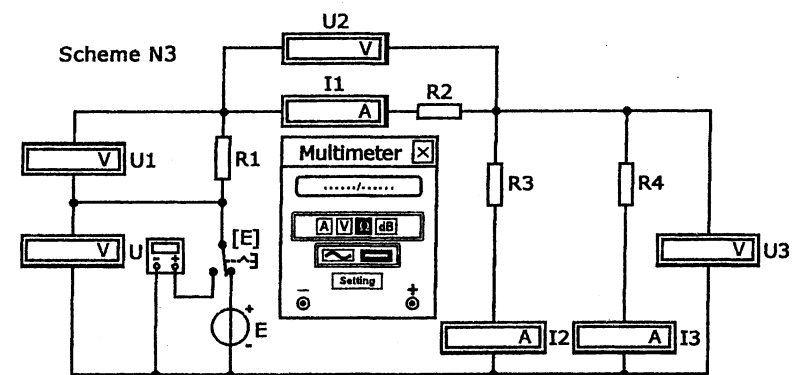


32–2018

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 1 - 4
по дисциплине "Основы теории цепей"
для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные
системы и комплексы" очной формы обучения



Воронеж 2018

УДК 621.372.01
ББК 31.211я73

Составитель д-р техн. наук А.В. Останков

Методические указания к лабораторным работам №1 - 4 по дисциплине "Основы теории цепей" для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" очной формы обучения / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост. А.В. Останков. - Воронеж, 2018. - 41 с.

Методические указания содержат описание первых четырёх работ, входящих в лабораторный практикум по дисциплине "Основы теории цепей" и ориентированных на выполнение методом имитационного моделирования.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями ФГОС ВО по специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы", учебным планом подготовки специалистов и рабочей программой дисциплины "Основы теории цепей". Предназначены для студентов второго курса.

Табл. 20. Ил. 23. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.372.01
ББК 31.211я73

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е.Д. Алперин

*Печатается по решению учебно-методического совета
Воронежского государственного технического университета*

© ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет", 2018

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Методические указания содержат описание первых четырёх работ лабораторного практикума по дисциплине "Основы теории цепей", выполняемых в III-м семестре студентами специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиоэлектронные системы передачи информации" очной формы обучения. В описание каждой работы включены индивидуальные исходные данные, задание, методика проведения исследований, контрольные вопросы к защите работы. В конце приведён список рекомендуемой литературы.

Выполнение лабораторных работ осуществляется фронтально (по вариантам) посредством имитационного моделирования цепей в схемотехническом симуляторе свободного доступа. Используются заранее подготовленные преподавателем схемные файлы. По окончании выполнения каждой лабораторной работы студент должен оформить по результатам исследований индивидуальный отчёт и защитить работу.

Индивидуальный отчёт по лабораторной работе оформляется на отдельных скреплённых между собой листах бумаги формата А4 с указанием Ф.И.О. и группы студента, названия лабораторной работы и её цели. Далее следуют разделы лабораторного задания, в каждом из которых отражаются: краткое содержание задания, электрические схемы исследуемых цепей, результаты выполнения экспериментальных исследований и сопутствующих расчётов (таблицы и графики), выводы. В конце отчёта формулируется заключение, содержащее наиболее важные общие выводы по работе.

Защита каждой лабораторной работы предполагает объяснение полученных результатов, ответы на теоретические вопросы и решение типовых минизаданий, связанных с тематикой проведённых исследований. По отдельным темам предусмотрена защита лабораторных работ по результатам индивидуального компьютерного тестирования. Зачёт по проделанной работе должен быть сдан до начала выполнения следующей.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Каждый студент, приступающий в лаборатории к выполнению лабораторного практикума по дисциплине "Основы теории цепей", должен ознакомиться с содержанием инструкции по технике безопасности, и оставить свою подпись в журнале инструктажа по технике безопасности.

Дополнительные положения расширенной инструкции по технике безопасности:

1. Работа на персональных компьютерах (ПК) в лаборатории должна проводиться только с разрешения преподавателя, ведущего занятия.
2. Включение рубильника силовой сети, питающей ПК, осуществляется только преподавателем.
3. Запрещается самостоятельно вставлять в розетку и извлекать из неё штепсельную вилку сетевого кабеля ПК.
4. Запрещается работа на одном ПК вдвоём, троём или бригадой.
5. Запрещается работать с программными приложениями, не имеющими отношения к лабораторному практикуму по дисциплине "Основы теории цепей".
6. В случае возникновения неисправности ПК необходимо немедленно сообщить о произошедшем преподавателю.
7. **Запрещается сохранять изменённые в ходе работы рабочие схемные файлы.**
8. Запрещается оставлять без надзора включенный рабочий ПК.
9. Запрещается оставаться в лаборатории и выполнять лабораторную работу одному.
10. В случае поражения одного из работающих электрическим током любой другой из находящихся в лаборатории должен немедленно выключить рубильник силовой сети и сообщить о случившемся преподавателю.

Лабораторная работа № 1

ЭЛЕМЕНТЫ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цель работы — приобрести навыки оценки параметров источников электрической энергии; подтвердить экспериментально основные законы электрических цепей; овладеть методикой эквивалентных преобразований в электрических цепях.

Задания и указания по их выполнению

Выяснить у преподавателя присвоенный Вам номер индивидуального варианта (далее по тексту №), в соответствии с которым выполняются лабораторные работы обоих семестров. Загрузить схемный файл "Lab_Rab_1.ewb".

1. Исследование источников электрической энергии

Изучить и внести в отчёт схему замещения реального источника постоянного напряжения (рис. 1).

В соответствии с номером варианта № установить параметры элементов "Scheme N1" загруженного файла (рис. 2): ЭДС источника $E = №$ В, внутреннее сопротивление $R_i = 100 \cdot №$ Ом. Для установки параметра элемента рассматриваемой цепи следует выделить указателем мыши нужный элемент цепи и дважды щёлкнуть по изображению элемента левой кнопкой мыши.

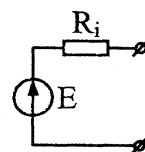


Рис. 1

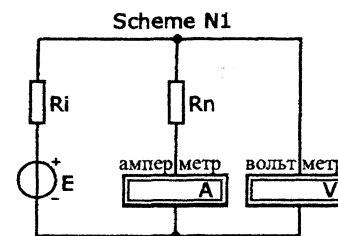


Рис. 2

Далее в появившемся окне "... Properties" выбрать закладку "Value" и установить требуемое значение параметра элемента: для ЭДС — "Voltage", для сопротивления — "Resistance".


Реализовать короткое замыкание сопротивления нагрузки R_n путём двойного щелчка левой кнопкой мыши по изображению R_n и активации в закладке "Fault" опции "Short". Кнопкой "" в углу окна запустить моделирование и измерить амперметром ток короткого замыкания источника $I_{кз}$. Величина тока будет выражена в дольных единицах ампера, отдельные международные обозначения которых приведены в табл. 1. Округлить величину тока (и далее всех измеряемых и рассчитываемых величин) до трёх значащих цифр (прил. 1). Внести значение $I_{кз}$ в первый столбец табл. 2. Остановить моделирование.

Таблица 1

Обозначения дольных единиц измерения тока и напряжения

Международное обозначение приставки	Приставка к единице измерения	Соотношение с основной единицей
μ	микро-	10^{-6}
m	милли-	10^{-3}

Активировать в закладке "Fault" окна параметров элемента R_n режим "None". Перейти в закладку "Value" и установить значение сопротивления R_n , равным $\frac{1}{4}R_i$. Запустить моделирование и измерить вольтметром напряжение U на зажимах источника и амперметром ток I , протекающий через зажимы источника. Результаты внести в табл. 2. Последовательно увеличивать величину сопротивления R_n сначала до $\frac{2}{3}R_i$, затем — до $1.5 \cdot R_i$, и, наконец, до $4 \cdot R_i$, и каждый раз измерять напряжение U на зажимах и ток I через зажимы источника. Результаты измерений также внести в табл. 2.

Таблица 2

Вольт-амперная характеристика источника напряжения

U, В	0					U_{xx}
I, мА	$I_{кз}$					0

Установить бесконечно большое сопротивление нагрузки R_n , для чего активировать в закладке "Fault" опцию "Open". Измерить напряжение холостого хода U_{xx} источника. Внести значение U_{xx} в последний столбец табл. 2.

По данным табл. 2 построить вольт-амперную характеристику источника (зависимость тока I источника от напряжения U на его зажимах), для чего нанести её точки и соединить их наилучшим образом прямой. Вычислить внутреннее сопротивление источника: $\check{R}_i = U_{xx}/I_{кз}$. Рассчитать относительную погрешность его оценки: $\delta R\% = 100\% \cdot |\check{R}_i - R_i|/R_i$ ($R_i = 100 \cdot N_2$ Ом).

Активировать в закладке "Fault" окна параметров R_n режим "None". Установить значение сопротивления R_n , равным $2 \cdot R_i$. Измерить напряжение U на зажимах источника. Рассчитать, какую долю ЭДС источника E составляет измеренное напряжение U : $\check{k} = U/E$. Рассчитать относительную погрешность оценки доли: $\delta k\% = 150\% \cdot |\check{k} - \frac{2}{3}|$.

Заменить исследуемый реальный источник напряжения реальным источником тока (рис. 3) путём перехода к "Scheme N2" загруженного файла (рис. 4). Внутреннее сопротивление источника тока R_i установить равным внутреннему сопротивлению изученного источника напряжения $R_i = 100 \cdot N_2$ Ом (закладка "Value", позиция "Resistance"). Величину тока источника I установить равной E/R_i (закладка "Value", позиция "Current"), где $E = N_2 \cdot B$ — ЭДС источника напряжения.

Реализовать короткое замыкание сопротивления нагрузки R_n . Запустить моделирование. Измерить ток короткого замыкания источника тока $I_{кз}$ и сравнить с $I_{кз}$ источника напряжения.

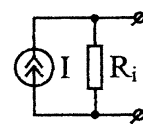


Рис. 3

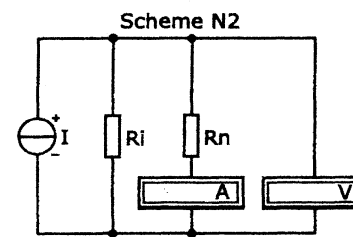


Рис. 4

Напряжения на элементах и токи в ветвях исследуемой цепи

Величина	U, В	U ₁ , В	U ₂ , В	U ₃ , В	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА	R _Э , Ом
Измерения								
Расчёт								

Установить бесконечно большое сопротивление нагрузки R_n. Измерить напряжение холостого хода U_{хх} источника. Сравнить его с уже известным для источника напряжения. Результаты измерений зафиксировать в отчёте. Сделать выводы.

2. Исследование баланса токов и напряжений в электрической цепи

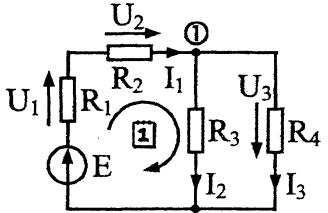


Рис. 5

Изучить и внести в отчёт схему цепи со смешанным соединением сопротивлений (рис. 5).

В соответствии с номером варианта № установить параметры элементов "Scheme N3" (рис. 6): ЭДС источника E = (№ + 40) В, величины сопротивлений R₁ = (50 · № + 500) Ом,

R₂ = 500 Ом, R₃ = 3000 · (№ + 3) / (3№ - 1) Ом и R₄ = 300 · (№ + 3) Ом.

Нажатием клавиши "E" переключатель перевести в правое положение, обеспечивающее подключение к цепи источника напряжения E. Запустить моделирование. С помощью вольтметра "U" и амперметра "I₁" измерить напряжение U на всей цепи и ток I₁, потребляемый цепью от источника. Внести результаты измерений в табл. 3.

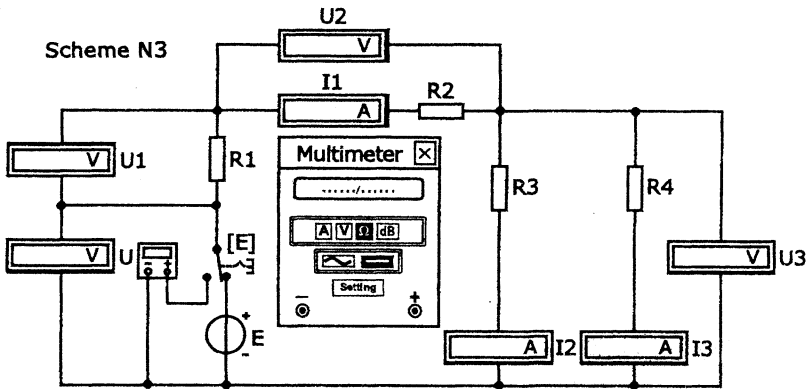


Рис. 6

Используя закон Ома, вычислить эквивалентное сопротивление цепи: R_Э = U/I₁. Перевести переключатель "E" в левое положение, и, запустив моделирование, измерить эквивалентное сопротивление цепи R_Э с помощью омметра ("Multimeter"). Оба полученных значения R_Э внести в последний столбец строки "Измерения" табл. 3. Сделать вывод.

Вновь перевести переключатель "E" в правое положение, и, запустив моделирование, измерить напряжения на всех элементах цепи (U₁, U₂, U₃) и токи в ветвях (I₂, I₃). Результаты внести в табл. 3. Проверить, выполняется ли первый закон Кирхгофа для узла ① (рис. 5), то есть насколько верно равенство I₁ = I₂ + I₃. Результаты указать на рис. 7,а, внеся его в отчёт. Проверить, выполняется ли второй закон Кирхгофа для контура ② (рис. 5), то есть насколько верно равенство E = U₁ + U₂ + U₃. Результаты указать на рис. 7,б, также внеся его в отчёт.

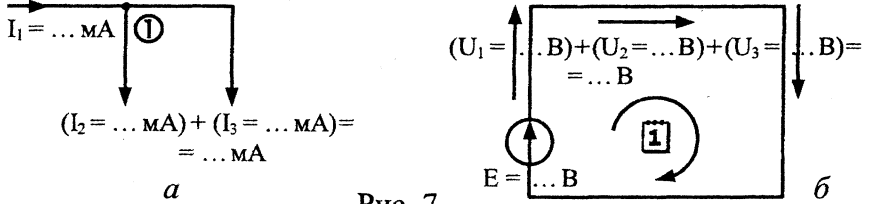


Рис. 7

Выполнить расчёт всех токов в ветвях и напряжений на элементах цепи. Расчёт начать с нахождения тока, потребляемого цепью от источника: I₁ = E/R_Э. Эквивалентное сопротивление R_Э цепи, представляющей собой последовательное соединение R₁, R₂ и R₃₄, определяется как R_Э = R₁ + R₂ + R₃₄. Со-

противление R_{34} — эквивалентное сопротивление параллельно соединённых сопротивлений R_3 и R_4 : $R_{34} = R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4)$. На основе найденного тока I_1 рассчитать U_1 , U_2 и U_3 : $U_1 = I_1 \cdot R_1$, $U_2 = I_1 \cdot R_2$, $U_3 = I_1 \cdot R_{34}$. Значения токов I_2 и I_3 определяются величиной U_3 : $I_2 = U_3 / R_3$, $I_3 = U_3 / R_4$. Расчёт привести в отчёте. Результаты расчёта внести в табл. 3. Сравнить полученные значения с экспериментально измеренными. Сделать вывод.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое источник напряжения? Какова схема замещения реального (идеального) источника напряжения?

2. Что понимают под вольт-амперной характеристикой источника? Как выглядит вольт-амперная характеристика реального (идеального) источника напряжения?

3. Какова методика измерения вольт-амперной характеристики реального источника? Что представляет собой режим холостого хода? короткого замыкания источника?

4. Как трансформируется вольт-амперная характеристика реального источника напряжения при уменьшении внутреннего сопротивления (или ЭДС) источника в два раза?

5. Что такое источник тока? Какова схема замещения, вольт-амперная характеристика и внутреннее сопротивление реального (идеального) источника тока?

6. Как видоизменится вольт-амперная характеристика реального источника тока при увеличении внутреннего сопротивления (или тока) источника в два раза?

7. В чём заключается эквивалентность реальных источников напряжения и тока? Как от схемы замещения реального источника напряжения перейти к эквивалентной схеме источника тока и наоборот?

8. Что означает последовательное (параллельное) соединение элементов цепи? Как определить эквивалентное сопротивление (или проводимость) двух (или нескольких) последовательно (или параллельно) соединённых сопротивлений?

9. В чём заключается закон Ома для участка цепи? для полной цепи с источником питания?

10. На основе закона Ома найти в общем виде ток, указанный на схеме рис. 8. Параметры элементов E , I , $R_1 - R_4$ считать заданными.

11. Найти в общем виде ток в указанной преподавателем цепи на рис. 8, заменив приведённый в схеме реальный источник эквивалентным источником другого типа ($E \rightarrow I$, $I \rightarrow E$).

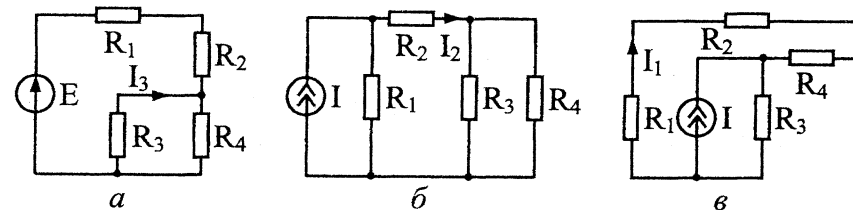


Рис. 8

12. Что такое узел, контур электрической цепи? Сформулировать законы Кирхгофа для узла и для контура цепи.

13. Для цепей, схемы которых показаны на рис. 8, указать направления всех токов и напряжений и записать все возможные уравнения по первому и второму законам Кирхгофа.

14. Сформулировать правило деления напряжения в простейшем делителе напряжения — последовательном соединении двух сопротивлений R_1 и R_2 .

15. Сформулировать правило деления тока в простейшем делителе тока — параллельном соединении двух сопротивлений R_1 и R_2 .

Литература: [1, с. 12-13; 18-20; 33-37; 38-45];
 [2, с. 9-12; 19-21; 23-25; 26-27];
 [3, с. 8-12; 16-18; 28-34; 36-39; 42-45];
 [4, с. 10-14; 18-19; 24-25; 28-32];
 [5, с. 11-14; 21-23; 26; 28-30].

Лабораторная работа № 2

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЦЕПИ И ИХ СОЕДИНЕНИИ

Цель работы — изучить взаимосвязь гармонических токов и напряжений в пассивных элементах цепи R , L , C и их последовательном соединении.

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_2.ewb".

Внести в отчёт схему исследуемой цепи (рис. 9).

Выяснить назначение подключенных к моделируемой цепи (рис. 10) приборов — источника напряжения и осциллографа. Используя материал прил. 2, ознакомиться с методикой настройки и практического применения используемого источника напряжения и осциллографа.

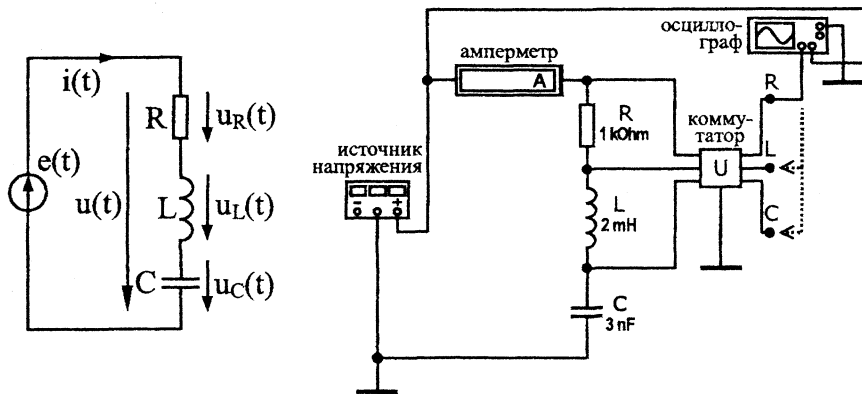


Рис. 9

Рис. 10

Установить в соответствии с табл. 4 и номером варианта № параметры генерируемого источником $e(t)$ гармонического напряжения (амплитуду E_m , циклическую частоту f) и пассивных элементов цепи R , L и C . Учсть, что большая часть

устанавливаемых параметров указана в дольных или кратных единицах измерения (табл. 5).

Таблица 4

Исходные данные для выполнения лабораторной работы № 2

№	Параметры					№	Параметры				
	источника		элементов				источника		элементов		
	E_m , В	f , кГц	R , кОм	L , мГн	C , нФ		E_m , В	f , кГц	R , кОм	L , мГн	C , нФ
1	1.0	40	1.0	4	1.6	16	1.0	85	1.0	2	3.0
2	1.0	80	1.0	4	1.6	17	1.2	35	0.6	5	1.4
3	3.0	35	2.0	4	1.8	18	1.2	70	0.6	5	1.4
4	3.0	90	2.0	4	1.8	19	1.6	30	1.1	5	2.2
5	1.5	50	0.5	1	5.0	20	1.6	70	1.1	5	2.2
6	1.5	90	0.5	1	5.0	21	1.8	35	0.8	6	2.0
7	2.0	40	0.3	1	5.0	22	1.8	55	0.8	6	2.0
8	2.0	85	0.3	1	5.0	23	2.2	25	1.5	6	2.0
9	2.5	20	0.7	3	3.5	24	2.2	70	1.5	6	2.0
10	2.5	80	0.7	3	3.5	25	0.8	40	0.4	1	6.6
11	1.3	35	0.5	3	3.5	26	0.8	75	0.4	1	6.6
12	1.3	60	0.5	3	3.5	27	0.6	45	0.2	1	8.2
13	2.0	45	1.2	2	3.2	28	0.6	65	0.2	1	8.2
14	2.0	90	1.2	2	3.2	29	3.0	45	1.6	7	0.8
15	1.0	35	1.8	2	3.0	30	3.0	95	1.6	7	0.8

Таблица 5

Обозначения дольных и кратных единиц измерения

Международное обозначение приставки	Приставка к единице измерения	Соотношение с основной единицей
n	нано-	10^{-9}
μ	микро-	10^{-6}
m	милли-	10^{-3}
k	кило-	10^{+3}

Амплитуды тока и напряжений на элементах RLC-цепи

$I_d, \text{мА}$	$I_m, \text{мА}$	$U_{mR}, \text{В}$	$U_{mL}, \text{В}$	$U_{mC}, \text{В}$	$U_m, \text{В}$	$U_{m\Sigma}, \text{В}$	$\delta U, \%$

1. Исследование взаимосвязи амплитуд тока и напряжений в RLC-цепи

По заданной частоте колебаний источника f рассчитать период $T_{\Pi} = 1/f$ в мкс, угловую частоту $\omega = 2\pi \cdot f$ в рад/с, а затем вычислить реактивные сопротивления индуктивности $x_L = \omega \cdot L$, ёмкости $x_C = 1/(\omega \cdot C)$ и полное сопротивление последовательного соединения R, L и C — $z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$ в Омах. Результаты расчётов сопротивлений реактивных элементов и полного сопротивления цепи внести в табл. 6.

Таблица 6

Сопротивления элементов R, L, C и полное сопротивление цепи

$R, \text{Ом}$	$x_L, \text{Ом}$	$x_C, \text{Ом}$	$z, \text{Ом}$	$z_{\text{изм}}, \text{Ом}$	$\delta z, \%$

Запустить моделирование. Через несколько секунд моделирование прервётся и всплывёт окно "Temporary files is full" с тремя клавишами. Нажать вторую клавишу сверху — моделирование при этом продолжится.

Убедиться в том, что показания амперметра постоянно обновляются, и невозможно указать конкретную величину тока в цепи. Связано это с тем, что амперметр — инерционный прибор, а по внутренним часам симулятора прошло лишь несколько миллисекунд. Для ускорения измерения тока необходимо остановить моделирование, выбрать пункт "Analysis Options" в меню "Analysis" и активировать (установив флажок) опцию "Generate time steps automatically" закладки "Instruments". Запустив моделирование, измерить ток. Следует помнить, что амперметр меряет действующее значение I_d . Чтобы получить амплитуду тока I_m , его действующее значение I_d надо умножить на $\sqrt{2} \approx 1.414$. Сразу же после измерения опцию "Generate time steps automatically" следует деактивировать, сняв флажок. Измеренные параметры тока округлить до трёх значащих цифр и внести в табл. 7.

Измерить амплитуду U_{mR} напряжения на сопротивлении R . Для её измерения необходимо, чтобы к левому входу осциллографа (Channel A) был подключен выход коммутатора "U", обозначенный буквой R (рис. 10, выполняется по умолчанию). Запустить моделирование. Нажатием кнопки "Expand" на панели осциллографа перевести его в режим расширенной модификации (рис. 11). Если осциллограмма превосходит по вертикали высоту экрана, то для этого канала следует увеличить масштаб оси 1 V/Div напряжения. При необходимости сжатия (растяжения) осциллограммы по оси времени изменить масштаб "Time base" горизонтальной оси.

Остановить моделирование. Внести в отчёт осциллограммы напряжений на сопротивлении (чёрного цвета) и на всей цепи (синего цвета) в пределах периода.

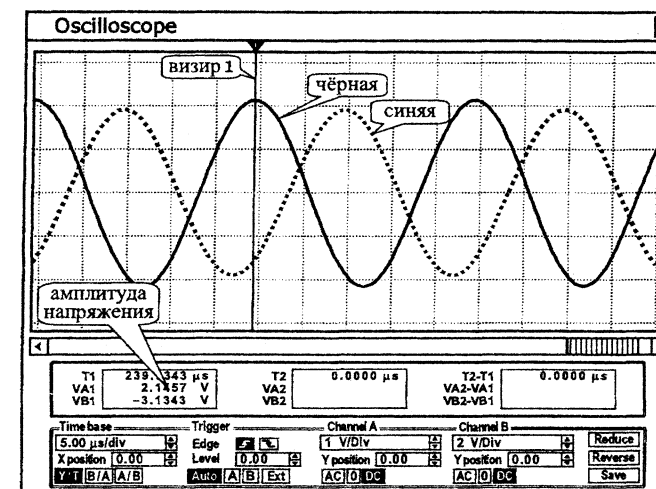


Рис. 11

Для измерения амплитуды напряжения на сопротивлении следует перетащить мышью визир 1 (красного цвета) за треугольник в его верхней части в положение, соответствующее максимуму осциллограммы чёрного цвета (рис. 11), тогда амплитуда напряжения будет отображаться на левом информационном табло в позиции "VA1".

Измеренную амплитуду U_{mR} напряжения на сопротивлении внести в табл. 7. Подключить с помощью мыши левый вход осциллографа сначала к выходу коммутатора "L", а затем "C", и измерить амплитуды напряжений на индуктивности U_{mL} и ёмкости U_{mC} . Результаты внести в табл. 7.

Для измерения амплитуды напряжения U_m на всей RLC-цепи перетащить мышью визир 1 в максимум осциллограммы синего цвета, тогда амплитуду напряжения на всей цепи можно будет считать из позиции "VB1" левого информационного табло. Результат внести в табл. 7.

На основе измеренных значений амплитуд U_{mR} , U_{mL} , U_{mC} рассчитать ожидаемое значение амплитуды напряжения $U_{m\Sigma}$ на последовательном соединении всех трёх элементов по формуле треугольника напряжений: $U_{m\Sigma} = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2}$. Результат расчёта $U_{m\Sigma}$ внести в табл. 7. Сравнить напрямую измеренную амплитуду напряжения U_m и рассчитанную по треугольнику напряжений $U_{m\Sigma}$, определив относительную погрешность: $\delta_{U\%} = 100\% \cdot |U_{m\Sigma} - U_m| / U_m$. Если найденная погрешность превышает 10 %, следует уточнить результаты измерений. Внести рассчитанную погрешность в табл. 7.

Оценку полного сопротивления RLC-цепи по результатам измерений выполнить по формуле: $z_{изм} = U_m / I_m$. Полученное значение сопротивления $z_{изм}$ сравнить с расчётным значением z из табл. 6. Определить погрешность оценки полного сопротивления цепи по формуле: $\delta_{z\%} = 100\% \cdot |z_{изм} - z| / z$. Если погрешность больше 10 %, уточнить измерения и расчёты. Внести полученное значение сопротивления $z_{изм}$ и рассчитанную погрешность $\delta_{z\%}$ в табл. 6.

2. Исследование фазовых соотношений между гармоническими колебаниями в RLC-цепи

Измерить сдвиг фаз между напряжением на сопротивлении и напряжением на всей цепи (ЭДС источника). Для этого вновь подключить левый вход осциллографа к выходу коммутатора "R". Выполнить и приостановить моделирование. Установив визиры 1 и 2 в положения, соответствующие ближайшим максимумам осциллограмм напряжений $u_R(t)$ (чёрного цвета) и $u(t)$ (синего цвета), измерить по экрану осциллографа сдвиг во времени Δt_R между максимумами (позиция "T2-T1" на правом табло осциллографа). Рассчитать сдвиг фаз φ_R между напряжениями $u_R(t)$ и $u(t)$ по формуле: $\varphi_R = \pm 360^\circ \cdot \Delta t_R / T_{\Pi}$ в градусах (T_{Π} – период, рассчитанный в п. 1). Определить знак сдвига фаз φ_R : если максимум напряжения $u_R(t)$ (чёрного цвета) наблюдается левее ближайшего максимума $u(t)$ (синего цвета), то $u_R(t)$ опережает по фазе $u(t)$ и сдвиг фаз является φ_R положительным (рис. 12), в противном случае сдвиг фаз φ_R — отрицательный. Результаты внести в табл. 8.

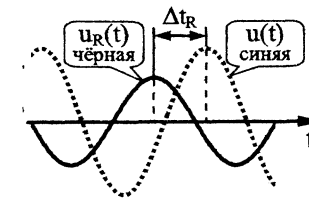


Рис. 12

Таблица 8

Фазовые соотношения между напряжениями RLC-цепи

Δt_R , мкс	φ_R , °	Δt_L , мкс	φ_L , °	Δt_C , мкс	φ_C , °

Аналогично измерить сдвиги фаз между напряжениями на реактивных элементах и напряжением на всей цепи: φ_L и φ_C . Результаты внести в табл. 8.

Полагая начальную фазу напряжения на всей цепи равной нулю ($\psi_U = 0^\circ$), начальные фазы напряжений на сопротивлении ψ_R , индуктивности ψ_L и ёмкости ψ_C принять равными соответствующим сдвигам фаз φ_R , φ_L и φ_C , определённым эксперимен-

тально и внесённым в табл. 8. Начальные фазы ψ_R , ψ_L и ψ_C внести в табл. 9. Так как начальная фаза тока в цепи ψ_i совпадает с начальной фазой напряжения на сопротивлении ψ_R , внести в табл. 9 фазу ψ_i , равную ψ_R . Сравнить начальные фазы напряжения на всей цепи ψ_U и тока в цепи ψ_i . Сделать вывод о характере сопротивления цепи на заданной частоте. Указать в отчёте выявленный тип характера сопротивления цепи (ёмкостный или индуктивный) и величину сдвига фаз между напряжением на всей цепи и током: $\phi = \psi_U - \psi_i$.

Таблица 9

Начальные фазы гармонических колебаний в RLC-цепи

$\psi_U, ^\circ$	$\psi_i, ^\circ$	$\psi_R, ^\circ$	$\psi_L, ^\circ$	$\psi_C, ^\circ$
0				

3. Обработка и верификация экспериментально полученных результатов

По данным табл. 7 и 9 построить векторную диаграмму напряжений $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$, $u(t)$ в RLC-цепи. Каждое напряжение изобразить на плоскости в виде вектора, длина которого в выбранном масштабе должна быть равна амплитуде напряжения, а угол поворота относительно горизонтальной оси отсчёта углов — начальной фазе. После построения диаграммы следует проверить углы между векторами $u_C(t)$ и $u_R(t)$, $u_L(t)$ и $u_R(t)$: они должны быть близки по величине к 90° ; причём напряжение $u_C(t)$ должно запаздывать относительно напряжения $u_R(t)$, напряжение $u_L(t)$ — опережать $u_R(t)$. Далее следует сложить графически векторы, соответствующие $u_L(t)$, $u_C(t)$ и $u_R(t)$, и сравнить суммарный вектор с вектором $u(t)$. Сделать вывод.

Рассчитать двумя способами среднюю за период (расходуемую) мощность в RLC-цепи:

а) по измеренным параметрам напряжения на всей цепи $u(t)$ и тока $i(t)$ в цепи: $P_1 = \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos\phi$, где ϕ — сдвиг фаз между напряжением на всей цепи $u(t)$ и током $i(t)$;

б) по величине амплитуды I_m тока (t) в цепи и значению активного сопротивления R цепи: $P_2 = \frac{1}{2} \cdot I_m^2 \cdot R$.

По окончании расчётов полученные значения мощностей выразить в мВт (или мкВт) и сравнить.

Методом комплексных амплитуд выполнить теоретический расчёт тока $i(t)$ и напряжений $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$ на элементах RLC-цепи. Для этого перейти к комплексной схеме замещения цепи (рис. 13). Заменить все колебания комплексными амплитудами. Считать, что комплексная амплитуда напряжения источника составляет $\dot{E}_m = E_m \cdot e^{j0^\circ}$ В. Используя ранее вычисленные значения сопротивлений элементов цепи (табл. 6), а также известные из теории сдвиги фаз в них, записать комплексные сопротивления элементов цепи R, L, C : $Z_R = R = R \cdot e^{j0^\circ}$ Ом, $Z_L = j \cdot X_L = X_L \cdot e^{j90^\circ}$ Ом, $Z_C = -j \cdot X_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}$ Ом, а затем рассчитать эквивалентное комплексное сопротивление RLC-цепи:

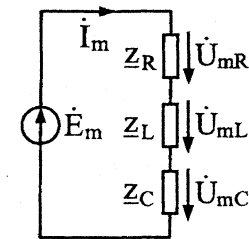


Рис. 13

$Z_{\Sigma} = Z_R + Z_L + Z_C$. На основе закона Ома в комплексной форме определить комплексную амплитуду тока в цепи: $\dot{I}_m = \dot{E}_m / Z_{\Sigma}$, а затем комплексные амплитуды напряжений на всех элементах цепи: $\dot{U}_{mR} = \dot{I}_m \cdot Z_R$, $\dot{U}_{mL} = \dot{I}_m \cdot Z_L$, $\dot{U}_{mC} = \dot{I}_m \cdot Z_C$. Внести полученные расчётным путём параметры тока $i(t)$ и напряжений $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$ на элементах RLC-цепи во вторую строку табл. 10. Здесь же (в первой строке) привести экспериментально измеренные параметры тока и напряжений. Сравнить результаты теоретического расчёта и измерений. Сделать вывод.

Таблица 10

Амплитуды и начальные фазы колебаний в RLC-цепи

Величина	$I_m, \text{мА}$	$\psi_i, ^\circ$	$U_{mR}, \text{В}$	$\psi_R, ^\circ$	$U_{mL}, \text{В}$	$\psi_L, ^\circ$	$U_{mC}, \text{В}$	$\psi_C, ^\circ$
Измерения								
Расчёт								

Контрольные вопросы к защите работы

1. По какому закону меняются токи и напряжения в цепи, питаемой от источника гармонического колебания? Что такое мгновенное, амплитудное и действующее значения гармонического колебания, а также его частота, период и начальная фаза?

2. Изобразить условное графическое обозначение ёмкости (индуктивности), привести формулу для расчёта реактивного сопротивления (проводимости) ёмкости (индуктивности). Охарактеризовать фазовые соотношения между напряжением и током в ёмкости (индуктивности).

3. Что такое комплексная амплитуда гармонического колебания? Какую она содержит в себе информацию? Как по временной зависимости гармонического колебания определить его комплексную амплитуду?

4. Как, зная комплексную амплитуду, определить временную зависимость гармонического колебания? Выполнимы ли законы Кирхгофа для комплексных амплитуд?

5. Как связаны амплитуды напряжений U_{mR} , U_{mL} и U_{mC} с амплитудой напряжения на зажимах цепи U_m в последовательном соединении элементов R , L и C ? Подчиняются ли они второму закону Кирхгофа?

6. Чем определяется сдвиг фаз между напряжением на всей цепи и током в последовательном соединении R , L и C ? Изложить методику определения характера сопротивления цепи на заданной частоте колебаний источника.

7. Изложить методику измерения фазового сдвига между гармоническими колебаниями. Чем определяется величина фазового сдвига? Как определяется знак сдвига фаз?

8. Записать закон Ома для полной цепи в комплексной форме. Что такое комплексное сопротивление цепи? Как связано комплексное сопротивление ёмкости (индуктивности) с его (её) реактивным сопротивлением?

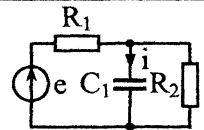
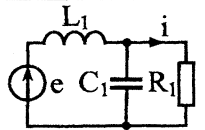
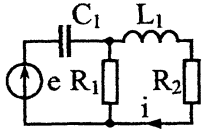
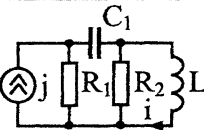
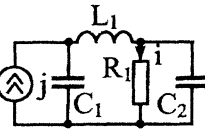
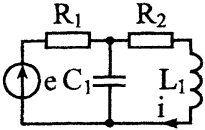
9. Как зависит от частоты реактивное сопротивление индуктивности? ёмкости? Можно ли при расчёте полного сопро-

тивления последовательной RLC-цепи на заданной частоте просто сложить сопротивления её элементов?

10. Какие треугольники справедливы для последовательного соединения R , L и C ? Изобразить эти треугольники, записать и прокомментировать соотношения, их характеризующие.

11. Выяснить характер сопротивления цепей, представленных в табл. 11.

Таблица 11

1		3		5	
2		4		6	
<p>Для всех вариантов: $i(t) = 10 \cdot \cos(10^6 \cdot t - 60^\circ)$, мА; $R_1 = 1$ кОм; $R_2 = 2$ кОм; $C_1 = 1$ нФ; $C_2 = 0.5$ нФ; $L_1 = 1$ мГн.</p>					

12. Изложить методику построения векторной диаграммы напряжений и токов в цепи? Построить в масштабе векторные диаграммы для цепей, приведённых в табл. 11.

13. Чем определяется средняя за период колебаний мощность, расходуемая в RLC-цепи, реактивная и полная мощности и каков их физический смысл?

14. Рассчитать среднюю за период мощность, потребляемую от источников цепями, заданными в табл. 11.

Литература: [1, с. 74-79; 81-89; 91; 96-97; 100-104];
 [2, с. 28-45; 48-54; 60-63];
 [3, с. 65-68; 70-71; 73-79; 82-95;
 100-104; 108-112];
 [4, с. 72-85; 102-103];
 [5, с. 42-65].

**ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ
И ТЕОРЕМА ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОМ ИСТОЧНИКЕ**

Цель работы — экспериментально проверить применимость метода наложения и теоремы об эквивалентном источнике напряжения к анализу сложных электрических цепей в режиме гармонических колебаний.

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_3.ewb".
Внести в отчёт схему исследуемой цепи (рис. 14).

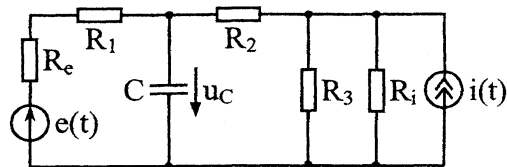


Рис. 14

Установить в соответствии с табл. 12 параметры пассивных элементов цепи: R_1 , R_2 , R_3 , C (рис. 15).

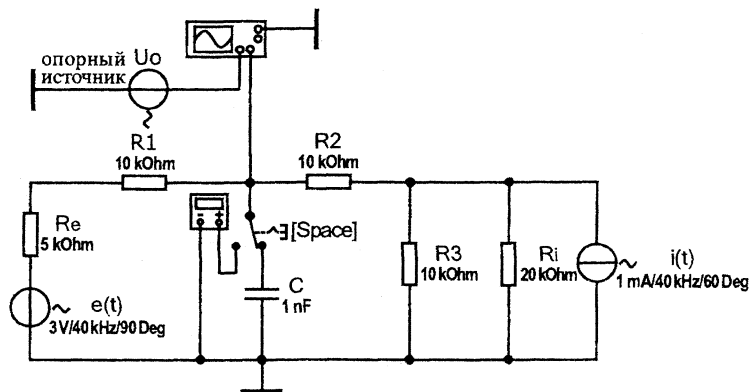


Рис. 15

Исходные данные для выполнения работы № 3

№	Параметры источников						Параметры пассивных элементов цепи			
	Frequency, kHz	напряжения $e(t)$		тока $i(t)$			R_1 , kΩ	R_2 , kΩ	R_3 , kΩ	C , nF
		Voltage, V	R_e , kΩ	Current, mA	Phase, deg	R_i , kΩ				
1	10	3	11	1	10	2	17	4	1	1.7
2	20	6	12	1	20	6	18	10	1	0.9
3	30	5	9	1	30	10	11	7	2	0.4
4	40	6	9	2	40	14	14	12	1	0.2
5	50	5	2	2	50	5	7	7	2	0.2
6	40	5	7	2	60	10	13	13	3	0.2
7	30	5	3	2	70	12	5	15	10	0.8
8	20	6	8	5	80	8	9	16	4	1.2
9	10	6	8	4	80	16	15	10	3	1.8
10	20	6	6	3	100	9	8	10	8	1.2
11	30	5	9	2	110	11	13	7	9	0.7
12	40	7	5	3	120	12	11	13	7	0.8
13	50	10	5	3	130	13	6	14	17	1.3
14	40	7	5	6	140	8	5	16	6	1.7
15	30	7	9	4	150	9	14	15	12	2.2
16	20	4	7	1	160	11	8	14	11	1.4
17	10	3	1	1	170	5	14	6	2	1.1
18	20	1	8	1	180	3	17	15	2	0.5
19	30	3	9	3	190	4	20	6	1	0.9
20	40	1	9	2	200	7	11	8	5	0.8
21	50	9	4	2	210	9	5	12	5	0.8
22	40	14	1	4	220	13	11	26	13	0.9
23	30	12	3	4	230	16	8	17	7	0.5
24	20	7	6	3	240	10	10	9	12	0.7
25	10	6	8	6	250	13	12	14	3	1.5
26	20	7	3	4	260	15	7	9	7	0.8
27	30	4	2	5	270	18	4	20	14	0.9
28	40	10	6	3	280	10	12	13	14	0.6
29	50	9	6	4	290	9	10	12	6	0.9
30	40	9	7	3	300	10	8	17	9	1.8

Установить в соответствии с табл. 12 параметры источников напряжения "e(t)" и тока "i(t)". Частоту обоих источников взять равной значению из табл. 12. Параметр "Phase" источника напряжения "e(t)" оставить без изменения ("Phase" = 90°).

Установить частоту опорного источника "Uo" (рис. 15) равной частоте источников "e(t)" и "i(t)", параметр "Phase" — равным 90°, параметр "Voltage" оставить без изменения.

1. Экспериментальная проверка применимости принципа наложения

При одновременно работающих источниках напряжения "e(t)" и тока "i(t)" измерить амплитуду U_{mC} и начальную фазу ψ_C напряжения $u_C(t)$ на ёмкости. Для этого установить в правое положение переключатель, управляемый клавишей "Space". Запустить моделирование. С помощью осциллографа измерить амплитуду U_{mC} напряжения, снимаемого с ёмкости и подаваемого на вход канала В (воспроизводимого на экране красным цветом). Обратит внимание на то, что на экране осциллографа помимо $u_C(t)$ дополнительно отображается опорное напряжение $u_0(t)$ с нулевой начальной фазой (в виде осциллограммы синего цвета). Поэтому измерив сдвиг фаз между напряжением $u_C(t)$ и напряжением $u_0(t)$ (как это делалось в работе № 2), получим начальную фазу ψ_C напряжения на ёмкости. Результаты измерений параметров U_{mC} и ψ_C напряжения на ёмкости, обусловленного одновременным действием двух источников, занести в первый и второй столбцы табл. 13.

Таблица 13

Результаты эксперимента по методу наложения

Измерения в режиме, при котором						Расчёт по методу наложения	
оба источника включены		источник "i(t)" выключен		источник "e(t)" выключен			
$U_{mC}, В$	$\psi_C, °$	$U_{mC1}, В$	$\psi_{C1}, °$	$U_{mC2}, В$	$\psi_{C2}, °$	$U_{mC\Sigma}, В$	$\psi_{C\Sigma}, °$

Выключить источник тока "i(t)" принудительным обнулением его параметра "Current". Источник напряжения "e(t)" оставить включенным. Измерить амплитуду U_{mC1} и начальную фазу ψ_{C1} напряжения $u_{C1}(t)$ на ёмкости, обусловленного действием только одного источника напряжения "e(t)". Измерения выполнить аналогично предыдущим. Результаты внести в третий и четвёртый столбцы табл. 13.

Источник тока "i(t)" вновь включить, установив исходное (заданное в табл. 12) значение параметра "Current". Выключить источник напряжения "e(t)" обнулением параметра "Voltage". Измерить амплитуду U_{mC2} и начальную фазу ψ_{C2} напряжения $u_{C2}(t)$ на ёмкости, создаваемого только источником тока. Измерения выполнить по аналогии с предыдущими. Результаты измерений внести в пятый и шестой столбцы табл. 13.

Найти сумму измеренных напряжений $u_{C1}(t)$ и $u_{C2}(t)$, создаваемых на ёмкости каждым источником "e(t)" и "i(t)" в отдельности. Сложение напряжений выполнить с учётом их начальных фаз — методом комплексных амплитуд, в соответствии с которым комплексная амплитуда суммарного напряжения $u_{C\Sigma}(t)$ определяется как: $\dot{U}_{mC\Sigma} = U_{mC1} \cdot e^{j\psi_{C1}} + U_{mC2} \cdot e^{j\psi_{C2}}$. Результат представить в показательной форме. Модуль $U_{mC\Sigma}$ и аргумент $\psi_{C\Sigma}$ комплексной амплитуды $\dot{U}_{mC\Sigma}$ внести в седьмой и восьмой столбцы табл. 13. Сравнить результаты, полученные по методу наложения (седьмой и восьмой столбцы), и данные первичного эксперимента (первый и второй столбцы). Если погрешность велика, повторить измерения и расчёты.

2. Экспериментальная проверка применимости теоремы об эквивалентном источнике напряжения

Восстановив исходное значение параметра "Voltage" источника напряжения "e(t)", обеспечить одновременную работу обоих источников. Вновь измерить амплитуду U_{mC} и начальную фазу ψ_C напряжения $u_C(t)$ на ёмкости. Внести полученные значения U_{mC} и ψ_C в первый и второй столбцы табл. 14.

Таблица 14

Результаты измерений по теореме об эквивалентном источнике

Прямое измерение		Оценка параметров эквивалентного источника напряжения					Расчёт по теореме		
$U_{mC},$ В	ψ_C, \circ	$U_{mXX},$ В	ψ_{XX}, \circ	$I_{mK3},$ мА	$R_{Э},$ Ом	$R'_{Э},$ Ом	$R_{ЭВ},$ Ом	$U_{mCV},$ В	ψ_{CV}, \circ

Переключатель "Space" перевести в левое положение, отключив тем самым ёмкость от исследуемой цепи. Проверить установки мультиметра ("Multimeter"): для обеспечения холостого хода должен быть выбран режим измерения напряжения ("V") по переменному току ("~") (рис. 16). Запустить моделирование. Измерить по осциллографу амплитуду U_{mXX} и начальную фазу ψ_{XX} напряжения холостого хода между точками подключения ёмкости. Результаты измерений внести в третий и четвёртый столбцы табл. 14.

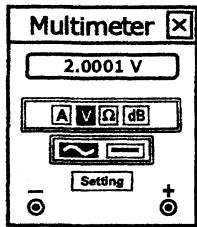


Рис. 16

Перевести мультиметр в режим измерения переменного тока (нажав клавиши "A" и "~", рис. 17): этим гарантируется короткое замыкание точек подключения ёмкости. Измерить мультиметром ток короткого замыкания I_{K3} , протекающий между замкнутыми точками подключения ёмкости. Для ускорения измерения тока выбрать пункт "Analysis Options" в меню "Analysis" и активировать опцию "Generate time steps automatically" закладки "Instruments". Следует помнить, что мультиметр в режиме амперметра отображает действующее значение тока. Умножив на 1.41 измеренное действующее значение тока, получить амплитуду тока I_{mK3} . Результат измерения внести в пятый столбец табл. 14.

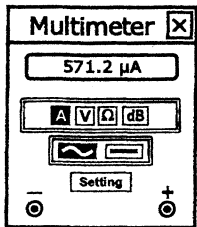


Рис. 17

Отключить оба источника "e(t)" и "i(t)" обнулением параметров "Voltage" и "Current". Перевести мультиметр в режим

измерения сопротивления ("Ω") по постоянному току ("—") и измерить внутреннее сопротивление $R_{Э}$ полученной пассивной цепи. Измерение выполнить при активированной опции "Generate time steps automatically". После измерения опцию следует деактивировать (снять флажок). Результат измерения в Ом внести в шестой столбец табл. 14.

Рассчитать величину сопротивления цепи со стороны точек подключения ёмкости, используя формулу: $R'_{Э} = U_{mXX} / I_{mK3}$, и занести её в седьмой столбец табл. 14. Сравнить $R'_{Э}$ с измеренным значением $R_{Э}$. Найти среднее арифметическое значение сопротивления цепи: $R_{ЭВ} = (R_{Э} + R'_{Э}) / 2$. Результат внести в восьмой столбец табл. 14.

На основе теоремы об эквивалентном источнике напряжения (рис. 18) по измеренным параметрам эквивалентного источника напряжения U_{mXX} , ψ_{XX} и $R_{ЭВ}$ рассчитать комплексную амплитуду напряжения на ёмкости: $\dot{U}_{mCV} = \dot{U}_{mXX} \cdot Z_C / (R_{ЭВ} + Z_C)$, где $Z_C = -j \cdot X_C = X_C \cdot e^{-j90^\circ}$, $X_C = 1 / (2\pi \cdot f \cdot C)$. Результат представить в показательной форме. Модуль U_{mCV} и аргумент ψ_{CV} комплексной амплитуды \dot{U}_{mCV} внести в девятый и десятый столбцы табл. 14 и сравнить их с непосредственно измеренными величинами в первом и втором столбцах. При возникновении больших погрешностей уточнить измерения и проверить расчёты.

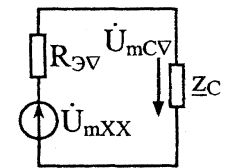


Рис. 18

Контрольные вопросы к защите работы

1. Изложить сущность метода наложения применительно к расчёту тока (напряжения) в сложной цепи. Для каких цепей пригоден метод? Имеются ли ограничения на форму колебаний источников, питающих анализируемую данным методом цепь?
2. Одна из процедур метода наложения и теоремы об эквивалентном источнике заключается в выключении источника. Что означает выключение реального (идеального) источника

напряжения, тока? Ответ пояснить, используя схемы замещения функционирующих и выключенных источников.

3. Сформулировать теорему об эквивалентном источнике напряжения (теорему Тевенина). Изложить методику определения ЭДС эквивалентного источника и его внутреннего сопротивления. Указать ограничения применимости теоремы.

4. Методом наложения (методом на основе теоремы об эквивалентном источнике напряжения) рассчитать электрическую величину, указанную на схеме (рис. 19) стрелкой.

5. На каких принципах и законах теории цепей основаны методы наложения и эквивалентного источника? В каких случаях разумно для расчёта сложной цепи использовать метод наложения, а в каких — метод эквивалентного источника?

6. Сформулировать теорему об эквивалентном источнике тока (теорему Нортона). Изложить методику определения тока эквивалентного источника и его внутреннего сопротивления. Получить теорему об эквивалентном источнике тока на основе теоремы об эквивалентном источнике напряжения.

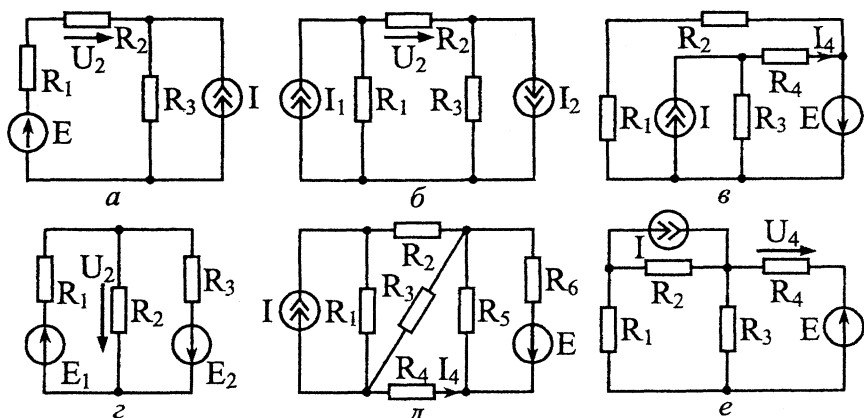


Рис. 19

Литература: [1, с. 47-49; 62-66]; [2, с. 67; 88; 95-97];
[3, с. 249-252; 260-263];
[4, с. 47-48; 57-60]; [5, с. 34-35; 38-41].

Лабораторная работа № 4

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы — получить представление об основных типах частотно-избирательных цепей; приобрести практические навыки измерения и постобработки частотных характеристик линейных цепей.

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_4.ewb". Вид рабочего окна с загруженным файлом показан на рис. 20.

Установить заданные в табл. 15 параметры элементов универсального частотного фильтра — сопротивления R_a , R_b и R_c .

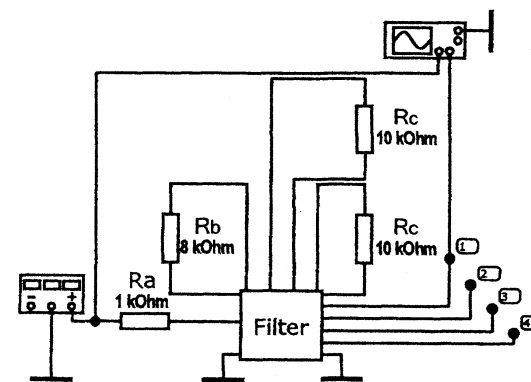


Рис. 20

1. Частотные характеристики ФНЧ и ФВЧ

Подключить правый вход (Channel B) осциллографа к выходу фильтра "1". Открыть панели источника напряжения и осциллографа. Перевести осциллограф в расширенный режим.

Установить частоту напряжения источника, равной 0.1 от частоты f_{\max} (см. табл. 15), а амплитуду — 1 В.

Таблица 15

Индивидуальные исходные данные для выполнения работы №4

№	Параметры элементов			f _{max} в кГц для выхода			№	Параметры элементов			f _{max} в кГц для выхода		
	Ra, кΩ	Rb, кΩ	Rc, кΩ	"1"	"2"	"3"		Ra, кΩ	Rb, кΩ	Rc, кΩ	"1"	"2"	"3"
1	1	8	3	100	100	160	16	4	3	2	80	400	400
2	2	7	4	80	80	100	17	3	4	3	80	200	200
3	3	6	5	60	80	100	18	2	5	4	70	100	150
4	4	5	6	50	80	100	19	1	6	5	60	80	100
5	5	4	7	40	100	100	20	2	6	6	50	60	80
6	6	3	8	25	120	120	21	3	8	7	50	40	80
7	7	4	9	25	80	80	22	4	7	8	40	40	60
8	8	5	10	30	50	60	23	5	6	9	40	40	60
9	9	6	9	40	40	60	24	6	5	10	25	50	60
10	10	7	8	50	50	50	25	7	6	7	50	50	70
11	9	8	7	60	40	60	26	8	3	8	25	100	100
12	8	7	6	60	50	80	27	9	4	7	30	80	100
13	7	6	5	80	80	100	28	10	5	6	50	80	100
14	6	5	4	80	120	140	29	9	3	5	30	150	150
15	5	5	3	100	150	160	30	8	7	4	100	80	100

Выполнить моделирование. На экране синим цветом будет воспроизводиться осциллограмма входного напряжения (Channel A), красным — выходного (Channel B). Измерить в установленном режиме, то есть спустя 3-5 периодов, амплитуду $U_{m\text{вых}}$ и период $T_{п}$ выходного напряжения, а также сдвиг во времени Δt ближайших пиков выходного и входного напряжений. Результаты внести во второй столбец табл. 16. Рассчитать на указанной частоте значения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) — $K_U(f) = U_{m\text{вых}}/U_{m\text{вх}}$ (полагая, что $U_{m\text{вх}} = 1$ В) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) цепи — $\varphi(f) = \pm 360^\circ \cdot \Delta t / T_{п}$. Внести полученные данные в табл. 16.

Таблица 16

Частотные характеристики цепи — выход "1"

f, кГц	0													f _{max}
T _п , мкс	∞													
U _{mвых} , В														
Δt, мкс	0													
K _U (f)														
φ(f), °	0													

Увеличить частоту входного напряжения до $0.2 \cdot f_{\text{max}}$, снова измерить амплитуду $U_{m\text{вых}}$, период $T_{п}$ выходного напряжения и его сдвиг во времени Δt относительно входного, рассчитать значения АЧХ и ФЧХ на этой частоте, данные внести в табл. 16. Последовательно увеличивать частоту входного сигнала с шагом $0.1 \cdot f_{\text{max}}$ и выполнять аналогичные предыдущим измерения. Остановиться на частоте f_{max} . Результаты измерений внести в табл. 16.

Рассчитать значение АЧХ цепи на нулевой частоте как $100/(R_a \cdot R_b)$, где R_a и R_b — данные табл. 15 в кОм. Внести полученное значение в первый столбец табл. 16.

По данным табл. 16 построить графики АЧХ и ФЧХ цепи. Установить и указать в отчёте тип фильтра. На графике АЧХ провести уровень, равный $0.707 \cdot K_{\text{max}}$, где K_{max} — максимальное значение АЧХ. Считая нижней границей полосы пропускания нулевую частоту, верхней границей — частоту, на которой указанный уровень пересекает АЧХ, определить полосу пропускания Πf фильтра и внести её значение в отчёт.

Активировать команду "AC Frequency..." меню "Analysis". Установить в диалоговом окне команды минимальное "Start frequency" = 0.01 Hz и максимальные значения частоты "End frequency" = f_{max} для выхода "2" (табл. 15), масштаб по оси частот ("Sweep type") — Linear, "Number of point" = 1000, масштаб по вертикали ("Vertical scale") — Linear, "Nodes for analysis" = 2 (напряжение снимается с выхода "2"). Нажать кнопку "Simulate".

Нажав кнопку "Toggle Cursors" в окне "Analysis Graphs", активировать визир. Используя визир, снять с шагом $0.1 \cdot f_{\max}$ частотные характеристики цепи (АЧХ и ФЧХ) и внести их значения в табл. 17.

Таблица 17

Частотные характеристики цепи — выход "2"

f , кГц	0												f_{\max}
$K_U(f)$	0												
$\varphi(f)$, °	180												

По данным табл. 17 построить графики АЧХ и ФЧХ. Установить и указать в отчёте тип фильтра. На графике АЧХ провести уровень, равный $0.707 \cdot K_{\max}$, где $K_{\max} = 100/(R_a \cdot R_b)$, R_a и R_b — данные табл. 15 в кОм. Определить нижнюю граничную частоту полосы пропускания как частоту, на которой указанный уровень пересекает АЧХ, и внести её значение в отчёт.

2. Частотные характеристики ПЗФ и ППФ

Вновь активировать команду "AC Frequency..." меню "Analysis". Изменить в диалоговом окне номер ноды, с которой снимается выходное напряжение: "Nodes for analysis" = 3 и максимальное значение частоты "End frequency" = f_{\max} для выхода "3" (табл. 15). Нажать кнопку "Simulate". Выяснить и указать в отчёте тип исследуемого фильтра. Используя визир, снять с шагом $0.1 \cdot f_{\max}$ частотные характеристики цепи (АЧХ и ФЧХ) и внести их значения в табл. 18. Определить частоту f_0 , на которой АЧХ цепи минимальна, и внести её значение в табл. 18.

Таблица 18

Частотные характеристики цепи — выход "3"

f , кГц	0													f_{\max}
$K_U(f)$														
$\varphi(f)$, °	0													

Используя визир, определить граничные частоты полосы заграждения как частоты, на которых АЧХ цепи принимает значение $0.707 \cdot K_{\max}$, где $K_{\max} = 10/R_a$, R_a — сопротивление в кОм из табл. 15. Внести граничные частоты в отчёт, рассчитать полосу заграждения. По данным табл. 18 построить графики АЧХ и ФЧХ. На графике АЧХ провести уровень, равный 0.707 от максимального значения, и указать граничные частоты полосы заграждения. Отметить частоту f_0 максимального подавления.

Вновь активировать команду "AC Frequency..." меню "Analysis". Изменить в диалоговом окне минимальное и максимальное значения частоты "Start frequency" = 100 Hz, "End frequency" = 1 MHz, масштаб по оси частот ("Sweep type") — декадный (Decade), масштаб по вертикали ("Vertical scale") — Decibel, номер ноды, с которой снимается напряжение "Nodes for analysis" = 4. Нажать кнопку "Simulate". Выяснить и указать в отчёте тип фильтра. Используя визир, снять с шагом в полдекады частотные характеристики цепи (АЧХ и ФЧХ) и внести их значения в табл. 19. Определить частоту f_{\max} , на которой АЧХ цепи является максимальной, и внести в табл. 19 её значение и соответствующее значение АЧХ.

Таблица 19

Частотные характеристики цепи — выход "4"

f , кГц	0.1	0.3	1	3										
$K_U(f)$, дБ														
$\varphi(f)$, °														

Используя визир, определить граничные частоты полосы пропускания цепи, как частоты, на которых АЧХ цепи уменьшается на 3 дБ относительно максимального значения. Внести граничные частоты полосы пропускания в отчёт, рассчитать значение полосы пропускания. По данным табл. 19 построить графики АЧХ и ФЧХ. На графике АЧХ указать уровень "минус" 3 дБ от максимального значения. Указать граничные частоты полосы пропускания и частоту f_{\max} максимума АЧХ.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое амплитудно-частотная и фазочастотная характеристика цепи? С какой целью их определяют? Какова методика расчёта и экспериментального измерения этих характеристик? Связаны ли друг с другом АЧХ и ФЧХ цепи?

2. Какую цепь называют фильтром нижних частот? Что такое граничная частота и полоса пропускания ФНЧ. Изобразить схему простейшего ФНЧ и графики его АЧХ и ФЧХ.

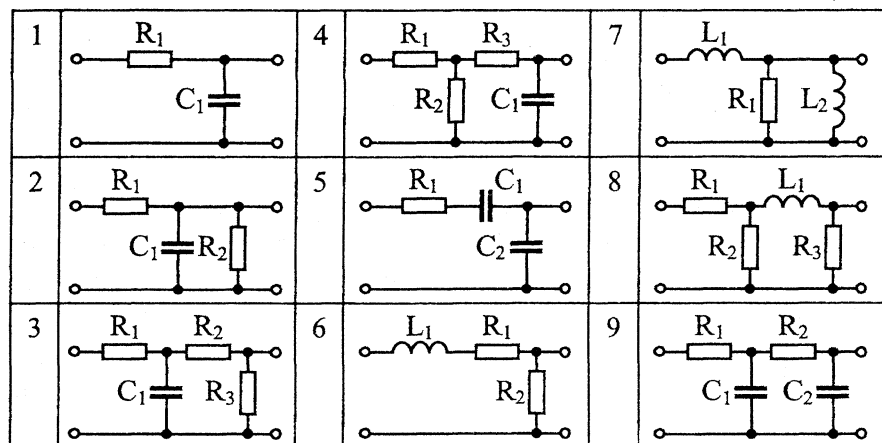
3. Что такое фильтр верхних частот? Как определяются его граничная частота и полоса пропускания (заграждения). Изобразить схему простейшего ФВЧ и графики его АЧХ и ФЧХ.

4. Какую цепь называют полосно-заграждающим фильтром? Что такое граничные частоты и полоса заграждения ПЗФ. Изобразить АЧХ и ФЧХ реального ПЗФ.

5. Что такое полосно-пропускающий фильтр? Как определяются его граничные частоты и полоса пропускания. Изобразить схему простейшего ППФ и графики его АЧХ и ФЧХ.

6. Изобразить качественно АЧХ фильтров, схемы которых приведены в табл. 20. Использовать при этом физическую трактовку и схемы замещения на малых и больших частотах.

Таблица 20



7. Изобразить АЧХ и ФЧХ RC -цепи со съёмом напряжения с ёмкости (сопротивления), указать координаты их характерных точек. Как скажется на частотных характеристиках RC -цепи увеличение сопротивления R ? уменьшение ёмкости C ?

8. Как по ФЧХ установить вид частотно-избирательного фильтра? Если схема ФНЧ (или ФВЧ) содержит один (два) реактивных элемента, то каков сдвиг фаз между выходным и входным напряжениями в этой цепи на граничной частоте полосы пропускания?

9. Что такое логарифмическая АЧХ цепи и чем обусловлена необходимость её использования? Чем отличается логарифмический масштаб оси частот от линейного масштаба? Что откладывают по оси ординат логарифмической АЧХ?

10. Как по логарифмической АЧХ определить граничные частоты полосы пропускания (заграждения) цепи? Чем обосновано применение такого критерия оценки граничных частот?

11. Пусть коэффициент передачи фильтра по напряжению составляет: а) 1; б) 10; в) 100; г) 150. Каков при этом коэффициент передачи по напряжению в децибелах? На сколько дБ изменится коэффициент передачи по напряжению, если его значение изменилось в 2 раза, в 10 раз, в 20 раз, в 50 раз?

12. Известно, что максимальный коэффициент передачи цепи по напряжению составляет: а) 46 дБ; б) 34 дБ; в) 32 дБ. Какова величина коэффициента передачи в размах? Как быстро, не пользуясь калькулятором, получить искомый результат?

Литература: [1, с. 131-135; 143-148; 156-157; 160];
[3, с. 161-175; 450-451];
[4, с. 110-112; 443-445].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Правила округления числовых результатов измерений и расчётов

В радиотехнике приходится иметь дело с электрическими величинами, значения которых получают в результате измерений или расчётов. Измерения выполняют приборами, которые оценивают величину с определённой точностью. Точность результатов, полученных при решении теоретических задач, определяется точностью исходных данных и промежуточных результатов. Таким образом, числовые значения электрических величин являются по большей части приближёнными.

Для того чтобы грамотно представлять конечные числовые результаты, необходимо знать следующие правила.

1) О точности значения электрической величины судят по количеству значащих цифр. Значащими цифрами числа являются все его цифры, начиная с первой слева, отличной от нуля цифры. Нули, стоящие в начале числа, значащими цифрами не являются. Нули в середине и в конце числа являются значащими. Например, число с тремя значащими цифрами может быть таким: 306, 3.06, 0.306.

2) Если числовое значение величины содержит лишние цифры, то её следует округлить, сохраняя, например, три значащие цифры и пользуясь следующими правилами округления:

— если цифра справа от третьей значащей цифры больше пяти, то третью значащую цифру надо увеличить на единицу (например, округляя число 3.066, следует указать 3.07);

— если цифра справа от третьей значащей цифры меньше пяти, то третью значащую цифру надо оставить без изменений (например, округляя число 3.064, следует указать 3.06);

— если цифра справа от третьей значащей цифры равна пяти, то третью значащую цифру надлежит округлить до ближайшей чётной цифры (например, число 30.65 следует округлить до 30.6, а округляя 30.75, надо указать 30.8).

3) Выполняя расчёты с приближёнными числами, следует руководствоваться следующими правилами:

— промежуточные расчёты надлежит выполнять с запасом в одну значащую цифру;

— конечный результат следует округлять до трёх значащих цифр; если первая значащая цифра равна единице или последняя равна пяти, то в результате необходимо сохранить четыре значащие цифры.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Методика настройки и практического применения источника напряжения и осциллографа

В качестве идеального источника напряжения, периодически изменяющегося во времени, может быть использован прибор "Function Generator". Такой источник способен формировать напряжение гармонической, пилообразной и прямоугольной формы. Переход от одной формы колебаний к другой производится нажатием соответствующей кнопки на лицевой панели прибора (рис. П2.1, режим гармонических колебаний).

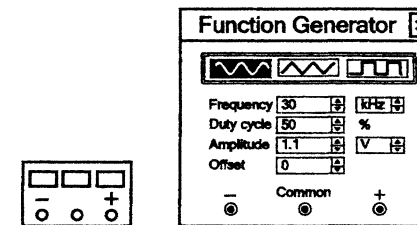


Рис. П2.1

Ниже кнопок управления формой колебаний располагаются позиции для ввода значений параметров сигнала. Позиция "Frequency" определяет циклическую частоту колебаний в Гц, кГц или МГц. В позиции "Duty cycle" задаётся процент заполнения периода, принимающий значения от 1 до 99 %. Для последовательности прямоугольных импульсов процент за-

полнения определяется отношением к периоду длительности импульса положительной полярности, для пилообразного сигнала — нарастающей части импульса.

В позиции "Amplitude" устанавливается амплитуда колебаний (μV , mV , V , kV). Уровень постоянной составляющей сигнала определяется величиной, указываемой в позиции "Offset" (в единицах измерения амплитуды).

На поле схем выводится упрощённое изображение панели источника (рис. П2.1). Подключение прибора ко входу цепи производится с помощью трёх клемм — двух сигнальных ("—" и "+") и одной общей (Common). При заземлении Common на клеммах "—" и "+" наблюдаются противофазные сигналы.

Осциллограф "Oscilloscope" в используемом симуляторе представляет собой виртуальный аналог двухлучевого запоминающего осциллографа и имеет две модификации — простую и расширенную. Расширенная модель занимает много места на рабочем поле, поэтому рекомендуется начинать исследования с помощью простой модели, а для качественного исследования процессов, сопровождаемого измерениями параметров наблюдаемых колебаний, использовать расширенную модификацию.

На поле схем выводится уменьшенное изображение осциллографа (рис. П2.2). На нём имеется четыре клеммы: верхняя — общая ("земля"), чуть ниже — вход синхронизации. Нижние клеммы есть входы каналов "A" и "B" ("Channel A", "Channel B"). Двойной щелчок мыши по изображению осциллографа позволяет раскрыть панель простой модификации с кнопками управления и информационным экраном (рис. П2.2).

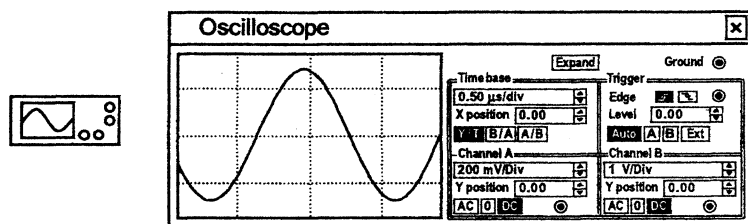


Рис. П2.2

Для проведения измерений осциллограф следует настроить: задать режим и длительность развёртки, установить требуемую чувствительность по каналам, установить режим работы по входу (закрытый или открытый), режим синхронизации (внутренний или внешний). Настройка осциллографа производится при помощи кнопок управления, которые сгруппированы в четыре поля. Имеются поля управления масштабом времени, синхронизацией (запуском), а также каналами "A" и "B".

Поле управления развёрткой служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении на входах каналов "A" и "B" временных зависимостей напряжений. Временной масштаб "Time base" (длительность развёртки) задается в секундах на деление (s/Div) или кратных единицах (ms/Div , $\mu\text{s/Div}$, ns/Div) и может быть изменён дискретно щелчком мыши. Имеется также возможность смещать по горизонтали начало осциллограммы с помощью миникнопок в строке "X position". В этом же поле расположены кнопки "Y/T", "B/A", "A/B". Они позволяют задавать режим развёртки, определяющий вид зависимости сигналов, отображаемых на экране. В режиме "Y/T" вертикальная ось соответствует напряжению, горизонтальная — времени. При нажатии на кнопку "B/A" по вертикали откладывается напряжение на входе канала "B", по горизонтали — канала "A", при нажатии на кнопку "A/B" — наоборот. Масштаб осей определяется установками соответствующих каналов. В режимах "A/B" и "B/A" можно регистрировать частотные и фазовые сдвиги (по фигурам Лиссажу), наблюдать петли гистерезиса, вольтамперные характеристики.

Два нижних поля лицевой панели позволяют управлять отображением по вертикали сигналов на входах "A" и "B" соответственно. Верхняя позиция поля предназначена для регулировки чувствительности канала (масштаба оси отображаемого напряжения). Цена деления может дискретно устанавливаться от 10 мкВ/дел ($\mu\text{V/Div}$) до 5 кВ/дел (kV/Div) для каждого канала отдельно. Чтобы разнести осциллограммы относительно друг друга по оси Y используют кнопки строки "Y position".

Нижние кнопки реализуют различные режимы работы осциллографа по входу. Режим работы с закрытым входом устанавливается нажатием на кнопку "AC" (на вход не пропускается постоянная составляющая сигнала). При нажатии на кнопку "DC" осциллограф переходит в режим с открытым входом (на вход пропускается и постоянная и переменная составляющие). При нажатии на кнопку "0" вход замыкается на "землю".

В ждущем режиме правое поле управления "Trigger" определяет момент начала отображения кривой сигнала на экране. Кнопки в строке "Edge" задают момент запуска развертки: по фронту или по срезу импульса на входе синхронизации, позиция "Level" — уровень, при превышении которого происходит запуск развертки. Осциллограф имеет четыре режима синхронизации. В режиме "Auto" запуск развертки производится автоматически при наличии напряжения на входе хотя бы одного канала. Когда "луч" доходит до периферии экрана, осциллограмма снова прорисовывается с начала экрана. Во втором и третьем режимах — запуск по входу "A" или "B" — управляющим является напряжение на указанном входе. В случае синхронизации от внешнего источника запуск развертки осуществляется сигналом, подаваемым на вход "Ext".

Клавиша "Expand" на лицевой панели позволяет открыть окно расширенной модификации осциллографа. Поля управления в этом случае расположены под экраном и дополнены тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений (рис. П2.3). Под экраном находится полоса прокрутки для возврата к любому временному промежутку.

На экране осциллографа расположены два визира, обозначенные 1 и 2. С их помощью можно измерить мгновенные значения напряжений в любой точке осциллограммы. Для этого достаточно перетащить мышью визир за треугольник в его верхней части в требуемое положение. Координаты точек пересечения визира 1 с осциллограммами отображаются на левом табло, визира 2 — на среднем. На правое табло выводятся разностные значения координат визиров.

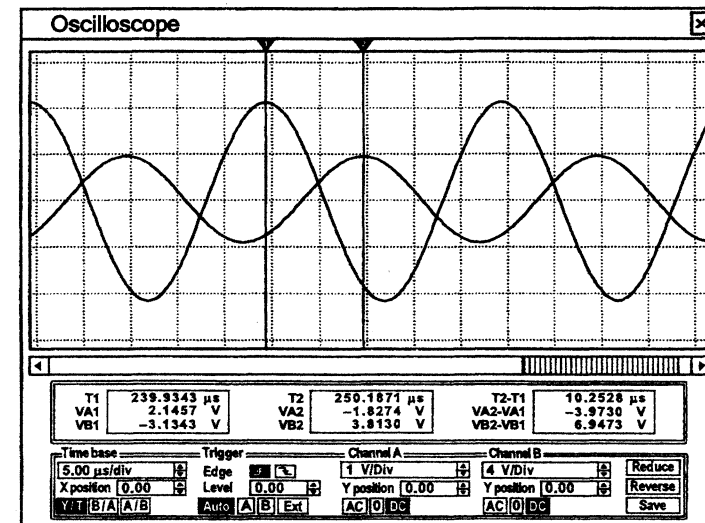


Рис. П2.3

Результаты измерений, полученные при помощи расширенной модификации осциллографа, можно записать в файл. Для этого следует нажать кнопку "Save" на панели и в диалоговом окне ввести имя файла с расширением "scp". Созданный симулятором файл (в ASCII-кодах) содержит текстовый комментарий и числовые данные в трёх столбцах: в первом — текущее время в секундах, во втором и третьем — мгновенные значения напряжений в вольтах на входе каналов "A" и "B".

Чтобы вернуться к простой модификации осциллографа, следует нажать кнопку "Reduce" в нижнем углу панели.

В процессе имитации нередко возникает необходимость замедлить процесс моделирования для удобства визуального восприятия информации на экране осциллографа. Это разумно, например, при исследовании быстро затухающих процессов. Замедление имитации достигается путём увеличения количества отображаемых точек за период наблюдения. Для этого следует выбрать пункт "Analysis Options" в меню "Analysis" и установить в строке "Minimum number of time points" закладки "Instruments" значение в пределах от 5000 до 15000 точек.

Предварительно следует деактивировать опцию "Generate time steps automatically". Облегчить анализ осциллограмм поможет включение режима "Pause after each screen" (на той же закладке). В этом режиме моделирование приостанавливается после того, как луч осциллографа проходит весь экран. Чтобы продолжить моделирование следует нажать кнопку "Resume" в правом верхнем углу окна симулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков, Ю.Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях [Текст]: учеб. пособие / Ю.Н. Новиков. — СПб.: Лань, 2011. — 368 с.
2. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей [Текст]: учеб. / Г.И. Атабеков. — 3-е изд., стереотип. — СПб.: Лань, 2009. — 432 с.
3. Попов, В.П. Основы теории цепей [Текст]: учеб. пособие / В.П. Попов. — М.: Высш. шк., 2003. — 575 с.
4. Бакалов, В.П. Основы теории цепей: учеб. для вузов / В.П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.И. Крук; под ред. В.П. Бакалова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Горячая линия – Телеком, 2007. — 597 с.
5. Основы теории цепей. Версия 1 [Электронный ресурс]: конспект лекций / В.И. Вепринцев, Г.К. Былкова, В.В. Тюрнев и др. — Электрон. дан. — Красноярск: ИПК СФУ, 2008. — Режим доступа: World Wide Web. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/56/u_lectures.pdf.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	1
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ	2
Лабораторная работа № 1. Элементы и законы электрических цепей	3

Лабораторная работа № 2. Гармонические колебания в пассивных элементах цепи и их соединении	10
Лабораторная работа № 3. Принцип наложения и теорема об эквивалентном источнике	20
Лабораторная работа № 4. Частотные характеристики линейных цепей	27
Приложение 1. Правила округления числовых результатов измерений и расчётов	34
Приложение 2. Методика настройки и практического применения источника напряжения и осциллографа	35
Библиографический список	40

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 1 - 4
по дисциплине "Основы теории цепей"
для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" очной формы обучения

Составитель **Останков Александр Витальевич**

Подписано в печать 21.03.2018.
Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л. 2,7. Тираж 50 экз. «С» 5.
Зак. № **39**

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский проспект, 14