А.В. Останков

АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие



Воронеж 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"

А.В. Останков

АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Утверждено учебно-методическим советом университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 621.372.01: 621.396.6 ББК 32.841я73 076

Рецензенты:

кафедра основ радиотехники и электроники Воронежского института ФСИН России (нач. кафедры канд. техн. наук, доцент Р.Н. Андреев); д-р физ.-мат. наук, профессор Н.Д. Бирюк

Останков, А.В.

Анализ установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях: Лабораторный практикум: учеб. пособие / А.В. Останков. – Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2018. – 88 с.

ISBN

Изложено описание и методические рекомендации по выполнению лабораторных работ, входящих в практикум по дисциплине "Основы теории цепей". Тематика работ охватывает основные разделы теории цепей и отражает наиболее актуальные задачи анализа установившихся гармонических и переходных негармонических процессов в линейных электрических цепях. Лабораторные работы ориентированы на выполнение методом имитационного моделирования на компьютере.

Издание соответствует требованиям ФГОС ВО по специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы", дисциплине "Основы теории цепей" и предназначено для студентов второго курса.

Табл. 43. Ил. 33. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.372.01: 621.396.6 ББК 32.841я73

ISBN

© Останков А.В., 2018 © ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет", 2018

введение

Пособие содержат описание девяти работ лабораторного практикума по дисциплине "Основы теории цепей", выполняемых в III-м и IV-м семестрах 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 A4 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 минизадач, связанных с тематикой проведённых исследований. По отдельным темам предусмотрена защита лабораторных работ по результатам индивидуального компьютерного тестирования. Зачёт по проделанной работе должен быть получен 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, втроём 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 Е = № В, внутреннее сопротивление Ri = 100 № Ом. Для установки параметра элемента рассматриваемой цепи следует выделить указателем мыши нужный элемент цепи и дважды щёлкнуть по изображению элемента левой кнопкой мыши.





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 Rn путём двойного щелчка левой кнопкой мыши по изображению Rn и активации в закладке "Fault" опции "Short". Кнопкой "[]]]" в углу окна запустить моделирование и измерить амперметром ток короткого замыкания источника I_{K3}. 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_{K3} 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 ¹/₄Ri. 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 ²/₃Ri, затем до 1.5·Ri, и, наконец, до 4·Ri, 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, B	0			Uxx
I, мА	Ікз			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: $\check{R}_i = U_{XX}/I_{K3}$. Рассчитать относительную погрешность его оценки: $\delta R = 100\% |\check{R}_i - R_i|/R_i$ ($R_i = 100.\%$ Ом).

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

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

Реализовать короткое замыкание сопротивления нагрузки Rn. Запустить моделирование. Измерить ток короткого замыкания источника тока Ікз и сравнить с Ікз источника напряжения.





7

Установить бесконечно большое сопротивление нагрузки Rn. Измерить напряжение холостого хода U_{XX} 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



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,

 $R_2 = 500 \text{ Om}, R_3 = 3000 \cdot (N_2 + 3)/(3N_2 - 1) \text{ Om}$ и $R_4 = 300 \cdot (N_2 + 3) \text{ Om}.$

Нажатием клавиши "Е" переключатель перевести в правое положение, обеспечивающее подключение к цепи источника напряжения Е. 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.



							Т	аблиц	a 3
Напряже	ния на	а элем	ентах	и токі	и в вет	вях исс	ледуем	юй це	пи
-			** *						

Величина	U,B	U_1, B	U2, B	U3, B	I ₁ ,мА	I ₂ ,мА	І3,мА	Rэ,	Ом
Измерения									
Расчёт									

Используя закон Ома, вычислить эквивалентное сопротивление цепи: $R_{\Im} = U/I_1$. Перевести переключатель "Е" в левое положение, и, запустив моделирование, измерить эквивалентное сопротивление цепи R_{\Im} с помощью омметра ("Multimeter"). Оба полученных значения R_{\Im} внести в последний столбец строки "Измерения" табл. 3. Сделать вывод.

Вновь перевести переключатель "Е" 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. З. Проверить, выполняется ли первый закон Кирхгофа для узла ① (рис. 5), то есть насколько верно равенство I₁ = I₂ + I₃. Результаты указать на рис. 7,*a*, внеся его в отчёт. Проверить, выполняется ли второй закон Кирхгофа для контура **I** (рис. 5), то есть насколько верно равенство E = U₁ + U₂+U₃. Результаты указать на рис. 7,*б*, также внеся его в отчёт.



Выполнить расчёт всех токов в ветвях и напряжений на элементах цепи. Расчёт начать с нахождения тока, потребляемого цепью от источника: $I_1 = E/R_3$. Эквивалентное сопротивление R_3 цепи, представляющей собой последовательное соединение R_1 , R_2 и R_{34} , определяется как $R_3 = R_1 + R_2 + R_{34}$. 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 ($E \rightarrow I, I \rightarrow E$).



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 R₁ и R₂.

15. Сформулировать правило деления тока в простейшем делителе тока — параллельном соединении двух сопротивлений R₁ и R₂.

Литература:	[1, c. 12-13; 18-20; 33-37; 38-45];
	[2, c. 9-12; 19-21; 23-25; 26-27];
	[3, c. 8-12; 16-18; 28-34; 36-39; 42-45];
	[4, c. 10-14; 18-19; 24-25; 28-32];
	[5, c. 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 осцилло-графа. Используя материал прил. 2, ознакомиться с методикой настройки и практического применения используемого источника напряжения и осциллографа.



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. Учесть, 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						Па	рамет	ры	
No	источника		элементов			No	источ	ника	ЭЛ	емент	ов					
51-	E _m ,	f,	R,	L,	С,		E _m ,	f,	R,	L,	С,					
	В	кГц	кОм	мГн	нΦ		В	кГц	кОм	мГн	нΦ					
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

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

По заданной частоте колебаний источника f рассчитать период T_{II} = 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 цег	пи
--	----

R, Ом	х _L , Ом	х _с , Ом	z, Ом	z _{ИЗМ} , Ом	δ _{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) "Generate time steps automatically" заклалки опцию "Instruments". Запустив моделирование, измерить ток. Следует помнить, что амперметр меряет действующее значение Ід. Чтобы получить амплитуду тока I_m, его действующее значение Iд надо умножить на $\sqrt{2}$ ≈1.414. Сразу же после измерения опцию "Generate time steps automatically" следует дезактивировать, сняв флажок. Измеренные параметры тока округлить до трёх значащих цифр и внести в табл. 7.

Таблица 7 Амплитуды тока и напряжений на элементах RLC-цепи

Ід, мА	I _m , мА	U _{mR} , B	U _{mL} , B	U _{mC} , B	U _m ,B	U _{m∑} ,B	$\delta_{U\%}$,%

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 VDiv + 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 RLCцепи 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: $z_{\rm И3M} = U_m/I_m$. Полученное значение сопротивления $z_{\rm И3M}$ сравнить с расчётным значением z из табл. 6. Определить погрешность оценки полного сопротивления цепи по формуле: $\delta_{Z\%} = 100\% \cdot |z_{\rm И3M} - z|/z$. Если погрешность больше 10 %, уточнить измерения и расчёты. Внести полученное значение сопротивления $z_{\rm И3M}$ 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.



Таблина 8

Фазовые соотношения между напряжениями RLC-цепи

$\Delta t_{\rm R}$, мкс	φ _R ,°	Δt_L , мкс	φ _L ,°	$\Delta t_{\rm C}$, 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: $\varphi = \psi_U - \psi_i$.

Таблица 9

Начальные фазы гармонических колебаний в RLC-цепи

ψ _U ,°	$\psi_{i},^{\circ}$	ψ _R ,°	ψ _L ,°	ψ _C ,°
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:

a) 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 ампли-

туда 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: $\underline{z}_R = R = R \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$ Ом, $\underline{z}_L = j \cdot x_L = x_L \cdot e^{j \cdot 90^\circ}$ Ом, $\underline{z}_C = -j \cdot x_C = x_C \cdot e^{-j \cdot 90^\circ}$ Ом, а затем рассчи-



тать эквивалентное комплексное сопротивление RLC-цепи: $\underline{z}_{\ni} = \underline{z}_R + \underline{z}_L + \underline{z}_C$. На основе закона Ома в комплексной форме определить комплексную амплитуду тока в цепи: $\dot{I}_m = \dot{E}_m / \underline{z}_{\ni}$, а затем комплексные амплитуды напряжений на всех элементах цепи: $\dot{U}_{mR} = \dot{I}_m \cdot \underline{z}_R$, $\dot{U}_{mL} = \dot{I}_m \cdot \underline{z}_L$, $\dot{U}_{mC} = \dot{I}_m \cdot \underline{z}_C$. 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 ,мА	$\psi_i,^{\circ}$	U _{mR} ,B	$\psi_R,^{\circ}$	U_{mL} ,B	$\psi_L,^{\circ}$	U _{mC} ,B	ψ _C ,°
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 сопротивления 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



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].

Лабораторная работа №3

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).



Установить в соответствии с табл. 12 параметры пассивных элементов цепи: R₁, R₂, R₃, C (рис. 15).



ИСХОЛНЫЕ ЛАННЫЕ ЛЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ DAOOTЫ ЛУ Э	Исхолные	ланные	лля	выполнения	работы	No ?	;
--	----------	--------	-----	------------	--------	------	---

Таблина 12

		Пара	Параметры пассивных									
NG.	Fre-	напряже	ния e(t)	Т	ока i(t)		элементов цепи					
JNO	quency,	Voltage,	R _e ,	Current,	Phase,	R _i ,	R ₁ ,	R ₂ ,	R ₃ ,	C,		
	kHz	V	kΩ	mA	deg	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	nF		
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). Обратить внимание на то, что на экране осциллографа помимо $u_{\rm C}(t)$ 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

И	Измерения в режиме, при котором										
оба ист вклю	очника чены	источні выкл	ик "i(t)" ючен	источник "e(t)" выключен		по ме [,] налож	тоду ения				
U _{mC} , B	ψ _C ,°	U _{mC1} ,B	ψ _{C1} ,°	U_{mC2} , B ψ_{C2} , °		$U_{mC\Sigma}, B$	ψ _{CΣ} ,°				

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

Пря измер	мое рение	Оцен	ка пар источ	аметро ника н	ов экви напряж	ивалент кения	гного	Рас по те	чёт ореме
U _{mC} , B	ψ _C ,°	U _{mXX} , B	ψ _{XX} ,°	I _{mK3} , мА	R _Э , Ом	R′∋, Ом	R _{Э⊽} , Ом	U _{mC⊽} , B	ψ _{C⊽} ,°

Переключатель "Space" перевести в левое положение, отключив тем самым ёмкость от исследуемой цепи. Проверить установки мультиметра ("Multimeter"): для обеспечения холо-



стого 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 "А" и "~", рис. 17): этим гарантируется



иши "А" и "~", рис. 17): этим гарантируется короткое замыкание точек подключения ёмкости. Измерить мультиметром ток короткого замыкания I_{к3}, протекающий между закороченными точками подключения ёмкости. Для ускорения измерения тока выбрать пункт "Analysis Options" в меню "Analysis" и активировать опцию "Generate time steps automatically" закладки "Instruments". Сле-

дует 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.

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_{\Im} полученной пассивной цепи. Измерение выполнить при активированной опции "Generate time steps automatically". После измерения опцию следует дезактивировать (снять флажок). Результат измерения в Омах внести в шестой столбец табл. 14.

Рассчитать величину сопротивления цепи со стороны точек подключения ёмкости, используя формулу: $R'_{\ni} = U_{mXX}/I_{mK3}$, и занести её в седьмой столбец табл. 14. Сравнить R'_{\ni} с измеренным значением R_{\ni} . Найти среднее арифметическое значение сопротивления цепи: $R_{\ni \nabla} = (R_{\ni} + R'_{\ni})/2$. 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 $R_{3\nabla}$ рассчитать комплексную амплитуду напряжения на ёмкости: $\dot{U}_{mC\nabla} = \dot{U}_{mXX} \cdot \underline{z}_C / (R_{3\nabla} + \underline{z}_C)$, где $\underline{z}_C = -j \cdot x_C = x_C \cdot e^{-j90^\circ}$, $x_C = 1/(2\pi \cdot f \cdot C)$. Результат представить в показательной форме. Модуль $U_{mC\nabla}$ и аргумент $\psi_{C\nabla}$ комплексной амплитуды $\dot{U}_{mC\nabla}$ внести в девятый и десятый столбцы табл. 14 и сравнить

тый 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.



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 Тевен*и*на). 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.



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 Ra, Rb и Rc.



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

Ma	Пар эле	амет смент	гры гов	f _{ma} для	_{ах} В К I ВЫХ	Гц ода	Ma	Пар эле	рамет емент	гры гов	f _{max} в кГц для выхода		
JNG	Ra, kΩ	Rb, kΩ	Rc, kΩ	"1"	"2"	"3"	JNO	Ra, kΩ	Rb, kΩ	Rc, kΩ	"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

Индивидуальные исходные данные для выполнения работы №4

Выполнить моделирование. На экране синим цветом будет воспроизводиться осциллограмма входного напряжения (Channel A), красным — выходного (Channel B). Измерить в установившемся режиме, то есть спустя 3 - 5 периодов, амплитуду U_{mвых} 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 (AHX) — K_U(f) = U_{mвых}/U_{mвх} (полагая, что U_{mвх} = 1 B) и фазочастотной характеристики (ФЧХ) цепи — $\phi(f) = \pm 360^{\circ} \cdot \Delta t/T_{\Pi}$. Внести полученные данные в табл. 16. Частотные характеристики цепи — выход "1"

Таблица 16

f, кГц	0									$f_{max} \\$
Тп, мкс	8									
U _{mBbix} , B										
Δt , мкс	0									
Ku(f)										
φ(f), °	0									

Увеличить частоту входного напряжения до $0.2 \cdot f_{max}$, снова измерить амплитуду U_{mBbIX} , период T_{Π} 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 $0.1 \cdot f_{max}$ 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/(Ra·Rb), где Ra и Rb — 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 · K_{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 Пf 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 максимальное 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 визиры. Используя визир, снять с шагом $0.1 \cdot f_{max}$ частотные характеристики цепи (АЧХ и ФЧХ) и внести их значения в табл. 17.

									Т	абли	ца 17
	Част	отны	ie xap	актер	оисти	ки це	епи —	– вых	юд "2	"	
f, кГц	0										\mathbf{f}_{max}
K _U (f)	0										
φ(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 $K_{max} = 100/(Ra \cdot Rb)$, Ra и Rb — 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 · 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.

Γ	аблица	18	
-	worninger	- · ·	

	Частотные характеристики цепи — выход "3"											
f, кГц	0											\mathbf{f}_{max}
K _U (f)												
φ(f), °	0											

Используя визир, определить граничные частоты полосы заграждения как частоты, на которых АЧХ цепи принимает значение $0.707 \cdot K_{max}$, где $K_{max} = 10/Ra$, Ra — 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") подекадный (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 fmax, 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						
Ku(f), дБ										
φ(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 fmax 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: *a*) 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 разах? 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].

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Цель работы — исследовать явление резонанса и частотные характеристики последовательного колебательного контура; выявить влияние сопротивления потерь и нагрузки на избирательные свойства контура.

Задания и указания по их выполнению

Изобразить в отчёте схему исследуемой цепи (рис. 21).

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_5.ewb". Сравнить его наполнение со схемой на рис. 21. Уяснить назначение подключенных к колебательному контуру приборов.

По номеру варианта ($\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$) рассчитать параметры элементов L и C контура: L = 640·($\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$ +15)/(40– $\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$) в мкГн (округлить до единиц мкГн); C = 1600/[($\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$ +15)·(40– $\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$)] в нФ (округлить до сотых долей нФ). Установить расчётные значения L и C.

Сопротивление потерь контура R = 10 Ом оставить без изменения. Рассчитать величину сопротивления нагрузки (шунта): $R_S = 0.2 \cdot (N_{\rm P} + 15)^2$ в кОм (округлить до единиц кОм). Установить расчётное значение R_S . Указать в отчёте параметры элементов.

Рассчитать резонансную частоту контура f_0 , определяющую центральную частоту его АЧХ, а также полосу пропускания Π_f и добротность контура Q по формулам из табл. 21. Результаты расчёта f_0 (в кГц), Π_f (в кГц) и Q округлить до десятых долей и внести в табл. 21.



Расчётные значения параметров колебательного контура

Резонансная частота	Полоса пропускания	Добротность
$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \dots$	$\Pi_{\rm f} = \frac{\rm R}{2\pi\cdot \rm L} = \dots$	$Q = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = \dots$

Рассчитать и внести в первую строку табл. 22 значения частоты, соответствующие $(f_0 - k \cdot \Pi_f)$, где k принимает значения 2, $3/_2$, 1, $1/_2$, $1/_4$, 0, а затем $(f_0 + k \cdot \Pi_f)$, где $k = 1/_4$, $1/_2$, 1, $3/_2$, 2.

1. Исследование явления резонанса и частотных характеристик контура

Подать в контур гармоническое колебание с частотой, равной расчётному значению резонансной частоты f_0 , и амплитудой 1 В. Для этого установить параметр "Frequency" источника, запитывающего контур, равным f_0 , "Amplitude" = 1 V, тип колебаний — гармонический.

Активировать команду "AC Frequency..." меню "Analysis". Установить в диалоговом окне команды минимальное и максимальное значения частоты "Start frequency" = $(f_0 - 2\Pi_f)$, "End frequency" = $(f_0 + 2\Pi_f)$; масштаб по оси частот ("Sweep type") линейный (Linear); "Number of point" = 2000; масштаб по вертикали ("Vertical scale") — линейный; "Nodes for analysis" = 3 (напряжение снимается с ёмкости). Нажать кнопку "Simulate".

Используя визиры, снять АЧХ и ФЧХ контура на частотах, указанных в первой строке табл. 22. Полученные данные внести в табл. 22, причём все значения ФЧХ увеличить на 90°. По данным табл. 22 построить графики АЧХ и ФЧХ.

Таблица 22

Частотные характеристики колебательного контура

f, кГц						
Ku(f)						
φ(f), °						

Таблица 21

Используя визир, определить по частотным характеристикам экспериментальное значение резонансной частоты контура. Внести измеренное значение в табл. 23 и сравнить с расчётным значением резонансной частоты.

Используя визир, измерить значение АЧХ на резонансной частоте. Так как при единичной амплитуде напряжения источника питания измеренное значение в теории должно совпадать с добротностью контура, считать измеренное значение экспериментальной добротностью контура. Внести её значение в табл. 23 и сравнить с расчётной добротностью.

Используя визиры, измерить полосу пропускания контура по уровню 0.707 от максимального значения АЧХ. Внести её значение в табл. 23, сравнить с расчётным значением и указать стрелкой "влево - вправо" на графике АЧХ.

Таблица 23

Сравнение расчётных и измеренных значений параметров

Способ	Параметры колебательного контура:						
получения	f ₀ , кГц	$\Pi_{\rm f}$, кГц	Q				
расчёт							
измерение							

2. Исследование влияния сопротивления потерь на характеристики контура

Увеличить величину сопротивления R до 15 Ом.

Снять на тех же частотах АЧХ и ФЧХ контура. Данные внести в таблицу, аналогичную табл. 22. Построить графики АЧХ и ФЧХ контура с увеличенным сопротивлением потерь в одной системе координат с АЧХ и ФЧХ, полученными для исходного значения R. С помощью визиров определить по АЧХ резонансную частоту, добротность и полосу пропускания контура. Указать стрелкой полосу пропускания на графике АЧХ.

Результаты внести в табл. 24 и сравнить с предыдущими. Сделать вывод о влиянии сопротивления потерь на характеристики контура. Таблица 24 Параметры контура при увеличении потерь и наличии шунта

Условия	Параметры колебательного контура:							
получения	f ₀ , кГц	f ₀ , кГц	f ₀ , кГц					
R=15Ом								
R _S =_кОм								
R _S =_кОм								

3. Исследование влияния шунтирующего сопротивления на характеристики контура

Установить исходную величину сопротивления потерь колебательного контура R = 10 Ом.

Ключ "Т" (путём нажатия клавиши "Т") замкнуть и, тем самым, подключить шунтирующее сопротивление R_S установленной величины, имитирующее сопротивление нагрузки.

Получить и снять АЧХ контура. Данные внести в таблицу, аналогичную табл. 22. Построить в одной системе координат графики АЧХ контура без шунта и с шунтом. С помощью визиров определить по АЧХ резонансную частоту, добротность и полосу пропускания нагруженного контура. Результаты внести в табл. 24 и сравнить с данными, полученными в п. 1.

Установить величину шунтирующего сопротивления равной $R_s = 0.1 \cdot (N_2 + 15)$ в кОм.

Установить в окне команды "AC Frequency..." "Start frequency" = $[f_0 - (\frac{1}{2}N_2 + 6) \cdot \Pi_f]$, "End frequency" = $[f_0 + (\frac{1}{2}N_2 + 6) \cdot \Pi_f]$. Получить AЧX контура. По AЧX определить с помощью визиров резонансную частоту (будет заметно отличаться от исходной частоты!), добротность и полосу пропускания контура. Результаты внести в табл. 24 и сравнить с предыдущими данными, полученными при отсутствии шунта и исходном значении сопротивления шунта.

Сделать вывод о влиянии шунтирующего сопротивления (сопротивления нагрузки) на характеристики контура.

Контрольные вопросы к защите работы

1. В каком случае колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора, является последовательным (параллельным)? Чем определяется частота и амплитуда вынужденных колебаний в колебательном контуре?

2. Что такое резонанс? Какой тип резонанса (напряжений? тока?) имеет место в последовательном контуре? Каковы условия и последствия резонанса в последовательном контуре?

3. Какого типа резонанс (напряжения? токов?) имеет место в параллельном контуре? В чем заключается внешнее проявление резонанса в параллельном контуре?

4. Каков характер и величина сопротивления последовательного контура при резонансе? Нарисовать схему замещения контура на резонансной частоте. Указать, как определяется резонансная частота контура.

5. Каковы характер и величина сопротивления параллельного контура при резонансе? Во сколько раз его величина отличается от сопротивления последовательного контура с аналогичными элементами при резонансе?

6. Для последовательного контура изобразить частотные зависимости тока, напряжения на ёмкости и индуктивности, полного сопротивления контура, сдвига фаз между напряжением и током. Объяснить их поведение.

7. Что такое добротность колебательного контура? Как она связана с характеристическим сопротивлением контура, его ёмкостью и индуктивностью, сопротивлением потерь? Каковы значения добротности реальных контуров в радиотехнике?

8. Что такое полоса пропускания контура? Как она зависит от добротности? параметров R,L,C контура? Как её определить экспериментально?

9. Как на практике осуществляется перестройка контура по частоте без изменения его полосы пропускания? Изменяются ли при этом добротность и резонансное сопротивление последовательного (параллельного) контура? 10. Изложить экспериментальные способы определения добротности последовательного колебательного контура?

11. Как влияет на характеристики контура внутреннее сопротивление источника? Имеет ли смысл запитывать последовательный (параллельный) контур от источника с большим (малым) внутренним сопротивлением? Если нет, почему?

12. Как влияет на вид частотных характеристик последовательного контура, например, зависимости от частоты коэффициента передачи по напряжению, величина сопротивления нагрузки (шунта), подключенной к ёмкости?

13. Предложить и обосновать практические способы снижения влияния шунта (нагрузки) на характеристики последовательного контура.

14. Записать обобщённое уравнение резонансной кривой контура. Чем определяется необходимость его использования? Что такое обобщённая расстройка контура? Чему она равна на границах полосы пропускания контура?

15. Решить задачу. Полоса пропускания последовательного контура составляет 10 кГц, характеристическое сопротивление — 2 кОм. Какой величины сопротивление нагрузки необходимо выбрать, чтобы получить полосу пропускания 15 кГц при резонансной частоте 100 кГц?

16. Решить задачу. Какова ёмкость контура (в пФ), если контур, будучи настроенным на частоту 300 МГц, имеет характеристическое сопротивление 530 Ом?

17. Решить задачу. Определить амплитуду ЭДС источника, запитывающего последовательный контур с характеристическим сопротивлением 100 Ом, сопротивлением потерь 1 Ом. Амплитуда напряжения на ёмкости при резонансе равна 5 В.

Литература: [1, с. 172-183; 190-200]; [2, с. 122-138]; [3, с. 175-210]; [4, с. 113-128]; [5, с. 69-98].

Лабораторная работа № 6

СВОБОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ

Цель работы — исследовать свободные процессы в цепях первого и второго порядков; выявить зависимость числовых характеристик процессов от величины параметров элементов.

Задания и указания по их выполнению

Внести в отчёт схему установки (рис. 22), содержащую:

а) RC-цепь, состоящую из ёмкости С и сопротивления R₁;

б) колебательный контур или RLC-цепь, содержащую ёмкость С, индуктивность L и сопротивление R₂;

в) электронный коммутатор (ЭК) для периодического заряда ёмкости С; обеспечивает кратковременное подключение к ёмкости мощного источника постоянного напряжения с ЭДС E = 10 B; процесс повторяется с периодом в 1.3 мс;

г) ключ (Т) для изменения конфигурации цепи: в нижнем положении к ёмкости подключено сопротивление R₁, в верхнем положении — индуктивность L и сопротивление R₂.

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_6.ewb". Если при загрузке файла появится меню с предложением указать вариант модели, следует выбрать второй — "Use circuit model" (использовать модель с изменёнными значениями параметров).

Ознакомиться с виртуальной лабораторной установкой. Уяснить назначение приборов, подключенных к цепи.



По номеру варианта (\mathbb{N}_{2}) рассчитать параметры реактивных элементов С и L схемы: С=2· \mathbb{N}_{2} в нФ, L=4/₅· \mathbb{N}_{2} в мГн.

Установить расчётные значения элементов С и L, параметры сопротивлений — $R_1 = 10 \text{ кOm}$ и $R_2 = 80 \text{ Om}$ — оставить без изменения. Указать в отчёте параметры всех элементов.

Клавишей "Пробел" ("Space") установить ключ в нижнее положение.

1. Исследование свободных процессов в RC-цепи первого порядка

Запустить моделирование и остановить его спустя 3-5 мс по внутренним часам симулятора (в левом нижнем углу окна). Настроить расширенную модификацию осциллографа так, чтобы на его экране просматривалась значимая часть временной зависимости напряжения на ёмкости (рис. 23).

Снять осциллограмму напряжения на ёмкости. Для этого визир 1 (красного цвета) установить в момент начала свободного процесса, и, последовательно смещая вправо визир 2 (синего цвета) относительно визира 1 на 10-№ мкс (смещение по времени смотреть в позиции "Т2-Т1"), фиксировать в позиции "VA2" значения напряжения на ёмкости (рис. 23). Результаты измерения временной диаграммы внести в табл. 25.



По значениям из табл. 25 изобразить в масштабе график временной лиаграммы напряжения на ёмкости.

Определить по осциллограмме постоянную времени цепи $\hat{\tau}_{RC}$ — интервал времени от начала свободного процесса до момента времени, соответствующего затуханию процесса в е=2.72 раза по сравнению с начальным значением. Для этого визир 1 установить в начало свободного процесса, а визир 2 в положение, при котором напряжение на ёмкости составит 10/2.72=3.68 В, тогда значение в позиции "Т2-Т1" будет определять постоянную времени цепи $\hat{\tau}_{RC}$. Результат измерения $\hat{\tau}_{RC}$ внести в табл. 26 и отобразить на графике.

Рассчитать теоретическую величину постоянной времени $\tau_{\rm RC} = R_1 \cdot C$, внести её значение в табл. 26 и сопоставить с экспериментальным значением $\hat{\tau}_{RC}$.

Уменьшить сопротивление R_1 в два раза: $R_1 = 5$ кОм. Выполнить моделирование.

Вновь снять осциллограмму напряжения на ёмкости. Результаты внести в табл. 25. Изобразить график свободного процесса в той же системе координат, что и график для исходного значения сопротивления R₁.

По осциллограмме вновь определить постоянную времени цепи $\hat{\tau}_{RC}$, внести полученное значение в табл. 26 и отобразить на графике. Найти расчётное значение постоянной времени т_{вс}, которое также внести в табл. 26.

Таблица 25	Таблица 26
Свободные процессы в RC-цепи	Постоянная времени RC-цепи

t MKC	u _C , В при R ₁ =				
t, MKC	10 кОм	5 кОм			
0	10	10			
$10 \cdot N_{\underline{0}} = \dots$					
20·№=					
$30 \cdot N_{\underline{0}} = \dots$					
$40 \cdot N_{\underline{0}} = \dots$					

	-	
а, кОм	$\hat{\tau}_{RC}$, MKC	$\tau_{\rm RC}$, мкс
10		
5		

Сделать вывод о характере свободных процессов в RC-цепи и о влиянии величины активного сопротивления на продолжительность свободного процесса.

2. Исследование свободных процессов в колебательном контуре (RLC-цепи)

Ключ перевести в верхнее положение. Запустить моделирование. Убедиться, что наблюдаемый свободный процесс разряда ёмкости является колебательным.

Установив визир 1 в момент начала свободного процесса, с помощью визира 2 снять временную диаграмму напряжения на ёмкости. При этом фиксировать только первые пять максимальных и четыре минимальных значения колебания (рис. 24). Результаты внести в табл. 27.



Таблина 27

Свободный процесс в RLC-цепи при $R_2 = 80$ Ом

t, мкс	0				
u _C , B	10				

По осциллограмме напряжения определить декремент затухания $\hat{\Delta}$ — отношение пиков колебания, разделённых периодом (рис. 25). На основе $\hat{\Delta}$ найти логарифмический декремент затухания $\hat{\Theta} = \ln(\hat{\Delta})$, а затем добротность контура $\hat{Q} = \pi/\hat{\Theta}$. Полученные числовые характеристики внести в отчёт.



Нарисовать в отчёте осциллограмму напряжения на ёмкости, изобразив точки, соответствующие максимумам и минимумам колебания и соединив их гармонической функцией. На график свободного процесса штрихом нанести огибающую амплитуд — затухающую экспоненту, проходящую через пики колебания (рис. 26). Определить по графику постоянную времени контура $\hat{\tau}_{\rm K}$ — время, соответствующее точке пересечения огибающей амплитуд свободного процесса и уровня, в *е* раз меньшего начального значения. Внести значение $\hat{\tau}_{\rm K}$ в отчёт.



Увеличить сопротивление R_2 в два раза ($R_2 = 160 \text{ Om}$).

Убедиться, что режим свободного процесса в контуре остался колебательным. Вновь снять временную диаграмму напряжения на ёмкости. По-прежнему фиксировать только первые пять максимальных и четыре минимальных значения колебания. Результаты внести в таблицу, аналогичную табл. 27. Изобразить в отчёте осциллограмму напряжения на ёмкости при увеличенном вдвое сопротивлении потерь R₂.

Измерить декремент затухания $\hat{\Delta}$, на его основе найти логарифмический декремент затухания $\hat{\Theta}$, а затем добротность контура \hat{Q} . Определить по графику постоянную времени контура $\hat{\tau}_{\kappa}$. Параметры свободного процесса внести в отчёт.

Сделать вывод о влиянии сопротивления контура на параметры колебательного режима свободного процесса.

Для каждого значения сопротивления R_2 , используя известные значения ёмкости C и индуктивности L, рассчитать постоянную времени $\tau_{\rm K} = 2 \cdot L/R_2$, добротность $Q = \sqrt{L/C}/R_2$ и логарифмический декремент затухания контура $\Theta = \pi/Q$.

Результаты расчётов, а также соответствующие экспериментальные значения внести в табл. 28. Сравнить экспериментально определённые значения параметров контура с расчётными значениями. Сделать вывод.

Рассчитать по формуле $R_{2KP} = 2 \cdot \sqrt{L/C}$ значение сопротивления потерь, при котором проявляется критический режим свободного процесса в контуре, и внести его значение в отчёт.

Таблица 28

Сравнение экспериментальных и расчётных значений параметров колебательного режима свободного процесса

R_2 ,	Посто времен	янная ии, мкс	Добро	тность	Лог. декремент затухания	
Ом	$\hat{\tau}_{K}$	$ au_{\mathrm{K}}$	Ŷ	Q	Ô	Θ
80						
160						

Установить сопротивление R_2 равным третьей части найденного выше критического сопротивления ($R_2 = \frac{1}{3}R_{2 \text{ KP}}$).

Снять временную диаграмму напряжения на ёмкости, при этом фиксировать значения колебания с шагом 4·№ мкс. Результаты внести в табл. 29. Изобразить в отчёте осциллограмму напряжения. Сделать вывод о характере свободного процесса.

Установить сопротивление R_2 равным критическому значению (R_2 = $R_{2\,\text{KP}}$).

Вновь снять временную диаграмму напряжения на ёмкости с шагом 4.№ мкс. Результаты внести в табл. 29. Изобразить осциллограмму в той же системе координат, что и предыдущий график. Сделать вывод о характере свободного процесса.

Увеличить втрое сопротивление R₂ (по сравнению с R_{2 кР}) и, тем самым, обеспечить проявление в контуре апериодического режима свободного процесса. Снять полученную осциллограмму напряжения, внести её значения в табл. 29 и изобразить график поверх предыдущих осциллограмм. Сделать вывод о влиянии величины сопротивления потерь контура на продолжительность апериодического разряда ёмкости.

Таблина 29

процессы в контуре при оольших потерях								
t Mrc	u _C , В при R ₂ =							
t, MKC	$^{1}/_{3}R_{2KP}$	$R_{2 \mathrm{KP}}$	$3R_{2\text{KP}}$					
0	10	10	10					
$4 \cdot N_{\underline{0}} = \dots$								
$8 \cdot N_{\underline{0}} = \dots$								
12·№=								
$16 \cdot \mathbb{N}_{\underline{0}} = \dots$								

Контрольные вопросы к защите работы

1. При каких условиях в электрических цепях могут наблюдаться свободные процессы? Является ли свободный процесс переходным процессом? Какова методика теоретического анализа свободных процессов в линейной цепи?

2. Каков закон изменения напряжения на ёмкости при её свободном разряде через сопротивление? Как зависит длительность разряда ёмкости от величины сопротивления? ёмкости? Обосновать ответ, исходя из физики процессов.

3. Что такое постоянная времени цепи? Как её определить экспериментально? Как зависит постоянная времени RCцепи от величины сопротивления и ёмкости?

4. Каковы возможные варианты (режимы) протекания свободных процессов в колебательном контуре? От чего зависит проявление того или иного режима?

5. Каково условие апериодического свободного процесса в контуре? Как при апериодическом режиме изменяется напряжение на ёмкости? Как зависит длительность процесса в апериодическом режиме от величины сопротивления контура?

6. Каково условие колебательного режима свободного процесса в контуре? Как в колебательном режиме изменяется напряжение на ёмкости? Как зависит длительность свободного процесса и частота колебаний от сопротивления потерь?

7. Что такое декремент затухания контура? Как его определить экспериментально? рассчитать теоретически? Как он связан с добротностью? полосой пропускания? Какие значения может принимать логарифмический декремент затухания?

8. Как определить экспериментально и теоретически постоянную времени колебательного контура? Для какого режима справедлива формула $\tau_{\rm K} = 2 \cdot L/R$?

Литература:	[1, c. 149-150; 186-190; 284-285];
	[2, c. 199-203; 208; 209-212];
	[3, c. 306-308; 317-320; 323-327];
	[4, c. 158-159; 164-172];
	[5, c. 153-157; 168; 173-178].

Лабораторная работа №7

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы — исследовать временные характеристики линейных цепей на примере фильтра с заданной аппроксимацией АЧХ; выявить взаимосвязь между параметрами временных и частотных характеристик цепей.

Задания и указания по их выполнению

Исследуемый линейный фильтр является фильтром нижних частот (ФНЧ) и реализован в виде пассивной лестничной LC-цепи со схемой, показанной на рис. 27.

Количество реактивных элементов в схеме определяется порядком фильтра (n), указанным в табл. 30 для заданного номера (\mathbb{N}_{2}) варианта. Для расчёта параметров реактивных элементов фильтра (L_i , C_i) следует воспользоваться формулами:

$$L_i = \frac{\overline{L}_i \cdot R_H}{2\pi \cdot F_C}, \ C_i = \frac{\overline{C}_i}{2\pi \cdot F_C \cdot R_H}$$

где \bar{L}_i, \bar{C}_i — нормированные значения параметров реактивных элементов фильтра (табл. 30).

Полагая, что частота среза АЧХ фильтра (F_C) указана для заданного номера (N_2) варианта в табл. 31, а нагрузочное сопротивление (R_H) составляет для всех вариантов 1 кОм, рассчитать на основе приведенных формул и данных табл. 30 значения элементов L_i и C_i в схеме фильтра с заданной АЧХ.



Данные для выполнения седьмой лабораторной работы

Таблица 30

	Тип		Нормир	ованные з	начения э	лементов	фильтра
№	ФНЧ	n	\overline{L}_1	\overline{C}_2	\overline{L}_3	\overline{C}_4	\overline{L}_5
1	Фильтр	3	1.50000	1.33333	0.50000		
2	Баттер-	4	1.53073	1.57716	1.08239	0.38268	
3	ворта	5	1.54508	1.69443	1.38197	0.89443	0.30902
4	Фильтр	3	1.57200	1.51790	0.93182		
5	чебышева с неравномер-	4	1.43606	1.88877	1.52113	0.91291	
6	ностью АЧХ 0.5 дБ	5	1.62994	1.73996	1.92168	1.51377	0.90343
7	Фильтр	3	1.65199	1.45972	1.10778		
8	чебышева с неравномер-	4	1.34966	2.01053	1.48743	1.10515	
9	ностью АЧХ 1.0 дБ	5	1.72155	1.64455	2.06119	1.49297	1.10354
10		3	1.46316	0.84275	0.29262		
11	Фильтр Бесселя	4	1.50126	0.97809	0.61275	0.21140	
12		5	1.51247	1.02318	0.75315	0.47290	0.16184
13		3	1.59082	1.42689	0.76336		
14	Фильтр Лежанлра	4	1.61106	1.66112	1.42796	0.63939	
15	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5	1.63734	1.75206	1.73558	1.39362	0.64433
16	Фильтр	3	1.51234	1.08668	0.39788	_	
17	Баттер- ворта-	4	1.57663	1.32982	0.89557	0.31439	
18	Томсона	5	1.60272	1.35168	1.07126	0.68894	0.23756
19	Фильтр	3	1.60324	1.49768	1.00731	_	
20	чеоышева с неравномер-	4	1.40071	1.93819	1.51305	0.99561	
21	ностью АЧХ 0.7 дБ	5	1.66586	1.70175	1.97930	1.51207	0.98963
22	Фильтр	3	1.52737	1.52585	0.78775		
23	чеоышева с неравномер-	4	1.49145	1.80570	1.49582	0.75327	
24	ностью АЧХ 0.2 дБ	5	1.57797	1.79383	1.81816	1.47092	0.73613

	Таблица	31

Частота среза исследуемого	фильтра	нижних	частот
----------------------------	---------	--------	--------

N⁰	F _c , кГц	N⁰	F _c , кГц	No	F _c , кГц
14	3	912	5	1720	7
58	4	1316	6	2124	8

Округлить полученные значения параметров элементов фильтра до трёх значащих цифр (например, 26.3 мГн, 1.25 нФ и т.п.) и внести их в отчёт. Изобразить схему исследуемого фильтра нижних частот.

Загрузить файл, в названии которого указан порядок (n) фильтра, заданный в табл. 30. Примерный вид установки для исследования временных характеристик фильтра, появляющийся после загрузки файла, показан на рис. 28.

Убедиться, что ко входу фильтра подключен источник периодического напряжения — переключатель, управляемый клавишей "Space", установлен в верхнее положение.

Установить параметры L_i и C_i элементов фильтра в соответствии с выполненным расчётом.

Установить амплитуду гармонического напряжения на входе фильтра (генерируемого источником) равной 1 В.



Рис. 28

1. Анализ параметров исследуемого фильтра по его частотным характеристикам

Активировать команду "AC Frequency..." меню "Analysis". Установить в диалоговом окне следующие параметры: Start frequency = $0.01 \Gamma \mu$, End frequency = $2 \cdot F_C$ — минимальное и максимальное значение частоты; Sweep type — масштаб по оси частот — линейный (Linear); Number of point = 5000; Vertical scale — масштаб по вертикали — линейный (Linear); Nodes for analysis = 2. Затем нажать кнопку "Simulate".

Рассчитать и внести в табл. 32 значения частоты, соответствующие $k \cdot 0.2 \cdot F_c$, где k = 0, 1, ..., 10. Используя визиры, снять АЧХ и ФЧХ цепи на этих частотах. Полученные данные внести в табл. 32 и по ним построить графики.

Таблица 32

Частотные характеристики исследуемого фильтра

f, кГц						
K(f)						
φ(f), °						

Используя визир, измерить фактическую полосу пропускания фильтра, считая её нижней границей нулевую частоту, верхней границей — частоту, на которой АЧХ составляет 0.707 от максимального значения. Сравнить полученное экспериментально (по АЧХ) значение Π'_{f1} с заданным в табл. 31 исходным значением $\Pi_f = F_c$. Внести значение Π'_{f1} в табл. 33 и указать стрелкой "влево - вправо" на графике АЧХ.

Таблица 33

Результаты исследования характеристик линейной цепи

Парамотры и напи		Оценка по					
Параметры цепи	АЧХ/ФЧХ	h(t)	g(t)				
Полоса пропускания	$\Pi'_{\rm f1}$		$\Pi'_{\rm f2}$				
Время запаздывания	t' ₃₁	t' ₃₂					

Провести касательную к начальному участку ФЧХ цепи. Построить на её основе прямоугольный треугольник (рис. 29). Определить по треугольнику дифференциальную крутизну (наклон) начального линейного участка ФЧХ в градусах на Гц по формуле: $S_{\Phi} = \Delta \phi / \Delta f$. Определить время запаздывания сигнала в фильтре (постоянную времени цепи) по формуле $t'_{31} = S_{\Phi}/360$. Внести полученное значение t'_{31} в табл. 33.



2 Исследование временных характеристик цепи и их связи с частотными характеристиками

Переключатель "Space" перевести в нижнее положение, переключатель "H" — в верхнее положение. При этом ко входу цепи будет подключен источник E₁, вырабатывающий с момента запуска моделирования постоянное напряжение величиной 1 В (рис. 28). Запустить моделирование. Наблюдать на экране осциллографа отклик цепи на единичное воздействие переходную характеристику h(t). Поскольку наиболее информативной частью характеристики является её начальная область, занимающая малый промежуток времени, для её изучения потребуется уменьшение масштаба временной оси ("Time base").

Определить по переходной характеристике h(t) время установления процесса t_{yCT} на выходе цепи как интервал времени, по истечении которого значения h(t) отличаются от установившегося единичного значения не более чем на 5%. Последнее означает, что при $t > t_{yCT}$ значения h(t) не должны вы-

ходить за пределы зоны 0.95...1.05 (рис. 30). Внести измеренное значение t_{уст} в отчёт.



Оценить приближённо время задержки сигналов в цепи, используя соотношение $t'_{32} = t_{yCT}/3$, и внести его в табл. 33. Сравнить полученное значение t'_{32} со значением t'_{31} , определённым по графику ФЧХ. Сделать вывод.

Округлить найденное время установления процесса t_{yCT} до десятков. Используя визир, снять переходную характеристику с шагом по оси времени, равным 0.1 от округлённого значения t_{yCT} . Полученные данные внести в табл. 34, по ним построить график характеристики h(t). Отметить на характеристике время установления процесса t_{yCT} .

Таблица 34

Переходная характеристика исследуемого фильтра

t, мкс						
h(t)						

Переключатель "Н" перевести в нижнее положение. При этом ко входу цепи будет подключен высоковольтный источник E₂, формирующий с помощью электронного ключа малый по длительности прямоугольный импульс площадью 0.05 В·мс. Запустить моделирование. Наблюдать на экране осциллографа отклик цепи на малый по длительности импульс — ненормированную импульсную характеристику g'(t). Полагая, что импульсная характеристика исследуемого фильтра близка по форме к характеристике идеального ФНЧ, оценить по осциллограмме g'(t) полосу пропускания фильтра. Для этого измерить интервалы времени Δt_i между нулями трёх боковых лепестков импульсной характеристики (рис. 31), вычислить среднее значение Δt_{CP} , произвести оценку полосы пропускания ФНЧ по формуле $\Pi'_{f2}=1/(2\Delta t_{CP})$. Сопоставить полученное значение Π'_{f2} с предыдущей оценкой, внести в табл. 33.



Снять по точкам ненормированную импульсную характеристику ФНЧ, при этом зафиксировать только шесть нулевых, первые три максимальных и два минимальных значения. Каждый раз делить измеренное значение g'(t) на площадь входного импульса 0.05 В·мс. Полученные значения нормированной импульсной характеристики g(t) и соответствующие им моменты времени внести в табл. 35. Нарисовать в отчёте импульсную характеристику g(t), изобразив точки, соответствующие нулям, максимумам и минимумам, и соединив их плавной кривой, аналогичной кривой на рис. 11.

Таблица 35

Импульсная характеристика исследуемого фильтра

	-	-	-		-	-	-	
t, мкс								
g'(t)								
g(t)								

Контрольные вопросы к защите работы

1. Дать определение импульсной характеристики цепи. Изложить методику её расчёта и экспериментального измерения. Указать практическое содержание характеристики?

2. Что такое переходная характеристика цепи? Как её рассчитать, располагая схемой цепи? Как её измерить? Как связаны между собой переходная и импульсная характеристики?

3. Что такое АЧХ и ФЧХ цепи? Как АЧХ и ФЧХ связаны с комплексным и операторным коэффициентом передачи цепи, с переходной и импульсной характеристикой цепи?

4. Какую цепь называют ФНЧ? Что такое частота среза и полоса пропускания ФНЧ. Изобразить качественно АЧХ, ФЧХ, импульсную и переходную характеристики реального ФНЧ.

5. Что называют идеальным ФНЧ (ИФНЧ)? Изобразить качественно АЧХ и ФЧХ ИФНЧ. Какой параметр ФНЧ определяет наклон ФЧХ? частота среза АЧХ?

6. В чём заключается принципиальное различие импульсных характеристик реального ФНЧ и идеального ФНЧ? Сформулировать условие физической реализуемости цепи.

7. При каком условии реакцию линейной цепи на одиночный импульс можно считать импульсной характеристикой цепи? Пояснения дать исходя из временной и частотной позиций.

8. Найти аналитические выражения для импульсной и переходной характеристики фильтров на рис. 32.





Лабораторная работа №7

ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ ТИПОВЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Цель работы — исследовать связь формы и параметров типовых периодических процессов с их амплитудными и фазовыми спектрами.

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_7.ewb". Если при загрузке появится меню с предложением указать вариант модели, следует выбрать второй — "Use circuit model".

Проверить состояние ключей. Ключи должны быть в следующих положениях: ключ [1] — в нижнем (замкнутом), ключ [2] — в верхнем (разомкнутом), ключи [3] и [4] — в нижнем, спаренный ключ [5] — в левом положении.

Проверить уровни напряжений, генерируемых источниками постоянного напряжения: ЭДС источника "Uo" должна быть равна 0 В, ЭДС источника "К" — точно 1 В.

Установить по номеру варианта (№) параметры источника (Function Generator) периодической последовательности прямоугольных импульсов:

— частоту повторения импульсов (Frequency) F_П=№ кГц;

— процент заполнения периода импульсом (Duty cycle), равный 100/q, где q = 5 — скважность последовательности;

— высоту импульсов (Amplitude) $A_m = 30 - N_{\Omega} B$ и смещение импульсов по вертикали (Offset) $A_0 = 30 - N_{\Omega} B$.

Указать в отчёте параметры исходного процесса.

1. Исследование влияния основных параметров периодического процесса на его спектр

Включить установку. Настроить осциллограф так, чтобы на его экране просматривались 1-2 периода импульсной по-

следовательности, а пики импульсов соответствовали (2 - 3)-м делениям по вертикали. Получить спектр амплитуд и фаз наблюдаемого периодического процесса (прил. 3), указав в окне команды "Fourier ..." параметр "Output node" = 3, "Fundamental frequency" — равным F_{Π} , "Number of harmonics" — равным 10. Иметь в виду, что спектр фаз периодического процесса выводится в виде сплошной кривой. Снимать значения дискретного спектра фаз следует на частотах гармоник n· F_{Π} (n — номер гармоники) с помощью визиров, активируя их кнопками "Toggle Cursors". Значения внести в табл. 36. Спектр (амплитуд, фаз) и осциллограмму процесса привести в отчёте.

Таблица 36

Гармонический спектр амплитуд и фаз исходной периодической последовательности прямоугольных импульсов

n·F _П , кГц	0					
U _{mn} , B						
Ψ _n , °						

Обнулить постоянную составляющую исследуемого процесса, установив ЭДС источника "Uo" в точности равной ранее измеренной постоянной составляющей. Спектр амплитуд и осциллограмму процесса вновь привести в отчёте.

Вновь установить ЭДС источника "Uo" равной 0 В. Ключ [3] перевести в верхнее положение. С помощью источника "Un" скомпенсировать в спектре исходного процесса первую гармонику. Для этого установить частоту и фазу ЭДС источника "Un" равными параметрам первой гармоники, а действующее значение (Voltage) равным 0.707 от измеренной амплитуды первой гармоники процесса (табл. 36). Спектр и осциллограмму процесса без первой гармоники внести в отчёт. Сделать вывод.

Вернуть ключ [3] в нижнее положение. В 2.5 раза уменьшить скважность q. Снять спектр амплитуд и фаз, значения внести в таблицу, аналогичную табл. 36. Спектр амплитуд, фаз и осциллограмму процесса привести в отчёте. Сделать вывод.

2. Проверка основных теорем о спектрах

Вернуться к исходной скважности. Ввести задержку импульсов на ¹/₄ периода. Для этого перевести ключ [1] в верхнее (разомкнутое), ключ [2] — в нижнее (замкнутое) положение, время задержки линии "Delay Line" установить равным $1/(4 \cdot F_{\Pi})$ (двойной клик по иконке \rightarrow Library "default", Model "tline1" \rightarrow кнопка "Edit" \rightarrow позиция "Propagation time delay"). Спектр фаз и осциллограмму процесса привести в отчёте. Сделать вывод.

Перевести ключ [1] в нижнее (замкнутое) положение. Ключ [2] должен по-прежнему находиться в нижнем (замкнутом) положении. При таких условиях генерируемый установкой процесс будет представлять собой периодическую пачку из двух импульсов на периоде. Спектр и осциллограмму полученного колебания привести в отчёте. С использованием данных, полученных в предыдущем пункте и первом разделе, проверить для третьей гармоники теорему о сумме спектров.

Ключ [2] перевести в верхнее (разомкнутое) положение. Обнулить постоянную составляющую процесса, установив ЭДС источника "Uo" равной ранее измеренной постоянной составляющей. Переводом спаренного ключа [5] в правое положение подключить на выход установки интегратор. Спектр и осциллограмму преобразованного процесса привести в отчёте. Проверить для первой гармоники теорему об интегрировании временного процесса. При расчётах полагать, что коэффициент передачи интегратора (Gain) составляет 10⁴.

Переводом ключа [5] в левое положение отключить интегратор. Перевести ключ [4] в верхнее положение, тем самым, обеспечить умножение генерируемого установкой периодического процесса (без постоянной составляющей) на гармоническое колебание высокой частоты. Установить частоту колебаний источника "cos(wt)" равной $20 \cdot F_{\Pi}$. Спектр (на частотах от $16 \cdot F_{\Pi}$ до $24 \cdot F_{\Pi}$ с шагом F_{Π}) и осциллограмму высокочастотного процесса внести в отчёт. При снятии спектра параметр "Number of harmonics" взять равным 40. Сделать вывод.

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое гармонический спектр процесса? спектр амплитуд? спектр фаз? Каковы особенности гармонического спектра периодического процесса?

2. Что представляет собой гармоника в составе периодического процесса? Как определяется её частота, амплитуда и начальная фаза?

3. Записать и пояснить выражения для ряда Фурье и коэффициентов разложения в ряд периодического процесса.

4. Изобразить спектры амплитуд и фаз периодической последовательности прямоугольных импульсов. Отметить их характерные точки и указать на их основные особенности.

5. Как влияют на спектр амплитуд последовательности прямоугольных импульсов амплитуда, длительность и период повторения импульсов?

6. Какой вклад в формирование импульса вносят гармоники низшего порядка? высшего порядка?

7. Что такое практическая ширина спектра процесса? По каким критериям её можно определять? Как ширина спектра связана с длительностью импульсов периодического процесса?

8. Как влияет скважность периодической последовательности импульсов на вид её амплитудного спектра? на величину практической ширины спектра?

9. Как в инженерной практике может быть использована практическая ширина спектра процесса? Как она должна соотноситься с полосой пропускания тракта обработки процесса?

10. Записать ряд Фурье в комплексной форме и формулы для вычисления коэффициентов разложения. Как определяются комплексные амплитуды гармоник процесса?

11. Сформулировать теорему запаздывания. Как влияет временная задержка процесса на его спектр амплитуд и фаз?

12. В чём суть теоремы о сумме спектров? Можно ли при отыскании амплитуд гармоник суммарного процесса просто складывать амплитуды гармоник составляющих процесса?

13. Какие изменения характерны для спектра амплитуд и фаз периодического процесса после его дифференцирования (интегрирования)?

14. Что происходит со спектром процесса при его умножении на высокочастотное гармоническое колебание?

15. Сформулировать теорему об изменении масштаба времени. Каким трансформациям подвергнется спектр амплитуд и фаз процесса при увеличении длительности процесса фиксированной амплитуды? фиксированной энергии?

16. В чём состоят изменения спектра амплитуд и фаз процесса при его временной инверсии?

17. Изобразить спектр амплитуд и фаз гармонического напряжения $u(t) = 10 \cdot \cos(2\pi \cdot 10^4 \cdot t - 30^\circ)$ мВ.

18. Определить путем тригонометрического преобразования, на какие составляющие можно разложить периодическое колебание вида: $u(t) = 100 \cdot \cos^2(2\pi \cdot 10^6 \cdot t + 45^\circ)$ В. Изобразить его спектр амплитуд и фаз.

19. Чем схожи и чем отличаются спектры одиночного импульсного процесса и периодической последовательности таких импульсов?

20. Что такое комплексная спектральная плотность непериодического (импульсного) процесса? Каковы её свойства? Как на её основе рассчитать спектр периодической последовательности таких импульсов?

Литература: [1, с. 216-228; 231-233; 238-239]; [2, с. 165-175; 245-250; 256; 258]; [4, с. 144-147; 150-152; 209-220].

Лабораторная работа № 8

ЛИНЕЙНЫЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКИ И ИХ СОЕДИНЕНИЯ

Цель работы — освоить методику расчёта и экспериментального определения первичных параметров линейных четырёхполюсников и их соединений.

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл в соответствии с номером варианта и табл. 37. Установить по табл. 38 значения параметров элементов первого и второго четырёхполюсника.

В схеме лабораторной установки вольтметр V1 и амперметр A1 предназначены для измерения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания со стороны зажимов 1 - 1', а вольтметр V2 и амперметр A2 — со стороны зажимов 2 - 2'подключенного к ним четырёхполюсника. Ключ S1 (или S2), установленный в левое положение, обеспечивает подключение к зажимам 1 - 1' (или 2 - 2') вольтметра V1 (или V2), что гарантирует режим холостого хода зажимов по причине большого внутреннего сопротивления вольтметра. При переводе ключа S1 (или S2) в правое положение к зажимам 1 - 1' (или 2 - 2') подключается амперметр A1 (или A2), что обеспечивает режим короткого замыкания зажимов, поскольку внутренне сопротивление амперметра мало по сравнению с сопротивлениями четырёхполюсника.

Таблица 37

Имя загружаемого для работы схемного файла

№ варианта	Имя файла
1,5,9,13,17,21,25,29	Lab_Rab_8-1.ewb
2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28	Lab_Rab_8-2.ewb
3,7,11,15,19,23,27,30	Lab_Rab_8-3.ewb

Таблица 38

Исходные данные для выполнения восьмой работы

	етры	чет	Пер ырехг	вый юлюс	ник	чет	Вто ырехп	рой юлюс	ник	Вид
№)aM(Cxe-	R'1.	R'2.	R'3.	Cxe-	R"1.	R"2.	R"3.	соедине-
	Пар	ма	Ом	Ом	Ом	ма	Ом	Ом	Ом	пил
1	[A]	Т	40	890	190	П	349	3863	785	каскад.
2	[Z]	П	240	1120	5285	Т	42	702	229	послед.
3	[Y]	Т	230	700	40	Т	76	572	332	паралл.
4	[H]	П	285	4720	875	Т	41	890	192	послпар.
5	[G]	Т	65	585	155	П	521	753	2446	парпосл.
6	[A]	П	235	890	2185	Т	56	781	243	каскад.
7	[Z]	Т	345	645	20	Т	358	1373	11.8	послед.
8	[Y]	П	325	2165	1485	Т	132	910	207	паралл.
9	[H]	Т	155	670	190	П	349	3863	785	послпар.
10	[G]	П	385	1380	1675	Т	42	702	229	парпосл.
11	[A]	Т	50	985	205	Т	76	572	332	каскад.
12	[<u>Z</u>]	П	265	1295	5010	Т	41	890	192	послед.
13	[<u>Y</u>]	Т	210	720	65	П	521	753	2446	паралл.
14	[<u>H</u>]	П	290	3370	995	Т	56	781	243	послпар.
15	[<u>G</u>]	Т	285	705	85	Т	358	1373	11.8	парпосл.
16	[<u>A</u>]	П	405	3320	1010	Т	132	910	207	каскад.
17	[<u>Z</u>]	Т	70	755	335	П	349	3863	785	послед.
18	[<u>Y</u>]	П	435	485	4710	Т	42	702	229	паралл.
19	[<u>H</u>]	Т	60	910	170	Т	76	572	332	послпар.
20	[<u>G</u>]	П	245	1310	3545	Т	41	890	192	парпосл.
21	[<u>A</u>]	Т	65	1080	215	Π	521	753	2446	каскад.
22	[<u>Z</u>]	П	295	1470	4915	Т	56	781	243	послед.

Продолжение табл. 38

No	етры	четь	четь	Втој прехп	рой олюс	ник	Вид			
JNō	Парам	Схе- ма	R′ ₁ , Ом	R′2, Ом	R′ ₃ , Ом	Схе- ма	R" ₁ , Ом	R" ₂ , Ом	R" ₃ , Ом	ния
23	[Y]	Т	220	765	70	Т	358	1373	11.8	паралл.
24	[H]	П	310	3365	1085	Т	132	910	207	послпар.
25	[G]	Т	255	735	125	П	349	3863	785	парпосл.
26	[A]	П	425	2515	1215	Т	42	702	229	каскад.
27	[Z]	Т	160	770	125	Т	76	572	332	послед.
28	[Y]	П	315	1930	1485	Т	41	890	192	паралл.
29	[H]	Т	50	1070	225	П	521	753	2446	послпар.
30	[G]	Т	230	765	160	Т	56	781	243	парпосл.

Спаренный ключ S3 осуществляет выбор той пары зажимов четырёхполюсника (1 - 1' или 2 - 2'), к которой необходимо подключить источник гармонических колебаний. Амперметр A3 измеряет входной ток четырёхполюсника со стороны тех зажимов, к которым подключен источник колебаний.

1. Экспериментальное определение параметров четырёхполюсников и их соединения

Соединить зажимы 1-1' измерительной установки со входными (расположенными слева) зажимами первого четырёхполюсника, а зажимы 2-2' — с выходными (расположенными справа) зажимами этого же четырёхполюсника.

Измерить входные и выходные напряжения и токи первого четырёхполюсника в режимах холостого хода и (или) короткого замыкания. Для этого выполнить необходимые переключения в соответствии с табл. 39 и заданной системой первичных параметров. Результаты измерений свести в табл. 39, оставив в ней только те строки, которые соответствуют заданной по номеру варианта системе параметров четырёхполюсников.

Таблица 39

Первич- ные па-	Зажимы для подключения	Выходные зажимы и их	U ₁ , B	I ₁ , мА	U ₂ , B	I ₂ , мА
раметры	источника	режим работы			2	
[A]	1 - 1'	2 - 2' — XX				0
	1 - 1'	2-2′ — КЗ			0	
[7]	1 - 1'	2 - 2' — XX				0
٢	2 - 2'	1 - 1' — XX		0		
۲VI	1 - 1'	2-2′ — КЗ			0	
	2 - 2'	1 - 1′ — КЗ	0			
[H]	1 - 1'	2-2' — КЗ			0	
	2 - 2'	1 - 1' — XX		0		
[G]	1 - 1'	2 - 2' — XX				0
[0]	2 - 2'	1 - 1′ — K3	0			
XX—	холостой ход	; КЗ — короткое	е замы	кание		

Результаты измерений для первого четырёхполюсника

По данным табл. 39 и известным соотношениям (прил. 4) определить экспериментальные значения указанных в табл. 38 первичных параметров первого четырёхполюсника. Внести формулы для их определения и полученные на основе формул значения параметров в табл. 40.

Таблица 40

Измеренные первичные параметры первого четырёхполюсника

Обозначение параметра		
Единица измерения		
Формула для определения		
Экспериментальное значение		

Отсоединить первый четырёхполюсник. Соединить зажимы 1-1' измерительной установки со входными (расположенными слева) зажимами второго четырёхполюсника, а зажимы 2-2' — с выходными (расположенными справа) зажимами этого же четырёхполюсника. Измерить входные и выходные напряжения и токи второго четырёхполюсника в режимах холостого хода и (или) короткого замыкания. Результаты измерений напряжений и токов внести в таблицу, аналогичную табл. 39. Определить экспериментальные значения первичных параметров второго четырёхполюсника. Внести их в таблицу, аналогичную табл. 40.

Объединить первый и второй четырёхполюсники в соответствии с заданным в табл. 38 видом соединения (прил. 5). Учесть необходимость обеспечения регулярности соединения (за счёт переворачивания схемы второго четырёхполюсника или скрещивания его входных или выходных зажимов) при последовательном, последовательно-параллельном и параллельнопоследовательном соединениях четырёхполюсников (прил. 5). Соединить зажимы 1 - 1' лабораторной установки со входными зажимами полученного составного четырёхполюсника, зажимы 2-2' — с его выходными зажимами. Измерить входные и выходные напряжения и токи составного четырёхполюсника в режимах холостого хода и (или) короткого замыкания. Результаты измерений внести в таблицу, аналогичную табл. 39. На их основе определить экспериментальные значения первичных параметров составного четырёхполюсника. Внести их в таблицу, аналогичную табл. 40.

2. Теоретический расчёт первичных параметров четырёхполюсников и их соединения

На основе заданных в табл. 38 значений параметров схемных элементов четырёхполюсников и точных аналитических выражений, представленных в прил. 6, рассчитать Впараметры первого и второго четырёхполюсников и внести их в таблицы, аналогичные табл. 41.

Таблица 43

Таблица 41

В-параметры первого четырёхполюсника

Обозначение параметра	$\underline{\mathbf{B}}_{11}$	\underline{B}_{12}	\underline{B}_{21}	\underline{B}_{22}
Единица измерения				
Формула для определения				
Расчётное значение				
$\Delta \underline{\mathbf{B}} = \underline{\mathbf{B}}_{11} \cdot \underline{\mathbf{B}}_{22} - \underline{\mathbf{B}}_{21} \cdot \underline{\mathbf{B}}_{12} =$				

Используя формулы связи первичных параметров линейного четырёхполюсника (прил. 6), рассчитать по найденным Впараметрам заданные в табл. 38 параметры первого и второго четырёхполюсников. Результаты расчётов внести в таблицы, аналогичные табл. 42. В нижнюю строку таблиц внести измеренные в п. 1 экспериментальные значения. Сравнить расчётные и экспериментальные значения.

Таблица 42

....-параметры первого четырёхполюсника

Обозначение параметра		
Единица измерения		
Формула связи с В- параметрами		
Расчётное значение		
Экспериментальное значение		

Располагая рассчитанными параметрами первого и второго четырёхполюсников, найти по ним параметры составного четырёхполюсника (заданного в табл. 38 соединения). Результаты расчёта первичных параметров внести в табл. 43, в которой предусмотреть и заполнить строку с экспериментально измеренными значениями. Сравнить результаты расчёта и экспериментальных измерений первичных параметров составного четырёхполюсника. Сделать выводы.-параметры составного четырёхполюсника

Обозначение параметра		
Единица измерения		
Формула расчёта		
Расчётное значение		
Экспериментальное значение		

Контрольные вопросы к защите работы

1. Что такое линейный четырёхполюсник? Сколько необходимо соотношений, чтобы связать приращения его входных и выходных токов и напряжений?

2. Что такое первичные параметры четырёхполюсника? Пояснить физический смысл любого указанного преподавателем первичного параметра четырёхполюсника.

3. Какое число матриц первичных параметров можно определить для произвольного линейного четырёхполюсника? Записать в матричной форме уравнения четырёхполюсника с использованием Z-, Y- и A-параметров.

4. Записать в матричной форме уравнения линейного четырёхполюсника с использованием Н-, G- и В-параметров. Указать физический смысл всех первичных параметров.

5. В чём заключается условие обратимости четырёхполюсника? Как оно выражается через первичные параметры четырёхполюсника? Какие элементы должен содержать необратимый четырёхполюсник?

6. Как экспериментально определить первичные параметры линейного четырехполюсника, если его зажимы нельзя замыкать накоротко?

7. Какой четырёхполюсник называют симметричным? Привести соотношения, связывающие первичные параметры симметричного четырёхполюсника.

8. На чём основано практическое использование той или иной матрицы первичных параметров четырёхполюсника?

9. Какие виды соединений четырёхполюсников существуют? Охарактеризовать каждый из названных видов.

10. В чём заключается условие регулярности соединения четырёхполюсников? Приведите примеры регулярных (нерегулярных) соединений четырёхполюсников.

11. Как определить первичные параметры соединения четырёхполюсников (составного четырёхполюсника)?

12. Как рассчитать параметры параллельного, параллельно-последовательного и каскадного соединения четырёхполюсников?

13. Параметры какого соединения четырёхполюсников можно найти на основе В-параметров? Рассчитать А-параметры такого соединения на основе В-параметров рассмотренных в работе четырёхполюсников.

14. Определить комплексную амплитуду напряжения на зажимах 1-1' четырёхполюсника, если зажимы 2-2' нагружены активным сопротивлением 10 Ом, напряжение на котором равно 10 В. Известны первичные параметры четырёхполюсника — $\underline{A}_{11} = 0.707 \cdot \exp(j45^\circ)$, $\underline{A}_{21} = 0.11 \,\text{См}$, $\underline{A}_{22} = 1 + j2$.

15. Рассчитать указанную преподавателем матрицу первичных параметров четырёхполюсника, схема которого показана на рис. 33.



Литература: [2, с. 347-353; 363-365]; [3, c. 399-413]; [4, c. 291-304]; [5, c. 120-125; 143-149].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии представлен лабораторный практикум по дисциплине "Основы теории цепей", охватывающий основные разделы дисциплины и посвящённый, преимущественно, анализу установившихся и переходных процессов в линейных электрических цепях.

Выполнение изложенного в учебном пособии лабораторного практикума позволит внести существенный вклад в форсирование у студентов ряда общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Вместе с тем, не менее важным элементов практикума, помимо его выполнения, является защита исследовательских работ, предполагающая демонстрацию определённых знаний, умений и навыков — индикаторов формируемых компетенций.

Таким образом, настоящее учебное пособие должно стать инструментом генерации компетенций, позволяющих студенту сформироваться как грамотному специалисту в области радиоэлектронных устройств и систем.

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.

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).



Ниже кнопок управления формой колебаний располагаются позиции для ввода значений параметров процесса. 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 процесса 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 процессы.

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 "А" и "В" ("Channel A", "Channel B"). Двойной щелчок мыши по изображению осциллографа позволяет раскрыть панель простой модификации с кнопками управления и информационным экраном (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 копок управления, которые сгруппированы в четыре поля. Имеются поля управления масштабом времени, синхронизацией (запуском), а также каналами "А" и "В".

Поле управления развёрткой служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении на входах каналов "А" и "В" временных зависимостей напряжений. Временной масштаб "Time base" (длительность развёртки) задается в секундах на деление (s/Div) или кратных единицах (ms/Div, us/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", "А/В". Они позволяют задавать режим развёртки, определяющий вид зависимости процессов, отображаемых на экране. В режиме "Y/T" вертикальная ось соответствует напряжению, горизонтальная — времени. При нажатии на кнопку "В/А" по вертикали откладывается напряжение на входе канала "В", по горизонтали — канала "А", при нажатии на кнопку "А/В" наоборот. Масштаб осей определяется установками соответствующих каналов. В режимах "А/В" и "В/А" 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 "А" и "В" соответственно. Верхняя позиция поля предназначена для регулировки чувствительности канала (масштаба оси отображаемого напряжения). Цена деления может дискретно устанавливаться от 10 мкВ/дел (µV/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 "АС" (на вход не пропускается постоянная составляющая процесса). 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 процесса 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 развёртки. Осциллограф имеет четыре режима синхронизации. В режиме "Auto" запуск развёртки 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 "А" или "В" управляющим является напряжение на указанном входе. В случае синхронизации от внешнего источника запуск развертки осуществляется сигналом, подаваемым на вход "Ext".

Клавиша "Ехрапd" 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 временн*о*му 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.

приложение 3



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 "А" и "В".

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

В процессе имитации нередко возникает необходимость замедлить процесс моделирования, что разумно, например, при исследовании быстро затухающих процессов. Замедление имитации достигается путём увеличения количества отображаемых точек за время 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 дезактивировать опцию "Generate time steps automatically".

Методика получения спектральных диаграмм временных процессов в контрольных точках

Выполнение спектрального (Фурье-) анализа процессов в моделируемых цепях обеспечивает команда "Fourier ..." меню "Analysis". Параметры команды задаются в окне (рис. ПЗ.1):

— Output node — номер ноды (контрольной точки), в которой анализируется спектр напряжения;

— Fundamental frequency — основная частота анализируемого периодического колебания;

— Number of harmonics — число анализируемых гармоник колебания (обычно указывается такое его значение, чтобы перекрыть предполагаемую практическую ширину спектра процесса, считая, что разнос по частоте между соседними гармониками равен "Fundamental frequency");

— Vertical scale — масштаб по оси ординат (установить линейный — Linear);

— Display phase — вывод на экран частотного распределения фаз гармоник в виде сплошной кривой (установить галочку).



приложение 4

Определение первичных параметров четырёхполюсника по опытам холостого хода и короткого замыкания

Входные \dot{U}_1 , \dot{I}_1 и выходные \dot{U}_2 , \dot{I}_2 напряжения и токи линейного четырехполюсника (рис. П4.1) могут быть связаны шестью формами системы алгебраических уравнений (табл. П4.1). Первичные параметры четырёхполюсника, фигурирующие в этих системах уравнений, могут быть измерены экспериментально на основе опытов холостого хода (XX) и короткого замыкания (K3) соответствующих зажимов четырёхполюсника.



Таблица П4.1

Формулы для определения параметров четырёхполюсника на основе опытов холостого хода и короткого замыкания

[<u>Z]</u>	[<u>Y</u>]	[<u>H]</u>
$\int \dot{\mathbf{U}}_1 = \dot{\mathbf{I}}_1 \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{11} + \dot{\mathbf{I}}_2 \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{12}$	$\int \dot{\mathbf{I}}_{1} = \dot{\mathbf{U}}_{1} \cdot \underline{\mathbf{Y}}_{11} + \dot{\mathbf{U}}_{2} \cdot \underline{\mathbf{Y}}_{12}$	$\int \dot{\mathbf{U}}_1 = \dot{\mathbf{I}}_1 \cdot \underline{\mathbf{H}}_{11} + \dot{\mathbf{U}}_2 \cdot \underline{\mathbf{H}}_{12}$
$\left[\dot{\mathbf{U}}_{2}=\dot{\mathbf{I}}_{1}\cdot\underline{\mathbf{Z}}_{21}+\dot{\mathbf{I}}_{2}\cdot\underline{\mathbf{Z}}_{22}\right]$	$\left[\dot{\mathbf{I}}_{2}=\dot{\mathbf{U}}_{1}\cdot\underline{\mathbf{Y}}_{21}+\dot{\mathbf{U}}_{2}\cdot\underline{\mathbf{Y}}_{22}\right]$	$\left(\dot{\mathbf{I}}_{2}=\dot{\mathbf{I}}_{1}\cdot\underline{\mathbf{H}}_{21}+\dot{\mathbf{U}}_{2}\cdot\underline{\mathbf{H}}_{22}\right)$
$\underline{Z}_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{\mathbf{Y}}_{11} = \dot{\mathbf{I}}_1 / \dot{\mathbf{U}}_1 _{2-2'-K3}$	$\underline{H}_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 _{2-2'-K3}$
$\underline{Z}_{12} = \dot{U}_1 / \dot{I}_2 _{1-1-XX}$	$\underline{Y}_{12} = \dot{I}_1 / \dot{U}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{H}_{12} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2 _{1-1'-XX}$
$\underline{Z}_{21} = \dot{U}_2 / \dot{I}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{Y}_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 _{2-2'-K3}$	$\underline{H}_{21} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1 _{2-2'-K3}$
$\underline{Z}_{22} = \dot{U}_2 / \dot{I}_2 _{1-1'-XX}$	$\underline{Y}_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{H}_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 _{1-1'-XX}$

Продолжение табл. П4.1

[<u>G]</u>	[<u>A</u>]	[<u>B]</u>
$\int \dot{\mathbf{I}}_1 = \dot{\mathbf{U}}_1 \cdot \underline{\mathbf{G}}_{11} + \dot{\mathbf{I}}_2 \cdot \underline{\mathbf{G}}_{12}$	$\int \dot{\mathbf{U}}_1 = \dot{\mathbf{U}}_2 \cdot \underline{\mathbf{A}}_{11} + \dot{\mathbf{I}}_2 \cdot \underline{\mathbf{A}}_{12}$	$\int \dot{\mathbf{U}}_2 = \dot{\mathbf{U}}_1 \cdot \underline{\mathbf{B}}_{11} + \dot{\mathbf{I}}_1 \cdot \underline{\mathbf{B}}_{12}$
$\left[\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cdot \underline{G}_{21} + \dot{I}_2 \cdot \underline{G}_{22} \right]$	$ (\dot{\mathbf{I}}_{1} = \dot{\mathbf{U}}_{2} \cdot \underline{\mathbf{A}}_{21} + \dot{\mathbf{I}}_{2} \cdot \underline{\mathbf{A}}_{22} $	$ \left(\dot{\mathbf{I}}_2 = \dot{\mathbf{U}}_1 \cdot \underline{\mathbf{B}}_{21} + \dot{\mathbf{I}}_1 \cdot \underline{\mathbf{B}}_{22} \right) $
$G_{11} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{\mathbf{A}}_{11} = \dot{\mathbf{U}}_1 / \dot{\mathbf{U}}_2 \Big _{2-2'-XX}$	$\underline{\mathbf{B}}_{11} = \dot{\mathbf{U}}_2 / \dot{\mathbf{U}}_1 \big _{1-1'-XX}$
$G_{12} = \dot{I}_1 / \dot{I}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{\mathbf{A}}_{12} = \dot{\mathbf{U}}_1 / \dot{\mathbf{I}}_2 _{2-2'-K3}$	$\underline{B}_{12} = \dot{U}_2 / \dot{I}'_1 _{1-1'-K3}$
$G_{21} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{\mathbf{A}}_{21} = \dot{\mathbf{I}}_1 / \dot{\mathbf{U}}_2 \big _{2-2'-XX}$	$\underline{B}_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 _{1-1-XX}$
$G_{22} = \dot{U}_2 / \dot{I}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{\mathbf{A}}_{22} = \dot{\mathbf{I}}_{1} / \dot{\mathbf{I}}_{2} \Big _{2-2'-K3}$	$\underline{\mathbf{B}}_{22} = \dot{\mathbf{I}}_2 / \dot{\mathbf{I}}'_1 _{1-1'-K3}$

приложение 5

Соединения четырёхполюсников и расчёт параметров составного четырёхполюсника

При соединении двух четырёхполюсников друг с другом образуется составной четырёхполюсник. Виды соединений (составных) четырёхполюсников показаны на рис. П5.1.



В соответствии с рис. П5.1 различают следующие соединения четырёхполюсников:

а) параллельное, при этом первичные параметры составного четырёхполюсника определяются как $[Y] = [Y^{(1)}] + [Y^{(2)}];$ $[Z] = [Z^{(1)}] + [Z^{(2)}];$

 $[A] = [A^{(1)}] \cdot [A^{(2)}]$

- δ) последовательное, при этом
- в) последовательно-параллельное, $[H] = [H^{(1)}] + [H^{(2)}]$
- r) параллельно-последовательное, [G] = [G⁽¹⁾] + [G⁽²⁾];
- ∂) каскадное, при этом —

Приведенные выражения справедливы только при выполнении условия регулярности соединения четырёхполюсников, которое заключается в равенстве по величине и противоположности по направлению токов, протекающих через оба входных, а также через оба выходных зажима каждого четырёхполюсника в соединении. Применительно к Т-образному и П-образному четырёхполюсникам, показанным в прил. 6 и относящимся к так называемым "треугольным" четырёхполюсникам (с накоротко соединёнными зажимами 1' и 2'), условие регулярности выполняется, если общий провод каждого из четырёхполюсников соединения не замыкает собой элементы другого четырёхполюсника.

Для регулярного последовательного соединения двух "треугольных" четырёхполюсников, описанных далее в прил. 6, следует схему одного, например, второго, перевернуть так, чтобы сопротивление из верхнего продольного плеча было перенесено в нижнее плечо (рис. П5.2, б). Параллельное и каскадное соединения указанных четырёхполюсников регулярно без изменения их схем (рис. П5.2, а и д). Для регулярности последовательно-параллельного соединения требуется скрестить входные зажимы одного, например, второго четырёхполюсника (рис. П5.2, в). При этом изменяются направления тока и напряжения на входе скрещенного четырёхполюсника по отношению к входному току и напряжению этого соединения. Поэтому при сложении матриц Н-параметров этих четырёхполюсников следует изменить знаки параметров <u>H₁₂</u> и <u>H₂₁</u> скрещенного четырёхполюсника. Для регулярности параллельно-последовательного соединения требуется скрестить выходные зажимы одного, например, второго четырёхполюсника, а при сложении матриц G-параметров этих четырехполюсников необходимо изменить знаки G₁₂ и G₂₁ четырёхполюсника со скрещенными выводами.



приложение 6

В-параметры Т- и П-образного четырёхполюсников. Связь между параметрами четырёхполюсников

На рис. Пб.1 приведены схемы Т- и П-образного четырёхполюсников, используемых в восьмой лабораторной работе. Здесь же представлены аналитические выражения для Впараметров этих четырёхполюсников.

Соотношения между первичными параметрами произвольного линейного четырёхполюсника отражены в табл. П6.1. Символом Δ в табл. П6.1 обозначен определитель соответствующей матрицы первичных параметров чётырехполюсника, например, для матрицы В-параметров указанный определитель будет иметь вид: $\Delta \underline{B} = \underline{B}_{11} \cdot \underline{B}_{22} - \underline{B}_{21} \cdot \underline{B}_{12}$.

приложение 7

R_1 R₃ R_2 R_2 R₃ $R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_3}$ $\frac{R_3}{R_2}$ R_1 R_1 $1 + \frac{R_1}{R_2}$ [<u>B</u>]= [<u>B</u>]= R_1 R. R, $R_{2} \cdot R_{2}$ Рис. П6.1

Таблица П6.1

	,					
	[<u>Z]</u>	[<u>Y]</u>	[<u>H]</u>	[<u>G]</u>	[<u>A</u>]	[<u>B]</u>
[<u>Z]</u>	$\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}}\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}}$	$\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{\Delta \underline{Y}}} \frac{-\underline{Y}_{12}}{\underline{\Delta \underline{Y}}} \\ \frac{-\underline{Y}_{21}}{\underline{\Delta \underline{Y}}} \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{\Delta \underline{Y}}}$	$ \begin{array}{c} \underline{\Delta \underline{H}} & \underline{\underline{H}}_{12} \\ \underline{\underline{H}}_{22} & \underline{\underline{H}}_{22} \\ -\underline{\underline{H}}_{21} & \underline{\underline{1}} \\ \underline{\underline{H}}_{22} & \underline{\underline{H}}_{22} \end{array} $	$\frac{1}{\underline{G}_{11}} \frac{-\underline{G}_{12}}{\underline{G}_{11}}$ $\frac{\underline{G}_{21}}{\underline{G}_{11}} \frac{\underline{\Delta}\underline{G}}{\underline{G}_{11}}$	$\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}} \frac{\underline{A}\underline{A}}{\underline{A}_{21}}$ $\frac{1}{\underline{A}_{21}} \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}}$	$\frac{\underline{B}_{22}}{\underline{B}_{21}} \frac{1}{\underline{B}_{21}}$ $\frac{\underline{\Delta B}}{\underline{B}_{21}} \frac{\underline{B}_{11}}{\underline{B}_{21}}$
[<u>Y</u>]	$\begin{array}{c c} \underline{\underline{Z}}_{22} & \underline{-\underline{Z}}_{12} \\ \underline{\Delta}\underline{Z} & \underline{\Delta}\underline{Z} \\ \underline{-\underline{Z}}_{21} & \underline{Z}_{11} \\ \underline{\Delta}\underline{Z} & \underline{\Delta}\underline{Z} \end{array}$	$\frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}}\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{21}}$	$\begin{array}{c} \frac{1}{\underline{H}_{11}} & \frac{-\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{11}} \\ \frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{11}} & \frac{\underline{\Delta}\underline{H}}{\underline{H}_{11}} \end{array}$	$\frac{\Delta \underline{G}}{\underline{G}_{22}} \frac{\underline{G}_{12}}{\underline{G}_{22}}$ $\frac{-\underline{G}_{21}}{\underline{G}_{22}} \frac{1}{\underline{G}_{22}}$	$\frac{\underline{\underline{A}}_{22}}{\underline{\underline{A}}_{12}} \frac{-\underline{\Delta}\underline{\underline{A}}}{\underline{\underline{A}}_{12}}$ $\frac{-1}{\underline{\underline{A}}_{12}} \frac{\underline{\underline{A}}_{11}}{\underline{\underline{A}}_{12}}$	$ \begin{array}{c c} \underline{\underline{B}}_{11} & \underline{-1} \\ \underline{\underline{B}}_{12} & \underline{\underline{B}}_{12} \\ \underline{-\Delta \underline{B}} & \underline{\underline{B}}_{22} \\ \underline{\underline{B}}_{12} & \underline{\underline{B}}_{12} \end{array} $
[<u>H]</u>	$ \frac{\underline{\Delta \underline{Z}}}{\underline{\underline{Z}}_{22}} \frac{\underline{\underline{Z}}_{12}}{\underline{\underline{Z}}_{22}} \\ \frac{-\underline{\underline{Z}}_{21}}{\underline{\underline{Z}}_{22}} \frac{1}{\underline{\underline{Z}}_{22}} $	$\frac{\frac{1}{\underline{Y}_{11}} - \underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11}}$ $\frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{11}} - \frac{\underline{A}\underline{Y}}{\underline{Y}_{11}}$	$ \underline{\underline{H}}_{11} \ \underline{\underline{H}}_{12} \\ \underline{\underline{H}}_{21} \ \underline{\underline{H}}_{22} $	$\begin{array}{c} \underline{\underline{G}}_{22} & \underline{-\underline{G}}_{12} \\ \underline{\Delta\underline{G}} & \underline{\Delta\underline{G}} \\ \underline{-\underline{G}}_{21} & \underline{\underline{G}}_{11} \\ \underline{\underline{\Delta\underline{G}}} & \underline{\underline{\Delta\underline{G}}} \end{array}$	$\frac{\underline{\underline{A}}_{12}}{\underline{\underline{A}}_{22}} \frac{\underline{\underline{A}}\underline{\underline{A}}}{\underline{\underline{A}}_{22}}$ $\frac{-1}{\underline{\underline{A}}_{22}} \frac{\underline{\underline{A}}_{21}}{\underline{\underline{A}}_{22}}$	$\frac{\underline{B}_{12}}{\underline{B}_{11}} \frac{\underline{1}}{\underline{B}_{11}}$ $-\underline{\Delta \underline{B}}_{\underline{1}1} \underline{\underline{B}}_{\underline{1}1}$ $\underline{\underline{B}}_{\underline{1}1} \underline{\underline{B}}_{\underline{1}1}$
[<u>G]</u>	$\frac{1}{\underline{Z}_{11}} \frac{-\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}}$ $\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11}} \frac{\underline{\Delta}\underline{Z}}{\underline{Z}_{11}}$	$\begin{array}{c c} \underline{\Delta \underline{Y}} & \underline{Y}_{12} \\ \hline \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{22} \\ \hline -\underline{Y}_{21} & \underline{1} \\ \hline \underline{Y}_{22} & \underline{Y}_{22} \end{array}$	$\begin{array}{c c} \underline{\underline{H}}_{22} & \underline{-\underline{\underline{H}}}_{12} \\ \underline{\underline{\Delta}}\underline{\underline{H}} & \underline{\underline{\Delta}}\underline{\underline{H}} \\ \underline{-\underline{\underline{H}}}_{21} & \underline{\underline{H}}_{11} \\ \underline{\underline{\Delta}}\underline{\underline{H}} & \underline{\underline{\Delta}}\underline{\underline{H}} \end{array}$	$\begin{array}{c}\underline{G}_{11} \ \underline{G}_{12} \\ \underline{G}_{21} \ \underline{G}_{22} \end{array}$	$\frac{\underline{\underline{A}}_{21}}{\underline{\underline{A}}_{11}} \frac{-\underline{\underline{A}}\underline{\underline{A}}}{\underline{\underline{A}}_{11}}$ $\frac{\underline{1}}{\underline{\underline{A}}_{11}} \frac{\underline{\underline{A}}_{12}}{\underline{\underline{A}}_{11}}$	$\begin{array}{c c} \underline{\underline{B}}_{21} & \underline{-1} \\ \underline{\underline{B}}_{22} & \underline{\underline{B}}_{22} \\ \underline{\underline{A}}\underline{\underline{B}} & \underline{\underline{B}}_{12} \\ \underline{\underline{B}}_{22} & \underline{\underline{B}}_{22} \end{array}$
[<u>A</u>]	$\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} \frac{\underline{\Delta}\underline{Z}}{\underline{Z}_{21}}$ $\frac{1}{\underline{Z}_{21}} \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}}$	$\frac{-\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} \frac{-1}{\underline{Y}_{21}}$ $\frac{-\Delta \underline{Y}}{\underline{Y}_{21}} \frac{-\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}}$	$\frac{-\Delta \underline{\mathbf{H}}}{\underline{\mathbf{H}}_{21}} \frac{-\underline{\mathbf{H}}_{11}}{\underline{\mathbf{H}}_{21}}$ $\frac{-\underline{\mathbf{H}}_{22}}{\underline{\mathbf{H}}_{21}} \frac{-1}{\underline{\mathbf{H}}_{21}}$	$ \frac{1}{\underline{G}_{21}} \frac{\underline{G}_{22}}{\underline{G}_{21}} $ $ \frac{\underline{G}_{11}}{\underline{G}_{21}} \frac{\underline{\Delta}\underline{G}}{\underline{G}_{21}} $	$\underline{\underline{A}}_{11} \ \underline{\underline{A}}_{12}$ $\underline{\underline{A}}_{21} \ \underline{\underline{A}}_{22}$	$ \begin{array}{c} \underline{B}_{22} & \underline{B}_{12} \\ \underline{\Delta B} & \underline{\Delta B} \\ \underline{B}_{21} & \underline{B}_{11} \\ \underline{\Delta B} & \underline{\Delta B} \end{array} $

Связь между первичными параметрами четырёхполюсников

Пример оформления отчёта по лабораторной работе

Лабораторная работа № 2 по дисциплине "Основы теории цепей" (3-й семестр)	Группа Ф.И.О.
ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЦЕПИ И ИХ СОЕДИНЕНИИ	Вариант №
II	

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

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

	Амплитуда колебаний источника	Em	В
e(t)	Частота колебаний источника	f	кГц
	Сопротивление	R	кОм
	Индуктивность	L	мГн
$TC = u_C(t) $	Ёмкость	С	нΦ

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

Расчёт сопротивлений элементов Н	R,L,C и полного о	сопротивления RLC-цепи	
Период колебаний в цепи	$T_{\Pi} = 1/f$		

период колеоании в цени	$I_{\Pi} = 1/1$	MKC
Угловая частота колебаний в цепи	$\omega = 2\pi \cdot \mathbf{f}$	рад/с
Реактивное сопротивл. индуктивности	$x_L = \omega \cdot L$	Ом
Реактивное сопротивл. ёмкости	$x_{\rm C} = 1/(\omega \cdot C)$	Ом
Полное сопротивление RLC-цепи	$z = \sqrt{R^2 + (x_L \ x_C)^2}$	Ом

Сопротивления элементов R,L,С и полное сопротивление цепи							
R, Ом x_L , Ом x_C , Ом z , Ом z_{H3M} , Ом $\delta_{Z\%}$, %							

Амплитуды тока и напряжений на элементах R,L,С и на всей RLC-цепи

Ід, мА	I _m , мА	U_{mR}, B	U_{mL}, \mathbf{B}	U_{mC}, \mathbf{B}	U_m, B	$U_{m\boldsymbol{\Sigma}}, \mathbf{B}$	$\delta_{U\%},\%$

Расчёт показателей RLC-цепи на основе экспериментально измеренных значений

Амплитуда напряжения на RLC-цепи $U_{m\Sigma} = \sqrt{U_{mR}^2 + (U_{mL} - U_{mC})^2}$	В
Относительная погрешность $\delta_{U\%} = 100\% \cdot U_{m\Sigma} - U_m / U_m$	%
Оценка полного сопротивления цепи $z_{\rm H3M} = U_m/I_m$	Ом
Относительная погрешность $\delta_{Z\%} = 100\% \cdot z_{H3M} - z /z$	%

Выводы

2. Исследование фазовых соотношений между колебаниями в RLC-цепи

Осциллограммы напряжений на RLC-цепи u(t) и на сопротивлении u _R (t)								
Фазовые соотношения между напряжениями на элементах RLC-цепи								
Δt_{R} , мкс	$\phi_{R},^{\circ}$	Δt_L , мкс	$\phi_L,^\circ$	$\Delta t_{\rm C}$, мкс	φ _C ,°			

	Начальные фазы гармонических колебаний в RLC-цепи						
	Ψυ,°	$\psi_{i,}^{\circ}$	$\psi_{R},^{\circ}$	ΨL,°	Ψc,°		
	0						
Характер сопротивления цепи — , сдвиг фаз $\phi = \psi_{11} - \psi_1$;					$\psi_{\rm U} - \psi_{\rm i} = $		
Выводы	-						

3. Обработка и верификация экспериментально полученных результатов



Мощность, расходуемая в RLC-цепи:

1) $P_1 = \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi =$ _____

2) $P_2 = \frac{1}{2} \cdot I_m^2 \cdot R =$ _____

Расчёт методом комплексных амплитуд тока и напряжений на элементах цепи

$\underline{\mathbf{z}}_{\mathrm{L}} = \mathbf{j}\mathbf{x}_{\mathrm{L}} = \mathbf{x}_{\mathrm{L}} \cdot \mathbf{e}^{\mathbf{j}90^{\circ}}$	$\underline{z}_{C} = -jx_{C} = x_{C} \cdot e^{-j90^{\circ}}$
$\underline{z}_{\Im} = \underline{z}_{R} + \underline{z}_{L} + \underline{z}_{C}$	
$\dot{I}_m = \dot{E}_m / \underline{z}_{\mathfrak{D}}$	$\dot{U}_{mR}{=}\dot{I}_m{\cdot}\underline{z}_R$
$\dot{U}_{mL} {=} \dot{I}_m {\cdot} \underline{z}_L$	$\dot{U}_{mC} = \dot{I}_m \cdot \underline{z}_C$

Амплитуды и начальные фазы гармонических колебаний в RLC-цепи

Величина	I _m , мА	ψ_{i} ,°	U_{mR}, B	$\psi_{R},^{\circ}$	U_{mL}, \mathbf{B}	$\psi_L,^\circ$	U_{mC}, B	$\psi_{c},^{\circ}$
Измерения								
Расчёт								
Выводы								

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Указания по технике безопасности при выполнении	
лабораторных работ	4
Лабораторная работа № 1. Элементы и законы	
электрических цепей	5
Лабораторная работа № 2. Гармонические колебания	
в пассивных элементах цепи и их соединении	12
Лабораторная работа № 3. Принцип наложения	
и теорема об эквивалентном источнике	22
Лабораторная работа № 4. Частотные характеристики	
линейных цепей	29
Лабораторная работа № 5. Вынужденные колебания	
в последовательном контуре	36
Лабораторная работа № 6. Свободные процессы	
в линейных цепях	42
Лабораторная работа № 7. Временные	
характеристики линейных избирательных цепей	50
Лабораторная работа № 8. Частотные спектры	
типовых периодических процессов	58
Лабораторная работа № 9. Линейные	
четырёхполюсники и их соединения	63
Заключение	71
Библиографический список	72
Приложение 1. Правила округления числовых	
результатов измерений и расчётов	73
Приложение 2. Методика настройки и практического	
применения источника напряжения и осциллографа	74
Приложение 3. Методика получения спектральных	
диаграмм временных процессов в контрольных точках	79
Приложение 4. Определение первичных параметров	
четырёхполюсника по опытам холостого хода и короткого	
замыкания	80

Учебное издание

Останков Александр Витальевич

АНАЛИЗ УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ: ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Подписано в печать 28.03.2018. Формат 60×84 1/16. Бумага для множительных аппаратов. Усл. печ. л. 5,3. Тираж 250 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» 394026 Воронеж, Московский проспект, 143

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