

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 5 - 8
по дисциплине "Основы теории цепей"
для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные
системы и комплексы" очной формы обучения

Составитель **Останков Александр Витальевич**

Подписано в печать 26.03.2018.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,5. Тираж 45 экз. «С» 7.

Зак. № 40.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический
университет"

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ

394026 Воронеж, Московский проспект, 14

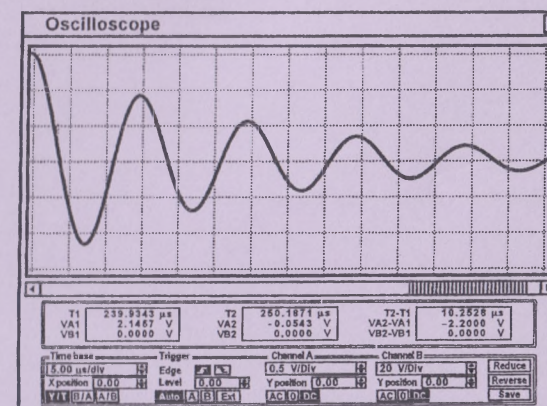
ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический
университет"

Кафедра радиотехники

44-2018

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам № 5 - 8
по дисциплине "Основы теории цепей"
для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные
системы и комплексы" очной формы обучения



Воронеж 2018

УДК 621.372.01

ББК 31.211я73

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

Методические указания к лабораторным работам № 5 - 8 по дисциплине "Основы теории цепей" для студентов специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" очной формы обучения / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост. А.В. Останков. - Воронеж, 2018. - 37 с.

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

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

Табл. 17. Ил. 7. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.372.01

ББК 31.211я73

Рецензент канд. техн. наук, доц. В.П. Литвиненко

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

© ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет", 2018.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Методические указания содержат описание заключительных четырёх исследовательских работ лабораторного практикума по дисциплине "Основы теории цепей", выполняемых в IV-м семестре студентами специальности 11.05.01 "Радиоэлектронные системы и комплексы" специализации "Радиоэлектронные системы передачи информации" очной формы обучения. В описание каждой работы включены индивидуальные исходные данные, задание, описание методики проведения исследований, контрольные вопросы к защите, постраничные ссылки на литературу, список которой приведён в конце.

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 лабораторной работы студент должен оформить по результатам исследований индивидуальный отчёт и защитить работу.

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

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

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

Дополнительные положения расширенной инструкции по технике безопасности:

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

Лабораторная работа № 5

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. 1).

Загрузить схемный файл "Lab_Rab_5.ewb". Сравнить его наполнение со схемой на рис. 1. Уяснить назначение подключенных к колебательному контуру приборов.

По номеру варианта (N_0) рассчитать параметры элементов L и C контура: $L = 640 \cdot (N_0 + 15) / (40 - N_0)$ в мкГн (округлить до единиц мкГн); $C = 1600 / [(N_0 + 15) \cdot (40 - N_0)]$ 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): $R_s = 0.2 \cdot (N_0 + 15)^2$ 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. 1. Результаты расчёта f_0 (в кГц), Π_f (в кГц) и Q округлить до десятых долей и внести в табл. 1.

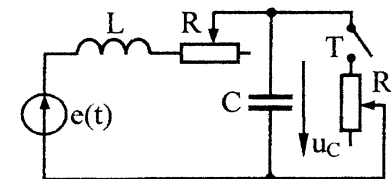


Рис. 1

Таблица 1

Расчётные значения параметров колебательного контура

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

Рассчитать и внести в первую строку табл. 2 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 В, 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 визир, снять АЧХ и ФЧХ контура на частотах, указанных в первой строке табл. 2. Полученные данные внести в табл. 2, причём все значения ФЧХ увеличить на 90° . По данным табл. 2 построить графики АЧХ и ФЧХ.

Таблица 2

Частотные характеристики колебательного контура

f, кГц											
$K_U(f)$											
$\varphi(f), ^\circ$											

Используя визир, определить по частотным характеристикам экспериментальное значение резонансной частоты контура. Внести измеренное значение в табл. 3 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. 3 и сравнить с расчётной добротностью.

Используя визир, измерить полосу пропускания контура по уровню 0.707 от максимального значения АЧХ. Внести её значение в табл. 3, сравнить с расчётным значением и указать стрелкой "влево - вправо" на графике АЧХ.

Таблица 3

Сравнение расчётных и измеренных значений параметров

Способ получения	Параметры колебательного контура:		
	f_0 , кГц	Π_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. 2. 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. 4 и сравнить с предыдущими. Сделать вывод о влиянии сопротивления потерь на характеристики контура.

Таблица 4

Параметры контура при увеличении потерь и наличии шунта

Условия получения	Параметры колебательного контура:		
	f_0 , кГц	f_0 , кГц	f_0 , кГц
$R = 15 \text{ Ом}$			
$R_S = \text{кОм}$			
$R_S = \text{кОм}$			

3. Исследование влияния шунтирующего сопротивления на характеристики контура

Установить исходную величину сопротивления потерь колебательного контура $R = 10 \text{ Ом}$.

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. 2. 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. 4 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" = $[f_0 - (1/2 N_2 + 6) \cdot \Pi_f]$, "End frequency" = $[f_0 + (1/2 N_2 + 6) \cdot \Pi_f]$. Получить АЧХ контура. По АЧХ определить с помощью визиров резонансную частоту (будет несколько отличаться от исходной частоты!), добротность и полосу пропускания контура. Результаты внести в табл. 4 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. 2), содержащую:

а) RC-цепь, состоящую из ёмкости C и сопротивления R_1 ;
б) колебательный контур или RLC-цепь, содержащую ёмкость C , индуктивность L и сопротивление R_2 ;

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

г) ключ (Т) для изменения конфигурации цепи: в нижнем положении к ёмкости подключено сопротивление R_1 , в верхнем положении — индуктивность L и сопротивление R_2 .

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, подключённых к цепи.

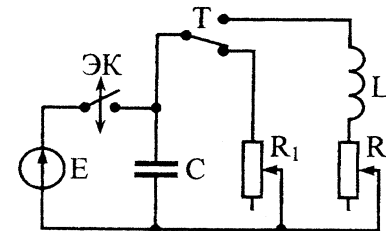


Рис. 2

По номеру варианта (№) рассчитать параметры реактивных элементов C и L схемы: $C = 2 \cdot \text{№}$ в нФ, $L = 4/5 \cdot \text{№}$ в мГн.

Установить расчётные значения элементов C и L, параметры сопротивлений — $R_1 = 10$ кОм и $R_2 = 80$ Ом — 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. 3).

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 $10 \cdot \text{№}$ мкс (смещение по времени смотреть в позиции "T2 - T1"), фиксировать в позиции "VA2" значения напряжения на ёмкости (рис. 3). Результаты измерения временной диаграммы внести в табл. 5.

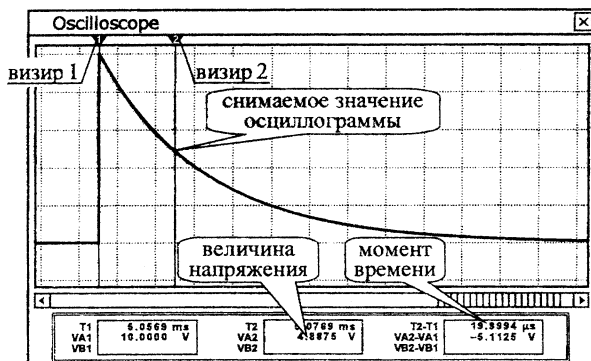


Рис. 3

По значениям из табл. 5 изобразить в масштабе график временной диаграммы 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 $e = 2.72$ 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 "T2 - T1" будет определять постоянную времени цепи $\hat{\tau}_{RC}$. Результат измерения $\hat{\tau}_{RC}$ внести в табл. 6 и отобразить на графике.

Рассчитать теоретическую величину постоянной времени $\tau_{RC} = R_1 \cdot C$, внести её значение в табл. 6 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. 5. Изобразить график свободного процесса в той же системе координат, что и график для исходного значения сопротивления R_1 .

По осциллограмме вновь определить постоянную времени цепи $\hat{\tau}_{RC}$, внести полученное значение в табл. 6 и отобразить на графике. Найти расчётное значение постоянной времени τ_{RC} , которое также внести в табл. 6.

Таблица 5

Свободные процессы в RC-цепи

t, мкс	u _C , В при R ₁ = ...	
	10 кОм	5 кОм
0	10	10
$10 \cdot \text{№} = \dots$		
$20 \cdot \text{№} = \dots$		
$30 \cdot \text{№} = \dots$		
$40 \cdot \text{№} = \dots$		

Таблица 6

Постоянная времени RC-цепи

R ₁ , кОм	$\hat{\tau}_{RC}$, мкс	τ_{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. 4). Результаты внести в табл. 7.

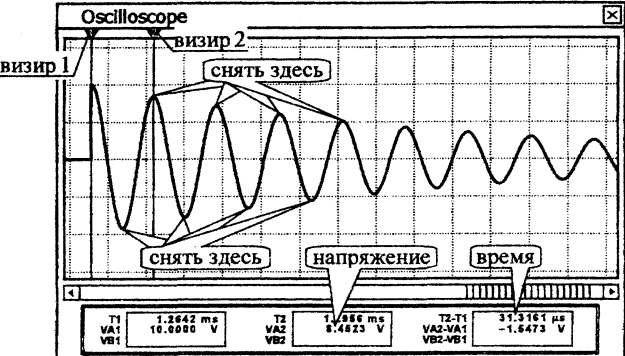


Рис. 4

Таблица 7

Свободный процесс в RLC-цепи при R ₂ = 80 Ом								
t, мкс	0							
u _c , В	10							

По осциллограмме напряжения определить декремент затухания $\hat{\Delta}$ — отношение пиков колебания, разделённых периодом (рис. 5). 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.

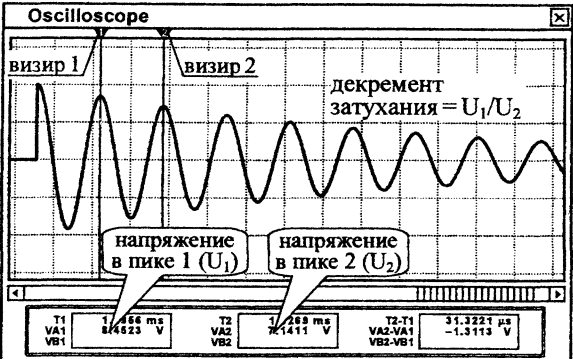


Рис. 5

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. 6). Определить по графику постоянную времени контура $\hat{\tau}_k$ — время, соответствующее точке пересечения огибающей амплитуд свободного процесса и уровня, в e раз меньшего начального значения. Внести значение $\hat{\tau}_k$ в отчёт.

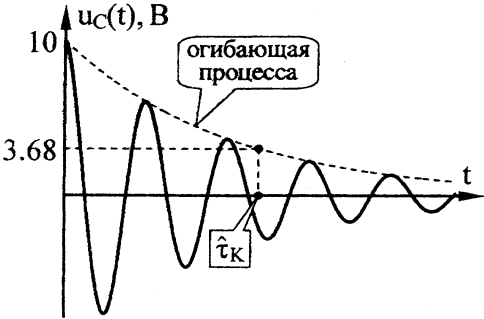


Рис. 6

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

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. 7. Изобразить в отчёте осциллограмму напряжения на ёмкости при увеличенном вдвое сопротивлении потерь R_2 .

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 $\hat{\tau}_k$. 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 $\tau_k = 2 \cdot L / R_2$, 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. 8. Сравнить экспериментально определённые значения параметров контура с расчётными значениями. Сделать вывод.

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

Таблица 8

Сравнение экспериментальных и расчётных значений параметров колебательного режима свободного процесса

R_2 , Ом	Постоянная времени, мкс		Добротность		Лог. декремент затухания	
	$\hat{\tau}_k$	τ_k	$\hat{Q}$	Q	$\hat{\Theta}$	Θ
80						
160						

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

Снять временную диаграмму напряжения на ёмкости, при этом фиксировать значения колебания с шагом $4 \cdot N_0$ мкс. Результаты внести в табл. 9. Изобразить в отчёте осциллограмму напряжения. Сделать вывод о характере свободного процесса.

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

Вновь снять временную диаграмму напряжения на ёмкости с шагом $4 \cdot N_0$ мкс. Результаты внести в табл. 9. Изобразить осциллограмму в той же системе координат, что и предыдущий график. Сделать вывод о характере свободного процесса.

Увеличить втрое сопротивление R_2 (по сравнению с $R_{2\text{кр}}$) и, тем самым, обеспечить проявление в контуре апериодического режима свободного процесса. Снять полученную осциллограмму напряжения, внести её значения в табл. 9 и изобразить график поверх предыдущих осциллограмм. Сделать вывод о влиянии величины сопротивления потерь контура на продолжительность апериодического разряда ёмкости.

Таблица 9

Процессы в контуре при больших потерях

t , мкс	u_C , В при $R_2 = \dots$		
	$\frac{1}{3} R_{2\text{кр}}$	$R_{2\text{кр}}$	$3 R_{2\text{кр}}$
0	10	10	10
$4 \cdot N_0 = \dots$			
$8 \cdot N_0 = \dots$			
$12 \cdot N_0 = \dots$			
$16 \cdot N_0 = \dots$			

Контрольные вопросы к защите работы

1. При каких условиях в электрических цепях могут наблюдаться свободные процессы? Является ли свободный про-

цесс 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 RC-цепи 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 $\tau_k = 2 \cdot L/R$?

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

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) $F_n = N_0$ кГц;
- процент заполнения периода импульсом (Duty cycle), равный $100/q$, где $q = 5$ — скважность последовательности;
- высоту импульсов (Amplitude) $A_m = 30 - N_0$ В и смещение импульсов по вертикали (Offset) $A_0 = 30 - N_0$ В.

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. 1), 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 $n \cdot F_{\Pi}$ (n — номер гармоники) с помощью визиров, активируя их кнопками "Toggle Cursors". Значения внести в табл. 10. Спектр (амплитуд, фаз) и осциллограмму процесса привести в отчёте.

Таблица 10
Гармонический спектр амплитуд и фаз исходной периодической последовательности прямоугольных импульсов

$n \cdot F_{\Pi}$, кГц	0									
U_{mn} , В										
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. 10). 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. 10. 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 10^4 .

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 преобразованиям 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].

ЛИНЕЙНЫЕ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКИ И ИХ СОЕДИНЕНИЯ

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

Задания и указания по их выполнению

Загрузить схемный файл в соответствии с номером варианта и табл. 11. Установить по табл. 12 значения параметров элементов первого и второго четырёхполосника.

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 четырёхполосника. 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 четырёхполосника.

Таблица 11

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

Исходные данные для выполнения восьмой работы

№	Параметры	Первый четырёхполосник				Второй четырёхполосник				Вид соединения
		Схема	R' ₁ , Ом	R' ₂ , Ом	R' ₃ , Ом	Схема	R'' ₁ , Ом	R'' ₂ , Ом	R'' ₃ , Ом	
1	[A]	T	40	890	190	П	349	3863	785	каскад.
2	[Z]	П	240	1120	5285	T	42	702	229	послед.
3	[Y]	T	230	700	40	T	76	572	332	паралл.
4	[H]	П	285	4720	875	T	41	890	192	посл.-пар.
5	[G]	T	65	585	155	П	521	753	2446	пар.-посл.
6	[A]	П	235	890	2185	T	56	781	243	каскад.
7	[Z]	T	345	645	20	T	358	1373	11.8	послед.
8	[Y]	П	325	2165	1485	T	132	910	207	паралл.
9	[H]	T	155	670	190	П	349	3863	785	посл.-пар.
10	[G]	П	385	1380	1675	T	42	702	229	пар.-посл.
11	[A]	T	50	985	205	T	76	572	332	каскад.
12	[Z]	П	265	1295	5010	T	41	890	192	послед.
13	[Y]	T	210	720	65	П	521	753	2446	паралл.
14	[H]	П	290	3370	995	T	56	781	243	посл.-пар.
15	[G]	T	285	705	85	T	358	1373	11.8	пар.-посл.
16	[A]	П	405	3320	1010	T	132	910	207	каскад.
17	[Z]	T	70	755	335	П	349	3863	785	послед.
18	[Y]	П	435	485	4710	T	42	702	229	паралл.
19	[H]	T	60	910	170	T	76	572	332	посл.-пар.
20	[G]	П	245	1310	3545	T	41	890	192	пар.-посл.
21	[A]	T	65	1080	215	П	521	753	2446	каскад.
22	[Z]	П	295	1470	4915	T	56	781	243	послед.

Продолжение табл. 12

№	Параметры	Первый четырёхполюсник				Второй четырёхполюсник				Вид соедине- ния
		Схе- ма	R' ₁ , Ом	R' ₂ , Ом	R' ₃ , Ом	Схе- ма	R'' ₁ , Ом	R'' ₂ , Ом	R'' ₃ , Ом	
23	[Y]	Т	220	765	70	Т	358	1373	11.8	паралл.
24	[H]	П	310	3365	1085	Т	132	910	207	посл.-пар.
25	[G]	Т	255	735	125	П	349	3863	785	пар.-посл.
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	посл.-пар.
30	[G]	Т	230	765	160	Т	56	781	243	пар.-посл.

Спаренный ключ S₃ осуществляет выбор той пары зажимов четырёхполюсника (1 - 1' или 2 - 2'), к которой необходимо подключить источник гармонических колебаний. Амперметр А₃ 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. 13 и заданной системой первичных параметров. Результаты измерений свести в табл. 13, оста-

вив в ней только те строки, которые соответствуют заданной по номеру варианта системе параметров четырёхполюсников.

Таблица 13

Результаты измерений для первого четырёхполюсника

Первич- ные па- раметры	Зажимы для подключения источника	Выходные зажимы и их режим работы	U ₁ , В	I ₁ , мА	U ₂ , В	I ₂ , мА
[A]	1 - 1'	2 - 2' — XX				0
	1 - 1'	2 - 2' — КЗ			0	
[Z]	1 - 1'	2 - 2' — XX				0
	2 - 2'	1 - 1' — XX		0		
[Y]	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
	2 - 2'	1 - 1' — КЗ	0			

XX — холостой ход; КЗ — короткое замыкание

По данным табл. 13 и известным соотношениям (прил. 2) определить экспериментальные значения указанных в табл. 12 первичных параметров первого четырёхполюсника. Внести формулы для их определения и полученные на основе формул значения параметров в табл. 14.

Таблица 14

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. 13. Определить экспериментальные значения первичных параметров второго четырёхполюсника. Внести их в таблицу, аналогичную табл. 14.

Объединить первый и второй четырёхполюсники в соответствии с заданным в табл. 12 видом соединения (прил. 3). Учесть необходимость обеспечения регулярности соединения (за счёт переворачивания схемы второго четырёхполюсника или скрещивания его входных или выходных зажимов) при последовательном, последовательно-параллельном и параллельно-последовательном соединениях четырёхполюсников (прил. 3). 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. 13. На их основе определить экспериментальные значения первичных параметров составного четырёхполюсника. Внести их в таблицу, аналогичную табл. 14.

2. Теоретический расчёт первичных параметров четырёхполюсников и их соединения

На основе заданных в табл. 12 значений параметров схемных элементов четырёхполюсников и точных аналитических выражений, представленных в прил. 4, рассчитать В-параметры первого и второго четырёхполюсников и внести их в таблицы, аналогичные табл. 15.

Таблица 15

В-параметры первого четырёхполюсника

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

Используя формулы связи первичных параметров линейного четырёхполюсника (прил. 4), рассчитать по найденным В-параметрам заданные в табл. 12 параметры первого и второго четырёхполюсников. Результаты расчётов внести в таблицы, аналогичные табл. 16. В нижнюю строку таблиц внести измеренные в п. 1 экспериментальные значения. Сравнить расчётные и экспериментальные значения.

Таблица 16

.....-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. 12 соединения). Результаты расчёта первичных параметров внести в табл. 17, в которой предусмотреть и заполнить строку с экспериментально измеренными значениями. Сравнить результаты расчёта и экспериментальных измерений первичных параметров составного четырёхполюсника. Сделать выводы.

Таблица 17

.....-параметры составного четырёхполосника

Обозначение параметра				
Единица измерения				
Формула расчёта				
Расчётное значение				
Экспериментальное значение				

Контрольные вопросы к защите работы

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

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

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

4. Записать в матричной форме уравнения линейного четырёхполосника с использованием H-, G- и B-параметров. Указать физический смысл всех первичных параметров.

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

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

7. Какой четырёхполосник называют симметричным? Привести соотношения, связывающие первичные параметры симметричного четырёхполосника.

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

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

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

11. Как определить первичные параметры соединения четырёхполосников (составного четырёхполосника)?

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

13. Параметры какого соединения четырёхполосников можно найти на основе B-параметров? Рассчитать A-параметры такого соединения на основе B-параметров рассмотренных в работе четырёхполосников.

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

15. Рассчитать указанную преподавателем матрицу первичных параметров четырёхполосника, схема которого показана на рис. 7.

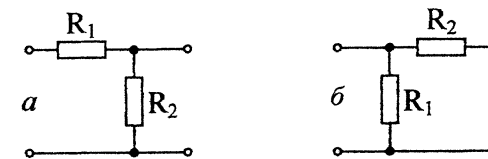


Рис. 7.

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

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. П1):

— 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).

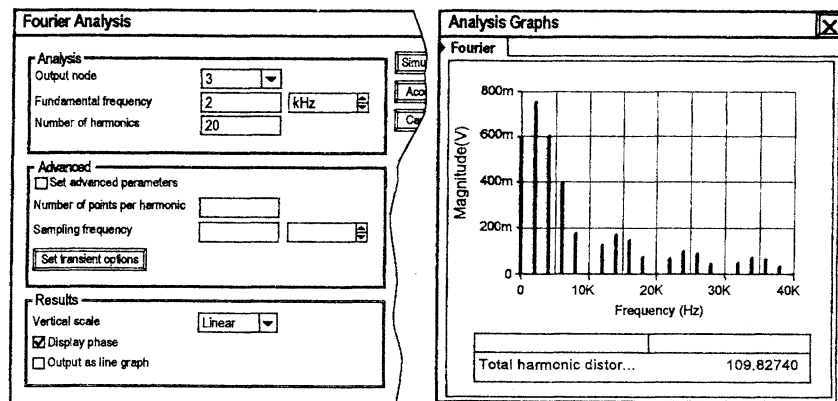


Рис. П1

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 четырёхполюсника (рис. П2) могут быть связаны шестью формами системы алгебраических уравнений (табл. П1). Первичные параметры четырёхполюсника, фигурирующие в этих системах уравнений, могут быть измерены экспериментально на основе опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) соответствующих зажимов четырёхполюсника.

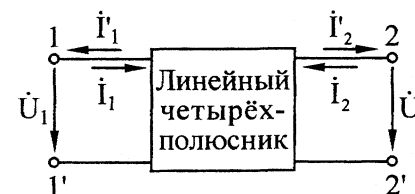


Рис. П2

Таблица П1

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

[Z]	[Y]	[H]
$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot Z_{11} + \dot{I}_2 \cdot Z_{12} \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \cdot Z_{21} + \dot{I}_2 \cdot Z_{22} \end{cases}$	$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 \cdot Y_{11} + \dot{U}_2 \cdot Y_{12} \\ \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \cdot Y_{21} + \dot{U}_2 \cdot Y_{22} \end{cases}$	$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 \cdot H_{11} + \dot{U}_2 \cdot H_{12} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_1 \cdot H_{21} + \dot{U}_2 \cdot H_{22} \end{cases}$
$Z_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 _{2-2'-XX}$	$Y_{11} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 _{2-2'-K3}$	$H_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 _{2-2'-K3}$
$Z_{12} = \dot{U}_1 / \dot{I}_2 _{1-1'-XX}$	$Y_{12} = \dot{I}_1 / \dot{U}_2 _{1-1'-K3}$	$H_{12} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2 _{1-1'-XX}$
$Z_{21} = \dot{U}_2 / \dot{I}_1 _{2-2'-XX}$	$Y_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 _{2-2'-K3}$	$H_{21} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1 _{2-2'-K3}$
$Z_{22} = \dot{U}_2 / \dot{I}_2 _{1-1'-XX}$	$Y_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 _{1-1'-K3}$	$H_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 _{1-1'-XX}$

[G]	[A]	[B]
$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dot{U}_1 \cdot \underline{G}_{11} + \dot{I}_2 \cdot \underline{G}_{12} \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cdot \underline{G}_{21} + \dot{I}_2 \cdot \underline{G}_{22} \end{cases}$	$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot \underline{A}_{11} + \dot{I}_2 \cdot \underline{A}_{12} \\ \dot{I}_1 = \dot{U}_2 \cdot \underline{A}_{21} + \dot{I}_2 \cdot \underline{A}_{22} \end{cases}$	$\begin{cases} \dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cdot \underline{B}_{11} + \dot{I}_1 \cdot \underline{B}_{12} \\ \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \cdot \underline{B}_{21} + \dot{I}_1 \cdot \underline{B}_{22} \end{cases}$
$\underline{G}_{11} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{A}_{11} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2 _{2-2'-XX}$	$\underline{B}_{11} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 _{1-1'-XX}$
$\underline{G}_{12} = \dot{I}_1 / \dot{I}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{A}_{12} = \dot{U}_1 / \dot{I}_2 _{2-2'-K3}$	$\underline{B}_{12} = \dot{U}_2 / \dot{I}_1 _{1-1'-K3}$
$\underline{G}_{21} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 _{2-2'-XX}$	$\underline{A}_{21} = \dot{I}_1 / \dot{U}_2 _{2-2'-XX}$	$\underline{B}_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 _{1-1'-XX}$
$\underline{G}_{22} = \dot{U}_2 / \dot{I}_2 _{1-1'-K3}$	$\underline{A}_{22} = \dot{I}_1 / \dot{I}_2 _{2-2'-K3}$	$\underline{B}_{22} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1 _{1-1'-K3}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Соединения четырёхполюсников и расчёт параметров составного четырёхполюсника

При соединении двух четырёхполюсников друг с другом образуется составной четырёхполюсник. Виды соединений (составных) четырёхполюсников показаны на рис. П3.

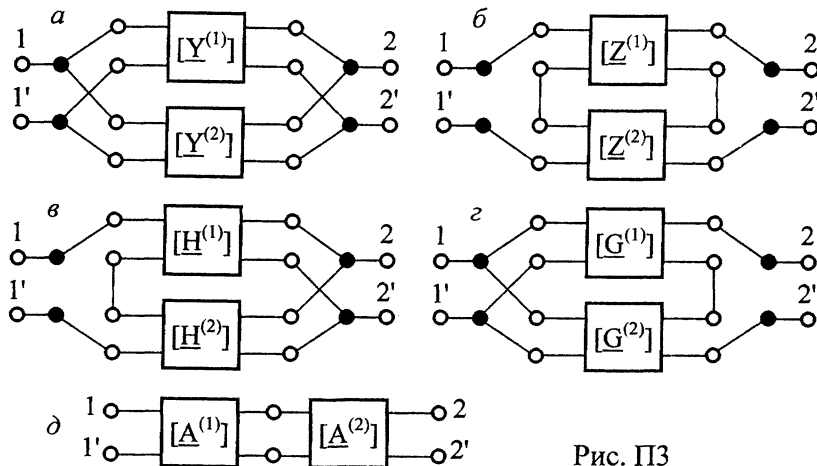


Рис. П3

В соответствии с рис. П3 различают следующие соединения четырёхполюсников:

- а) параллельное, при этом первичные параметры составного четырёхполюсника определяются как $[\underline{Y}] = [\underline{Y}^{(1)}] + [\underline{Y}^{(2)}]$;
- б) последовательное, при этом $[\underline{Z}] = [\underline{Z}^{(1)}] + [\underline{Z}^{(2)}]$;
- в) последовательно-параллельное, — $[\underline{H}] = [\underline{H}^{(1)}] + [\underline{H}^{(2)}]$;
- г) параллельно-последовательное, — $[\underline{G}] = [\underline{G}^{(1)}] + [\underline{G}^{(2)}]$;
- д) каскадное, при этом — $[\underline{A}] = [\underline{A}^{(1)}] \cdot [\underline{A}^{(2)}]$.

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. 4 и относящимся к так называемым "треугольным" четырёхполюсникам (с коротко соединёнными жазимами 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. 4, следует схему одного, например, второго, перевернуть так, чтобы сопротивление из верхнего продольного плеча было перенесено в нижнее плечо (рис. П4, б). Параллельное и каскадное соединения указанных четырёхполюсников регулярно без изменения их схем (рис. П4, а и д). Для регулярности последовательно-параллельного соединения требуется скрестить входные зажимы одного, например, второго четырёхполюсника (рис. П4, 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 $\underline{H}_{12}$ и $\underline{H}_{21}$ скрещенного четырёхполюсника. Для регулярности параллельно-последовательного соеди-

нения требуется скрестить выходные зажимы одного, например, второго четырёхполюсника, а при сложении матриц G-параметров этих четырёхполюсников необходимо изменить знаки $\underline{G}_{12}$ и $\underline{G}_{21}$ четырёхполюсника со скрещенными выводами.

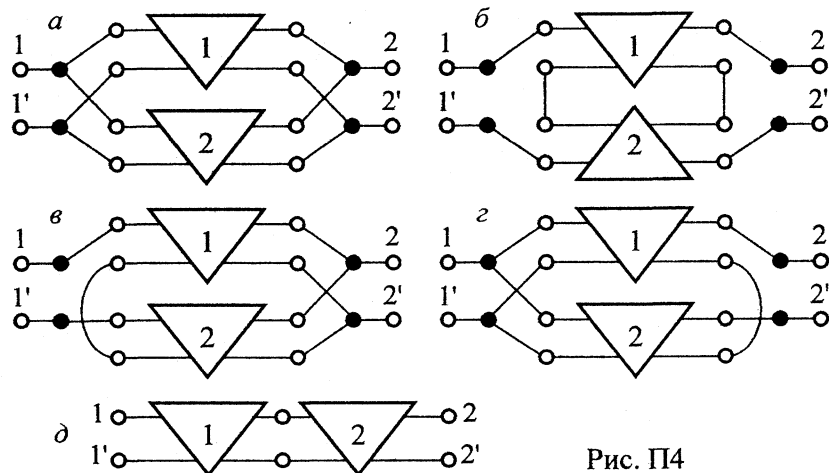


Рис. П4

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

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

На рис. П5 приведены схемы Т- и П-образного четырёхполюсников, используемых в восьмой лабораторной работе. Здесь же представлены аналитические выражения для В-параметров этих четырёхполюсников.

Соотношения между первичными параметрами произвольного линейного четырёхполюсника отражены в табл. П2. Символом Δ в табл. П2 обозначен определитель соответствующей матрицы первичных параметров четырёхполюсника, например, для матрицы В-параметров указанный определитель будет иметь вид: $\Delta \underline{B} = \underline{B}_{11} \cdot \underline{B}_{22} - \underline{B}_{21} \cdot \underline{B}_{12}$.

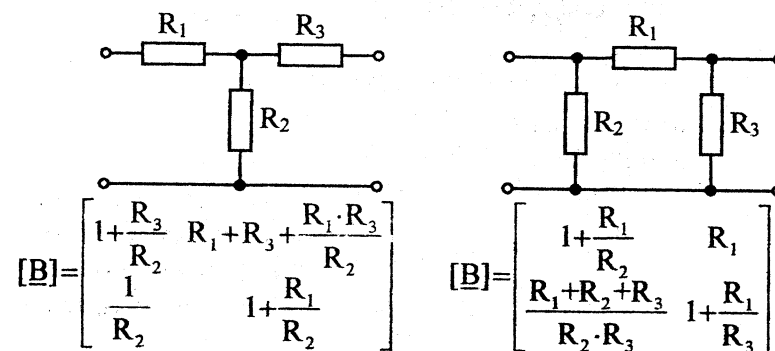


Рис. П5

Таблица П2

Связь между первичными параметрами четырёхполюсников

	$[Z]$	$[Y]$	$[H]$	$[G]$	$[A]$	$[B]$
$[Z]$	$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{Y_{22}}{\Delta Y} & -\frac{Y_{12}}{\Delta Y} \\ -\frac{Y_{21}}{\Delta Y} & \frac{Y_{11}}{\Delta Y} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta H}{H_{22}} & \frac{H_{12}}{H_{22}} \\ -\frac{H_{21}}{H_{22}} & \frac{1}{H_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{G_{11}} & -\frac{G_{12}}{G_{11}} \\ \frac{G_{21}}{G_{11}} & \frac{\Delta G}{G_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{11}}{A_{21}} & \frac{\Delta A}{A_{21}} \\ \frac{1}{A_{21}} & \frac{A_{22}}{A_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B_{22}}{B_{21}} & \frac{1}{B_{21}} \\ \frac{\Delta B}{B_{21}} & \frac{B_{11}}{B_{21}} \end{bmatrix}$
$[Y]$	$\begin{bmatrix} \frac{Z_{22}}{\Delta Z} & -\frac{Z_{12}}{\Delta Z} \\ -\frac{Z_{21}}{\Delta Z} & \frac{Z_{11}}{\Delta Z} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{H_{11}} & -\frac{H_{12}}{H_{11}} \\ \frac{H_{21}}{H_{11}} & \frac{\Delta H}{H_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta G}{G_{22}} & \frac{G_{12}}{G_{22}} \\ -\frac{G_{21}}{G_{22}} & \frac{1}{G_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{22}}{A_{12}} & -\frac{\Delta A}{A_{12}} \\ -\frac{1}{A_{12}} & \frac{A_{11}}{A_{12}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B_{11}}{B_{12}} & -\frac{1}{B_{12}} \\ -\frac{\Delta B}{B_{12}} & \frac{B_{22}}{B_{12}} \end{bmatrix}$
$[H]$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Z}{Z_{22}} & \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \\ -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} & \frac{1}{Z_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Y_{11}} & -\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \\ \frac{Y_{21}}{Y_{11}} & \frac{\Delta Y}{Y_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{G_{22}}{\Delta G} & -\frac{G_{12}}{\Delta G} \\ -\frac{G_{21}}{\Delta G} & \frac{G_{11}}{\Delta G} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{12}}{A_{22}} & \frac{\Delta A}{A_{22}} \\ -\frac{1}{A_{22}} & \frac{A_{21}}{A_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B_{12}}{B_{11}} & \frac{1}{B_{11}} \\ -\frac{\Delta B}{B_{11}} & \frac{B_{21}}{B_{11}} \end{bmatrix}$
$[G]$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{11}} & -\frac{Z_{12}}{Z_{11}} \\ \frac{Z_{21}}{Z_{11}} & \frac{\Delta Z}{Z_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Y}{Y_{22}} & \frac{Y_{12}}{Y_{22}} \\ -\frac{Y_{21}}{Y_{22}} & \frac{1}{Y_{22}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{H_{22}}{\Delta H} & -\frac{H_{12}}{\Delta H} \\ -\frac{H_{21}}{\Delta H} & \frac{H_{11}}{\Delta H} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{A_{21}}{A_{11}} & -\frac{\Delta A}{A_{11}} \\ \frac{1}{A_{11}} & \frac{A_{12}}{A_{11}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B_{21}}{B_{22}} & -\frac{1}{B_{22}} \\ \frac{\Delta B}{B_{22}} & \frac{B_{12}}{B_{22}} \end{bmatrix}$
$[A]$	$\begin{bmatrix} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} & \frac{\Delta Z}{Z_{21}} \\ \frac{1}{Z_{21}} & \frac{Z_{22}}{Z_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{Y_{22}}{Y_{21}} & -\frac{1}{Y_{21}} \\ -\frac{\Delta Y}{Y_{21}} & -\frac{Y_{11}}{Y_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{\Delta H}{H_{21}} & -\frac{H_{11}}{H_{21}} \\ -\frac{H_{22}}{H_{21}} & -\frac{1}{H_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{1}{G_{21}} & \frac{G_{22}}{G_{21}} \\ \frac{G_{11}}{G_{21}} & \frac{\Delta G}{G_{21}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{B_{22}}{\Delta B} & \frac{B_{12}}{\Delta B} \\ \frac{B_{21}}{\Delta B} & \frac{B_{11}}{\Delta B} \end{bmatrix}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков, Ю.Н. Основные понятия и законы теории цепей, методы анализа процессов в цепях [Текст]: учеб. пособие / Ю.Н. Новиков. — СПб.: Лань, 2011. — 368 с.

2. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей [Текст]: учеб. / Г.И. Атабеков. — 3-е изд., стереотип. — СПб.: Лань, 2009. — 432 с.

3. Попов, В.П. Основы теории цепей [Текст]: учеб. пособие / В.П. Попов. — М.: Высш. шк., 2003. — 575 с.

4. Бакалов, В.П. Основы теории цепей: учеб. для вузов / В.П. Бакалов, В.Ф. Дмитриков, Б.И. Крук; под ред. В.П. Бакалова. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Горячая линия – Телеком, 2007. — 597 с.

5. Основы теории цепей. Версия 1 [Электронный ресурс]: конспект лекций / В.И. Вепринцев, Г.К. Былкова, В.В. Тюрнев и др. — Электрон. дан. — Красноярск: ИПК СФУ, 2008. — Режим доступа: World Wide Web. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/56/u_lectures.pdf.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	1
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ	2
Лабораторная работа № 5. Вынужденные колебания в последовательном контуре	3
Лабораторная работа № 6. Свободные процессы в линейных цепях	9
Лабораторная работа № 7. Частотные спектры типовых периодических процессов	17
Лабораторная работа № 8. Линейные четырёхполосники и их соединения	22

Приложение 1. Методика получения спектральных диаграмм временных процессов в контрольных точках 30

Приложение 2. Определение первичных параметров четырёхполосника по опытам холостого хода и короткого замыкания 31

Приложение 3. Соединения четырёхполосников и расчёт параметров составного четырёхполосника 32

Приложение 4. В-параметры Т- и П-образного четырёхполосников. Связь между параметрами четырёхполосников 34

Библиографический список 36