.$$

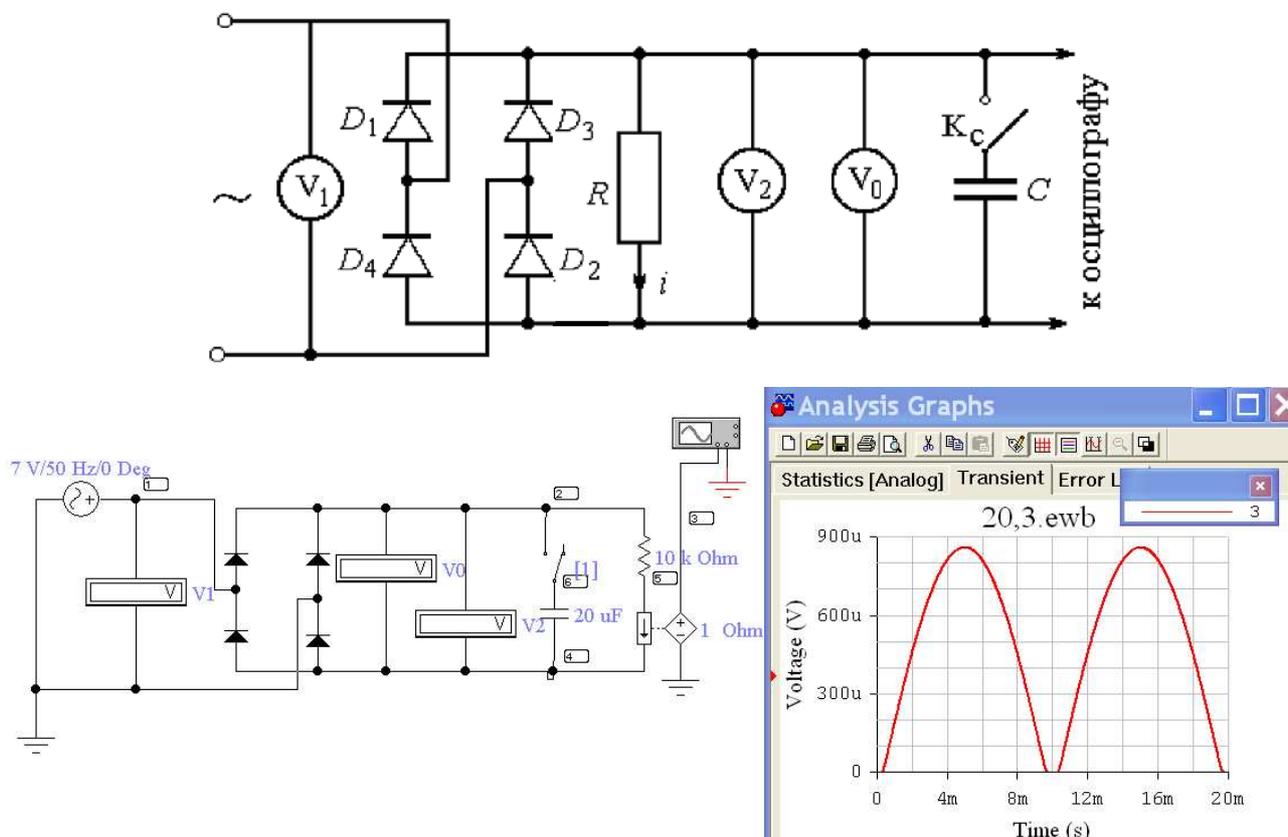


Рис. 20.3

Для улучшения качества выпрямления используются различные схемы сглаживающих фильтров. Простейший из них – конденсатор, подключаемый параллельно нагрузке. Постоянная составляющая тока через конденсатор не течет, а замыкается по сопротивлению нагрузки  $R$ . Переменная составляющая распределяется между нагрузкой и конденсатором таким образом, что в нагрузку попадает тем меньшая часть гармонической составляющей тока  $k$ -ого порядка, чем меньше емкостное сопротивление  $X_{Ck} = (k\omega C)^{-1}$  току этой гармоники.

Фактически в цепи происходит повторяющийся переходный процесс. Когда абсолютное значение напряжения на входе выпрямителя достигает напря-

жения на емкости, одна пара диодов открывается и конденсатор подзаряжается до величины  $U_m$ . Затем эта пара диодов запирается и конденсатор начинает разряжаться через нагрузку. Когда в следующем полупериоде абсолютное значение напряжения на входе выпрямителя вновь достигнет напряжения на емкости, откроется вторая пара диодов и конденсатор опять будет заряжаться до величины  $U_m$ . Затем и эти диоды запираются, конденсатор снова разряжается через нагрузку и т. д. Чем больше значение постоянной времени  $RC$ , тем медленнее спадает напряжение на конденсаторе, тем меньше его пульсации. Однако при этом велики импульсы тока в диодах.

Поэтому емкостный фильтр используется в выпрямителях с малыми токами нагрузки, когда импульсы токов в диодах не достигают опасных значений.

### 3. Трехфазный выпрямитель с нагрузкой в нулевом проводе (рис. 20.4).

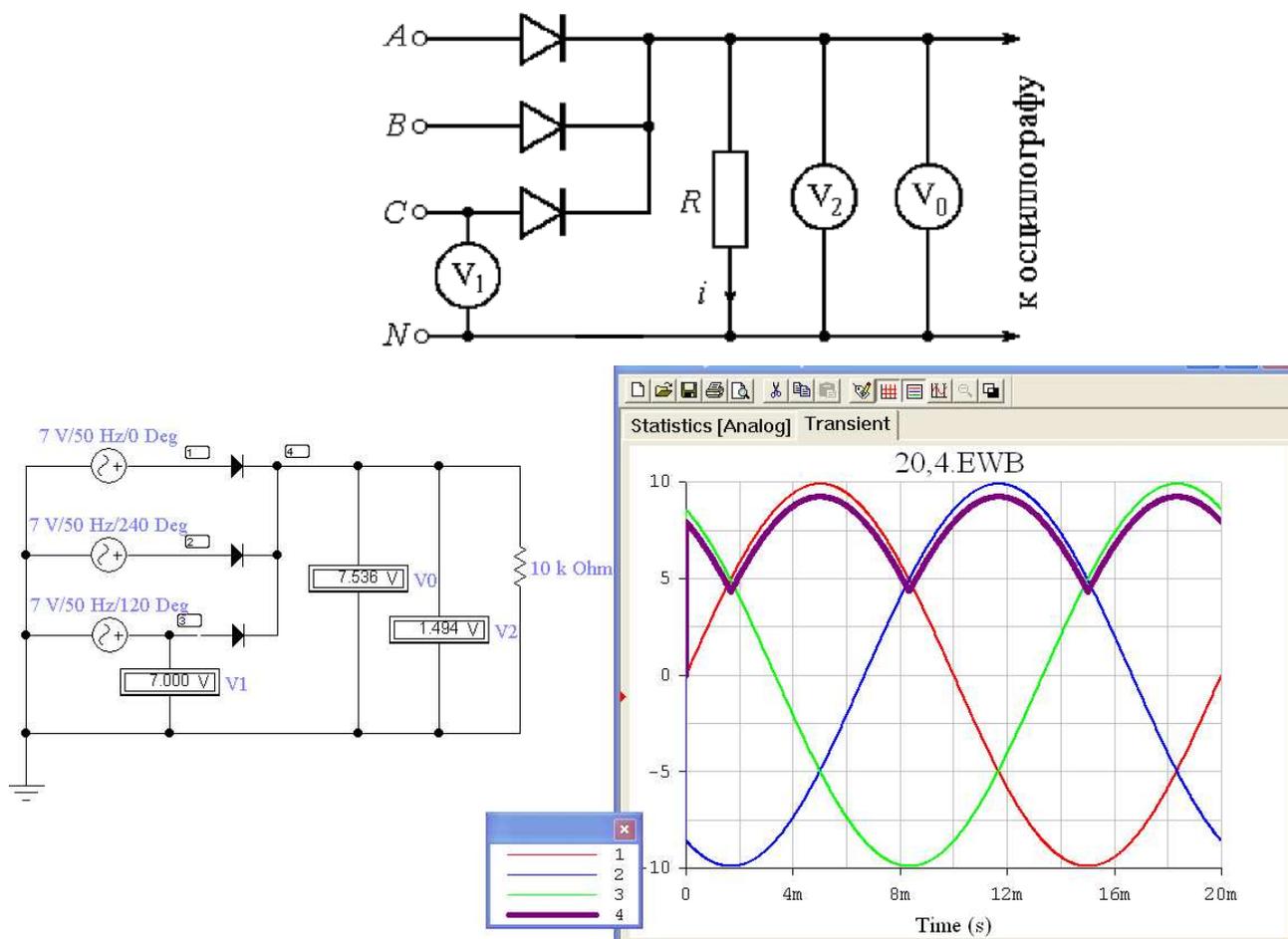


Рис. 20.4.

С увеличением числа фаз в схеме выпрямления форма кривой тока заметно сглаживается. Диоды работают поочередно: открывается диод включенный в фазу, напряжение на которой в данный момент времени имеет положительную полярность и оказывается больше напряжения на другой фазе, имеющего ту же полярность. Если, например,

$$\underline{U}_A = U_m / \sqrt{2} = a \underline{U}_B = a^2 \underline{U}_C, \quad (20.4)$$

то в интервале от  $t = 0$  до  $t = T/12$  открыт диод в фазе  $C$ , поскольку в это время  $u_C > u_A > 0 > u_B$ . В течение следующей трети периода открыт диод в фазе  $A$ ,

потом столько же в фазе  $B$ , снова в фазе  $C$  и т. д. Ток через нагрузку в любой момент течет в одном и том же направлении. Наибольшее значение выходного напряжения  $U_{\max} = U_m$ , а наименьшее  $U_{\min} = 0,5 \cdot U_m$ .

#### 4. Трехфазная мостовая выпрямительная схема Ларионова (рис. 20.5).

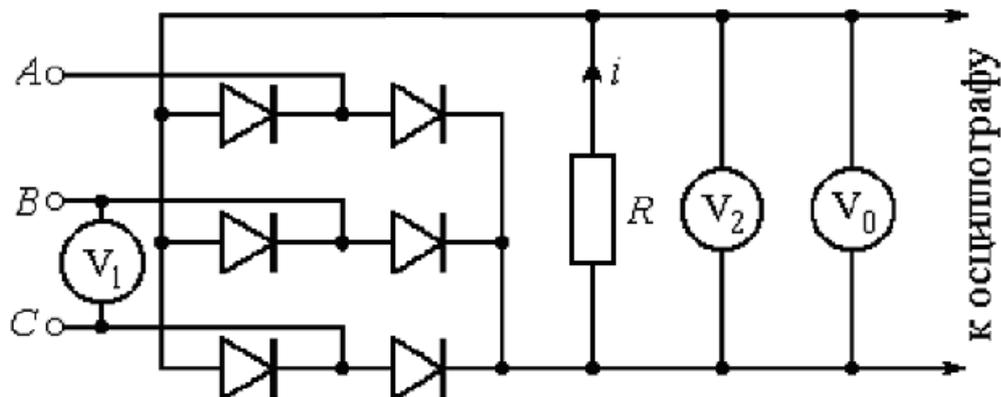


Рис. 20.5.

Эта схема обеспечивает еще большее сглаживание выходного напряжения и не требует наличия нулевого провода. Поочередно открываются пары диодов. Открыта пара, включенная между фаз, разность потенциалов которых имеет в данный момент положительную полярность и превышает напряжение между двумя другими фазами. При том же условии для фазных напряжений (20.4), что и в предыдущей схеме, в интервале от  $t = 0$  до  $t = T/12$  этому правилу удовлетворяет линейное напряжение  $u_{CB}$ , в следующую шестую часть периода – напряжение  $u_{AB}$ , затем  $u_{AC}, u_{BC}, u_{BA}, u_{CA}$ , снова  $u_{CB}$  и т. д. Ток в нагрузке в любой момент времени течет в одном направлении. Наибольшее значение выходного напряжения  $U_{\max} = \sqrt{3} \cdot U_m$ , наименьшее  $U_{\min} = 1,5 \cdot U_m$ .

#### Подготовка к работе

Изучив теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. В чем принципиальное отличие динамических характеристик от статических?
2. Какой вид должна иметь ВАХ нелинейного элемента, чтобы его можно было использовать для выпрямления переменного тока?
3. Нарисуйте форму кривой тока в нагрузке цепи с идеальным диодом (рис. 20.2) при синусоидальном входном напряжении.
4. Что оценивает коэффициент пульсации? Как его подсчитать по показаниям приборов в каждой из выпрямительных схем? Используя приведенные выше разложения в ряд Фурье (20.2), (20.3), рассчитать теоретическое значение  $k_{\Pi}$  для схем одно- и двухполупериодного выпрямления.

5. Приближенное разложение в ряд Фурье выходного напряжения для схем, изображенных на рис. 20.4 и 20.5, имеет вид:

$$u_2(\omega t) \approx U_0 - U_{km} \cos(k\omega t). \quad (20.5)$$

Здесь  $k = 3$  для трехфазной схемы с нулевым проводом,  $k = 6$  для схемы Ларионова. Вывести формулы для определения постоянной составляющей и амплитуды основной гармоники (метод двух ординат), считая известными наибольшее  $U_{\max}$  и наименьшее  $U_{\min}$  значения этого напряжения на осциллограмме.

### Программа работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 20.2. Подключить осциллограф, срисовать осциллограмму, а показания приборов записать в таблицу 20.1.

**Таблица 20.1**

Выпрямитель		Эксперимент			Расчет	
		$U_1$	$U_0$	$U_2^{\sim}$	$U_2$	$k_{\text{П}}$
		В	В	В	В	-
Однополупериодный						
Двух- полупериодный	без фильтра					
	$C = 1$ мкФ					
	$C = 1,47$ мкФ					
	$C = 1,69$ мкФ					
Трехфазный с нулевым проводом						
Схема Ларионова						

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 20.3. При разомкнутом положении ключа  $K_C$  записать показания приборов и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя. При замкнутом ключе  $K_C$  исследовать влияние величины емкости  $C$  фильтра на качество выпрямления. Для этого записать показания приборов и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя при трех значениях емкости. Показания приборов записывать в табл. 20.1.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 20.4, записать показания приборов в табл. 20.1 и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя.
4. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 20.5, записать показания приборов в табл. 20.1 и снять осциллограмму выходного напряжения выпрямителя, предварительно вдвое увеличив масштаб напряжения на осциллографе.
5. Вычислить действующие значения выходного напряжения  $U_2 = \sqrt{U_0^2 + (U_2^{\sim})^2}$  и значения коэффициента пульсаций  $k_{\text{П}}$  по формуле (20.1) для всех проведенных экспериментов. Результаты вычислений внести в табл. 20.1.

6. Измерить наибольшее  $U_{\max}$  и наименьшее  $U_{\min}$  значения выходного напряжения на осциллограммах, полученных при исследовании одно- и двухполупериодного выпрямителей. Вычислить  $U_0$ ,  $U_2$ ,  $U_2^{\sim}$ , используя разложения в ряд Фурье выпрямленного напряжения в схемах одно- и двухполупериодного выпрямителей (20.2) и (20.3). Затем подсчитать коэффициент  $k_{\Pi}$ . Результаты вычислений внести в табл. 20.2.

**Таблица 20.2**

Выпрямитель	$U_{\max}$	$U_{\min}$	$U_0$	$U_2$	$U_2^{\sim}$	$k_{\Pi}$
	В	В	В	В	В	-
Однополупериодный						
Двухполупериодный (без фильтра)						
Трёхфазный. с нул. пров.						
Схема Ларионова						

7. Измерить наибольшее  $U_{\max}$  и наименьшее  $U_{\min}$  значения выходного напряжения на осциллограммах, полученных при исследовании трёхфазных выпрямителей. Вычислить с их помощью  $U_0$ ,  $U_2^{\sim} = U_{km} / \sqrt{2}$ , используя приближённую формулу (20.5) разложения в ряд Фурье выпрямленного напряжения в этих схемах. Затем подсчитать коэффициент  $k_{\Pi}$ . Результаты вычислений также внести в табл. 20.2.
8. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы по работе.

## Список литературы

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3 томах. – СПб.: Питер, 2003. – Том 2. – 576 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.Д., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Общие правила проведения лабораторных работ.....	3
РАБОТА 12 Исследование переходных процессов в цепи первого порядка .....	4
РАБОТА 13 Изучение обобщенных законов коммутации.....	13
РАБОТА 14 Аперiodический переходный процесс в цепи второго порядка.....	16
РАБОТА 15 Колебательный переходный процесс в цепи второго порядка .....	19
РАБОТА 16 Исследование нелинейных цепей постоянного тока .....	24
РАБОТА 17 Нелинейный резистивный элемент в цепи с источником гармонического напряжения .....	28
РАБОТА 18 Исследование нелинейных цепей переменного тока.....	34
РАБОТА 19 Катушка с ферромагнитным сердечником в цепи источника гармонического напряжения .....	40
РАБОТА 20 Электрические цепи с вентилями .....	43
Список литературы.....	52
Содержание .....	52

Руководство к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники в среде Electronics Workbench  
Часть 2  
для студентов ЭЛТИ и ИДО

Переходные процессы и нелинейные электрические цепи

Составители:  
Вероника Андреевна Колчанова  
Сергей Владимирович Пустынников  
Владислав Дмитриевич Эськов

Подписано к печати  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.  
Печать RISO. Усл. печ. л. . Уч.-изд.л.  
Тираж экз. Заказ . Цена свободная.  
Издательство ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.