

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»

**С.В. ВИШНЯКОВ, Е.М. ФЕДОРОВА, А.С. АНИСИМОВ,
А.А. ТИТОВ**

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Лабораторный практикум

по курсу

«Теоретические основы электротехники»

для студентов, обучающихся по направлению

«Электроника и нанoeлектроника», 210100.

УДК 621.3.01
В 558

*Утверждено учебным управлением МЭИ
в качестве методического пособия для студентов*

Подготовлено на кафедре электрофизики информационных систем

Рецензент:
канд. техн. наук, проф. Геворкян В.М.,

Вишняков С.В., Федорова Е.М., Анисимов А.С., Титов А.А.

В 558 Основы теории цепей: лабораторный практикум /Вишняков С.В., Федорова Е.М., Анисимов А.С., Титов А.А.; – М.: Издательство МЭИ, 2014. – 80 с.

ISBN

Лабораторный практикум содержит описания лабораторно-практических занятий по курсу «Теоретические основы электротехники», разработанных на кафедре Электрофизики информационных систем МЭИ соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки бакалавров «Электроника и наноэлектроника».

Лабораторный практикум содержит описания лабораторно-практических занятий по курсу «Теоретические основы электротехники», разработанных на кафедре Электрофизики информационных систем МЭИ соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки бакалавров «Электроника и наноэлектроника».

Каждое занятие рассчитано на 2 часа аудиторных занятий в лаборатории, а также на 2 часа самостоятельных занятий.

Описание каждого занятия включает формулировку цели занятия, постановку задачи, задание на домашнюю подготовку к работе, рабочее задание для выполнения в лаборатории, контрольные вопросы по теме занятия, ссылки на рекомендуемую литературу. В некоторых случаях описание работы предваряется краткой теоретической справкой, содержащей основные сведения, необходимые для выполнения работы.

Домашняя подготовка подразумевает обязательное ознакомление с описанием работы, выполнение соответствующих пунктов задания, подготовку бланка отчета (в случае, если предполагается выполнение эксперимента), включающего схемы (с обозначением подключаемых измерительных приборов), формулы, необходимые для обработки результатов измерений, заготовки таблиц, заготовки графиков. Схемы выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ 2.710-81, ГОСТ 2.723-68, ГОСТ 2.728-74, ГОСТ 2.730-73 к изображению элементов электрических цепей. Применяемые обозначения должны соответствовать принятым в рекомендуемой литературе и используемым в лекциях.

Лабораторно-практическое занятие 1

Тема: Вольтамперные характеристики двухполюсных линейных элементов

Содержание работы

Расчеты:

1. Построение вольтамперной характеристики идеального линейного резистивного элемента с заданным сопротивлением
2. Расчет сопротивления по заданному графику вольтамперной характеристики идеального линейного резистивного элемента
3. Построение внешней вольтамперной характеристики реального линейного источника электрической энергии по заданным параметрам схемы замещения
4. Расчет параметров схемы замещения реального линейного источника электрической энергии по заданной внешней вольтамперной характеристике.

Эксперимент:

1. Исследование внешней вольтамперной характеристики источника электрической энергии

Домашняя подготовка

Изучить описание лабораторно-практического занятия, методические указания.

Рабочее задание

1. Знакомство с оборудованием лабораторных стендов и измерительными приборами.

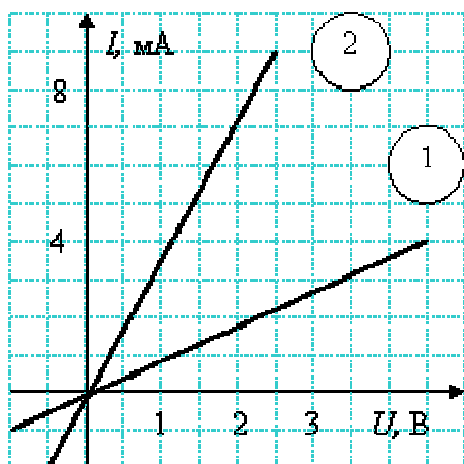


Рис. 1.1

2. По графику вольтамперной характеристики (рис. 1.1) определить сопротивление резистивного элемента.

3. Для резистивного элемента с сопротивлением $R=100 \times N$ Ом (где N – номер стенда) построить вольтамперную характеристику (U – откладывать по оси абсцисс, а I – по оси ординат)

4. Качественно нарисовать вольт-амперную (внешнюю) характеристику реального линейного источника; записать математическое выражение этой характеристики $U(I)$. Нарисовать последовательную и параллельную схемы замещения реального линейного источника .

5. Для линейного источника электрической энергии задан участок внешней вольтамперной характеристики (рис. 1.2). Определить параметры последовательной и параллельной схем замещения источника

6. Для линейного источника электрической энергии задан участок внешней вольтамперной характеристики (рис. 1.3). Определить параметры последовательной и параллельной схем замещения источника.

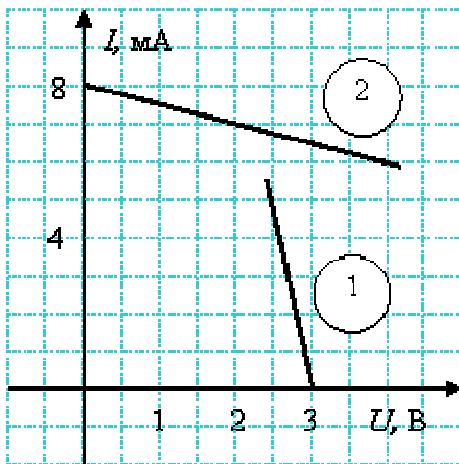


Рис. 1.2

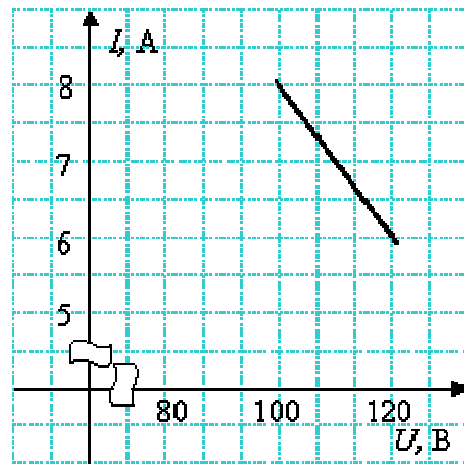


Рис. 1.3

7. Собрать на стенде электрическую цепь для экспериментального исследования внешней вольтамперной характеристики реального источника (рис. 1.4)

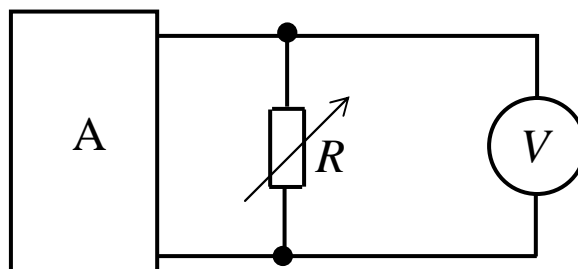


Рис. 1.4

С помощью вольтметра измерить напряжение на зажимах источника, устанавливая величину сопротивления нагрузки от 50 до 900 Ом, а также напряжение на разомкнутых зажимах источника (режим холостого хода, $R \rightarrow \infty$). По данным измерений рассчитать ток. Результаты измерений и

расчетов свести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

$R, \text{ Ом}$	50	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	900	∞
$U, \text{ В}$													
$I, \text{ мА}$													

8. Построить измеренную внешнюю вольтамперную характеристику реального источника. По полученной характеристике определить параметры последовательной и параллельной схем замещения источника.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятия «ветвь», «узел», «контур» электрической цепи.
2. Сформулируйте законы Кирхгофа.
3. Нарисуйте вольтамперные характеристики идеальных источников напряжения и тока.
4. Какое внутренне сопротивление имеет идеальный вольтметр, амперметр?
5. Нарисуйте вольтамперную характеристику реального источника энергии.
6. Сформулируйте условие эквивалентности последовательной и параллельной схем замещения реального линейного источника.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 17,130-131, 135-152,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19

Лабораторно-практическое занятие 2

Тема: Расчет простейших линейных цепей постоянного тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Законы Кирхгофа
2. Последовательное и параллельное включение элементов
3. Контурные токи и узловые потенциалы.

Домашняя подготовка

1. На рисунке 2.1 показана электрическая цепь. При заданных ЭДС источников и сопротивлениях приемников число неизвестных токов равно числу ветвей. Необходимые уравнения для определения токов дают законы Кирхгофа:

I з-н : Алгебраическая сумма токов в узлах равна нулю;

II з-н: Алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях замкнутых контуров равна алгебраической сумме ЭДС этих контуров.

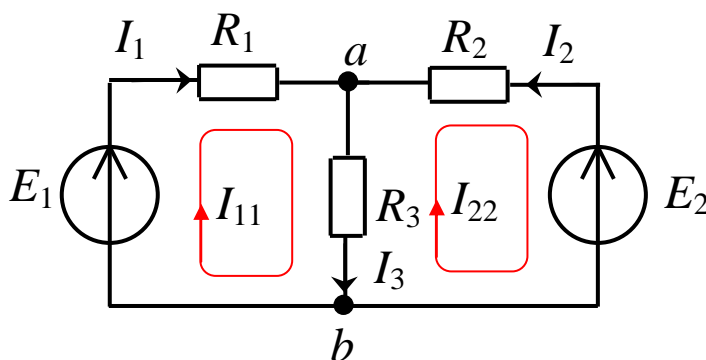


Рис. 2.1

Для цепи рис. 2.1 показать, что система трех уравнений может быть заменена двумя уравнениями

$$\begin{aligned}(R_1 + R_3) I_{11} - R_3 I_{22} &= E_1 \\ (R_2 + R_3) I_{22} - R_3 I_{11} &= -E_2 \quad ,\end{aligned}$$

где I_{11} и I_{22} - так называемые контурные токи
 $I_{11} = I_1$, $I_{22} = -I_2$, $I_{11} - I_{22} = I_3$

2. Для цепи рис. 2.1 выразить токи I_1 , I_2 , I_3 через заданные ЭДС, напряжение U_{ab} и сопротивление ветви, например,

$$I_1 = (E_1 - U_{ab}) / R_1$$

3. Пользуясь выражениями токов из п.2, получить формулу для расчета напряжения U_{ab} для цепи с двумя узлами:

$$U_{ab} = \Sigma E g / \Sigma g.$$

4. Сформулировать принцип наложения и записать, пользуясь этим принципом, токи в цепи рис. 2.1.

5. Изучить решение задач 1.1(р), 1.4(р), 1.7(р), 1.18(р)

Рабочее задание

1. Решить задачи: 1.2 (дополнительно определить сопротивления реальных амперметра и вольтметра), 1.6, 1.8, 1.21, 1.22

2. Тест по внешним вольтамперным характеристикам реальных источников.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Кирхгофа.

2. Пронумеруйте ветви, узлы, контуры, независимые контуры в цепи по указанию преподавателя.

3. Покажите пример последовательного и параллельного включения элементов.

4. Приведите формулы для последовательного и параллельного соединения сопротивлений.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр.153-170,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19.

Лабораторно-практическое занятие 3

Тема: Исследование разветвленных линейных цепей постоянного тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Принципы суперпозиции, линейности, взаимности
2. Теорема об активном двухполюснике (метод эквивалентного генератора)

Моделирование:

1. Моделирование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока

Домашняя подготовка

Решить задачи 1.46(P), 1.47, 1.27(P), 1.30, 1.55(P), 1.58.

Рабочее задание

1. Решить задачи 1.62, 1.64.
2. С помощью программного пакета *DesignLab* провести моделирование цепи, заданной преподавателем, получить значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, а также искомого тока.
3. Тест по законам Кирхгофа.

Контрольные вопросы

1. Каким образом и относительно каких величин формируются узловые и контурные уравнения?
2. Сформулируйте принципы компенсации, суперпозиции.
3. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике.

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 263-269,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19

Лабораторно-практическое занятие 4

Тема: Исследование разветвленных линейных цепей постоянного тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Применение узловых и контурных уравнений для расчета токов и напряжений
2. Теорема об активном двухполюснике, принцип суперпозиции, принцип линейности.

Эксперимент:

1. Экспериментальное исследование разветвленной линейной электрической цепи постоянного тока

Теоретическая справка

Теорема об активном двухполюснике утверждает, что относительно зажимов произвольной ветви линейная электрическая цепь может быть представлена реальным источником электрической энергии (активным двухполюсником, эквивалентным генератором). Параметрами такого реального источника являются: напряжение холостого хода U_{XX} , ток короткого замыкания $I_{КЗ}$ и внутреннее сопротивление $R_{ВН}$, причем внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению $R_{ВХ}$ цепи относительно выбранных зажимов. Из перечисленных параметров два являются линейно-независимыми, третий может быть получен с помощью соотношения:

$$U_{XX} = R_{ВН} I_{КЗ}$$

Домашняя подготовка

1. Изучить решение задач №№ 1.55(Р), 1.60(Р), 1.28(Р).
2. Рассматривая схему 4.1 (для четных номеров стендов схема 4.1.а, для нечетных – 4.1.б) относительно ветви с током I как эквивалентный генератор, рассчитать его параметры ($U_p, R_{ВХ}, I_{КЗ}$)

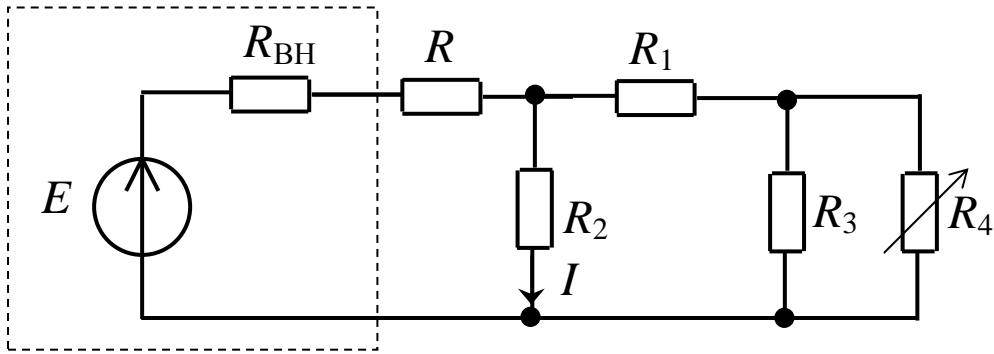


Рис. 4.1.а

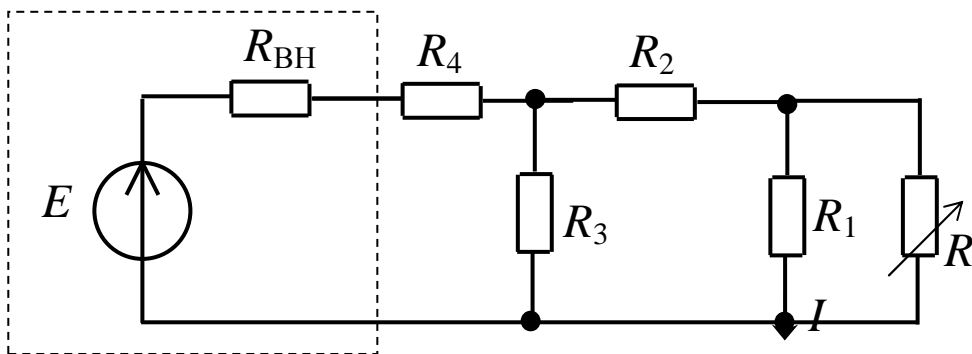


Рис. 4.1.б

Значения параметров элементов $R_1=1$ кОм, $R_2=2$ кОм, $R_3=10$ кОм, $R_4=100$ Ом, $E=10$ В, $r_{вн}=60$ Ом.

Значение сопротивления R выбирается в соответствии с младшей значащей цифрой номера стенда n :

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R, \text{ Ом}$	100	200	250	300	400	500	600	700	800	900

Рассчитать ток I .

3. Произвести аналогичные расчеты для схемы рис. 4.2 относительно ветви с указанным током I

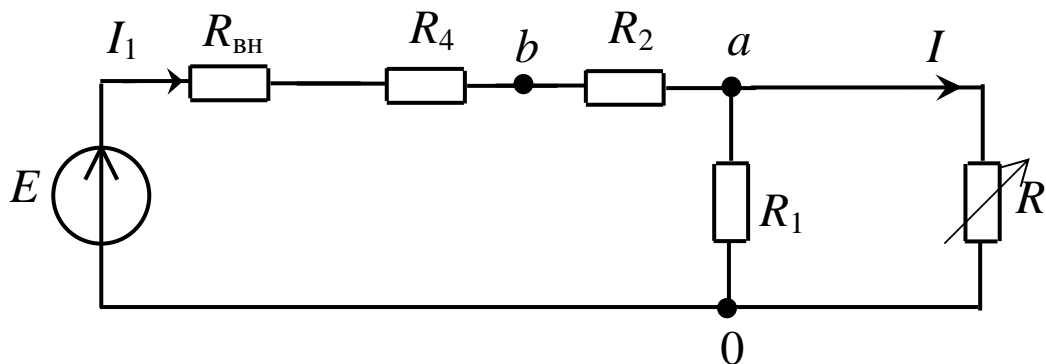


Рис. 4.2

Рабочее задание

1. Собрать цепь рис. 4.1 в соответствии со своим вариантом. Разрывая и закорачивая ветвь с искомым током I_x провести измерения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания
2. По результатам измерений определить входное сопротивление цепи относительно узлов присоединения ветви с искомым током. Сравнить полученную величину с данными теоретического расчета.
3. Собрать цепь рис. 4.2. Измерить, аналогично п.п. 1,2 рабочего задания параметры эквивалентного генератора и сравнить их с расчетными.
4. Изменяя величину сопротивления в ветви с током I , измерить значения напряжений U_{ao} и U_{ba} . Полученные значения свести в таблицу, предусмотрев в ней строки для тока в рассматриваемой ветви (I) и мощности, выделяемой в этой ветви ($P=I^2 R=U_{ao} I$).
5. Построить графики зависимостей $P(I)$, $P(R)$, $U_{ba}(I)$, $U_{ba}(U_{ao})$
6. По графикам $U_{ba}(I)$, $U_{ba}(U_{ao})$ определить коэффициенты линейных соотношений

$$U_{ba}=a+ b I$$
$$U_{ao}=c+d U_{ao}$$

7. Объяснить полученные результаты.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике.
2. Что такое «входное сопротивление» (определение, способы вычисления, измерения)?
3. Последовательная и параллельная схемы замещения активного двухполюсника.

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 263-269, 283,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19.

Лабораторно-практическое занятие 5

Тема: Исследование разветвленных линейных цепей постоянного тока. Различные методы расчета.

Содержание работы

Расчеты:

1. Метод узловых потенциалов, метод контурных токов
2. Принцип линейности
3. Теорема об активном двухполюснике

Домашняя подготовка

Решить задачи №№ 1.61 (опр. I_5), 1.63 (опр. I_5), 1.51*

Рабочее задание

1. Решить задачи №№ 1.53*, 1.24
2. Итоговая контрольная работа по разделу «Цепи постоянного тока» (метод эквивалентного генератора)

Контрольные вопросы

1. Метод узловых потенциалов - как формируются уравнения?
2. Сформулируйте принципы линейности, взаимности.
3. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике.
4. Метод контурных токов - как формируются уравнения?
5. Мощность, баланс мощности.

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 263-269, 283,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19.

Лабораторно-практическое занятие 6

Тема: Простейшие цепи синусоидального тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Комплексные числа, операции над ними
2. Расчет простейших цепей синусоидального тока символическим методом

Домашняя подготовка

Решить задачи №№ 2.8, 2.9, 2.14

Рабочее задание

1. Решить задачи: 2.15–2.18 (выборочно)
2. Для заданных значений частоты рассчитать комплексные сопротивления индуктивного и емкостного элементов при $C=10+10 \times n$ мкФ, $L=2.5+0.5 \times n$ мГн, где n – номер стенда. Частота $f = 50$ Гц, 1 кГц, 5 кГц. Рассчитать соответствующие комплексные проводимости.
3. Рассчитать комплексное сопротивление последовательно включенных емкостного, индуктивного и резистивного элементов с параметрами $L=1$ мГн, $C=1$ нФ, $R=2$ кОм при частотах $f = 100$ и 200 кГц.
4. Рассчитать комплексную проводимость параллельно включенных емкостного, индуктивного и резистивного элементов с параметрами $L=1$ мГн, $C=1$ нФ, $R=2$ кОм при частотах $f = 100$ и 200 кГц.
5. Решить задачи: 2.19–2.21.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте правило перехода от мгновенных значений токов и напряжений к комплексным амплитудам.
2. Каким образом осуществляется переход от полярной записи комплексного числа к алгебраической и наоборот?
3. Дайте определение среднего и действующего значения тока.
4. Каким образом рассчитывается комплексное сопротивление индуктивного и емкостного элементов?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 177-200, 224-232,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 9-19

Лабораторно-практическое занятие 7

Тема: Неразветвленные линейные цепи синусоидального тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет установившихся режимов в линейных цепях с источниками синусоидальных ЭДС и тока

Эксперимент:

1. Экспериментальное исследование цепи с источником ЭДС синусоидальной формы

Домашняя подготовка

1. Для схем рис. 7.1, полагая известным сопротивление R и показания трех вольтметров, построить векторную диаграмму напряжений и определить с ее помощью комплексное сопротивление Z .

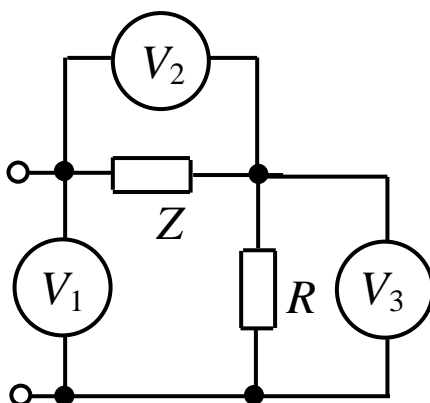


Рис.7.1

2. В последовательной RLC цепи – рис. 7.2 (согласно номеру стенда n), считая известным действующее значение входного напряжения $U_{ВХ} = 2$ В, записать в общем виде и рассчитать ток цепи и напряжения на всех элементах. Построить векторную диаграмму напряжений. Записать мгновенные значения тока и напряжений цепи.

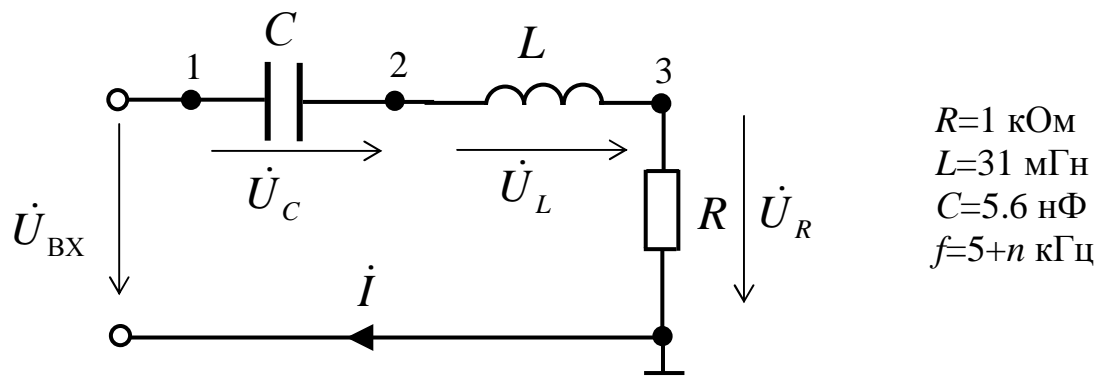


Рис. 7.2

3. Изучить решение задачи 2.14(Р), решить 2.16.

Рабочее задание

1.Собрать цепь рис.7.1 В качестве неизвестного измеряемого сопротивления Z использовать расположенные на стенде Z_1 (для нечетных вариантов) и Z_2 (для четных), $R=200 \text{ Ом}$. Источник ЭДС – генератор синусоидального напряжения с амплитудой 2 В и частотой 10 кГц.

По полученным данным рассчитать сопротивление Z .

2. Подключить к цепи осциллограф для измерения входного напряжения (первый канал) и напряжения на резисторе (второй канал). Измерить амплитуды напряжений и сдвиг фаз между ними, приняв начальную фазу напряжения на резисторе равной нулю.

По измерениям записать комплексные значения тока и входного напряжения, рассчитать комплексное напряжение на реактивном элементе. Построить векторную диаграмму напряжений.

По полученным данным определить сопротивление реактивного элемента, сопоставить его с результатом , полученным в п.1.

3. Собрать электрическую цепь рис. 7.2. В качестве источника напряжения включить генератор синусоидального напряжения с амплитудой 2 В и частотой в соответствии с вариантом.

Подключить к цепи осциллограф для измерения амплитуд потенциалов в точках 1, 2, 3 и сдвига фаз между ними, приняв начальную фазу напряжения \dot{U}_R равной нулю. Записать результаты измерений комплексных значений потенциалов.

На основании измерений рассчитать комплексные напряжения на элементах и ток цепи, построить векторную диаграмму напряжений и сопоставить ее с результатами теоретического расчета.

Определить комплексное входное сопротивление цепи на заданной частоте.

3. Изменяя частоту генератора, добиться режима, при котором сдвиг фаз между напряжением на входе и током цепи равен нулю. Записать значение этой частоты, амплитуды напряжений на входе цепи и на резисторе. Рассчитать сопротивление цепи на этой частоте.

4. Тест по комплексной арифметике.

Контрольные вопросы

1. Качественно постройте векторные диаграммы напряжений и токов для моделей реальных индуктивных и емкостных элементов.

2. Что такое мгновенная мощность, активная мощность, комплексная мощность, каким образом они связаны между собой?

3. Сформулируйте условие передачи максимальной активной мощности в нагрузку.

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 180-194, 218-220,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 64-70.

Лабораторно-практическое занятие 8

Тема: Установившийся режим в линейных электрических цепях с синусоидальными источниками при наличии индуктивной связи.

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет установившихся режимов в линейных цепях с источниками синусоидальных ЭДС и тока
2. Расчет установившихся режимов в линейных цепях с источниками синусоидальных ЭДС и тока при наличии магнитной связи

Домашняя подготовка

1. Решить задачи 2.22, 2.23, 2.24. Изучить решение задач 2.80(Р), 2.81(Р)

Рабочее задание

1. Решить задачи: 2.88, 2.85.
2. Тест на расчет цепей синусоидального тока.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. В чем особенности записи уравнений Кирхгофа в цепях, содержащих магнитно-связанные катушки?
3. Какие методы расчета цепей с магнитно-связанными катушками вам известны?
4. Нарисуйте согласное и встречное соединение катушек с магнитной связью.
5. Каким образом производится разметка выводов индуктивно-связанных катушек?
6. Как определить сопротивление магнитной связи у трансформатора?

Литература

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 270-274,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 64-70

Лабораторно-практическое занятие 9

Тема: Установившийся режим в линейных электрических цепях с синусоидальными источниками ЭДС и тока при наличии магнитной связи

Содержание работы

Эксперимент: экспериментальное определение взаимной индуктивности, исследование цепи с линейным трансформатором

Домашняя подготовка

1. Изучить решение задачи 2.84(Р)
2. Нарисовать схемы последовательного соединения магнитно-связанных катушек и сопротивления R (для случаев согласного и встречного включения катушек), отобразив номера зажимов катушек (1,2,3,4) и точки включения каналов осциллографа для измерения входного напряжения и тока цепи.
3. Нарисовать схему трансформатора в режиме холостого хода. Показать, как определяется сопротивление взаимной индуктивности X_M .

Рабочее задание

1. С помощью омметра определить активные сопротивления катушек (предварительно необходимо отключить обмотки от других элементов и генератора).
2. Нарисовать и собрать электрическую цепь рис. 9.1, в которой в качестве элементов R_K и L_K включить поочередно первичную и вторичную обмотки трансформатора. Предусмотреть в цепи генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В и частотой 5 кГц, $R = 100$ Ом

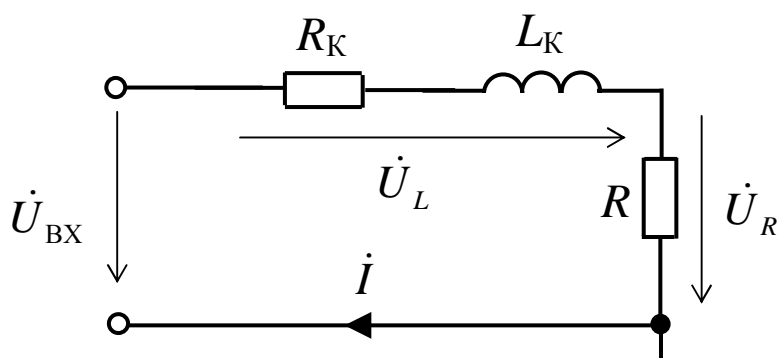


Рис. 9.1

3. С помощью осциллографа произвести измерения амплитуд напряжений $U_{ВХ}$ и U_R и сдвига фаз между ними (начальную фазу напряжения на резисторе принять равной нулю) для случаев включения первичной и вторичной обмоток трансформатора.

4. По результатам измерений определить комплексное сопротивление цепи $Z = R + R_k + j\omega L_k$. Записать величины активного и реактивного сопротивлений катушек, а также их собственные индуктивности.

5. Для схемы последовательного соединения катушек при их согласном и встречном включениях написать уравнение по закону Кирхгофа. Показать, что сопротивление взаимной индуктивности X_M можно определить по формуле

$$X_M = (X_{СОГЛ} - X_{ВСТР}) / 4$$

6. Собрать цепь с последовательным включением обмоток и сопротивлением R (одно из соединений обмоток – согласное, другое – встречное).

7. Подключив ко входу полученной цепи генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В и частотой 5 кГц, провести необходимые измерения для определения комплексного сопротивления цепи (начальную фазу тока цепи принять равной нулю) при различных способах включения индуктивно-связанных катушек. Произвести разметку катушек.

Рассчитать величины сопротивления X_M и взаимной индуктивности M .

8. Собрать цепь рис. 9.2. Подключив ко входу полученной цепи генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В и частотой 5 кГц, провести необходимые измерения и рассчитать значение X_M и сравнить с результатом, полученным в п. 7.

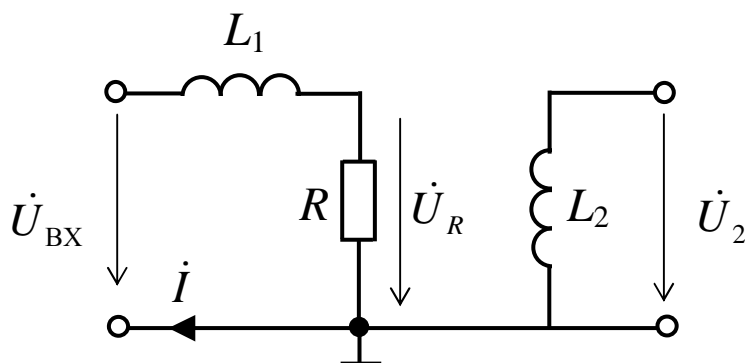


Рис. 9.2

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте согласное и встречное соединение катушек с магнитной связью.
2. Каким образом производится разметка выводов индуктивно-связанных катушек?
4. Как определить сопротивление магнитной связи у трансформатора?
5. С какой целью и каким образом выполняется «развязка» магнитной связи?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 275-278, 321-326,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 64-70.

Лабораторно-практическое занятие 10

Тема: Четырехполюсники

Содержание работы

Расчеты: расчет параметров четырехполюсников (типа А, Z, Y, H)

Домашняя подготовка

1. Написать уравнения линейного проходного автономного четырехполюсника с параметрами **Z, Y, H, A**. Для каждого из этих уравнений записать условия взаимности и симметрии.
2. Какие опыты необходимо проделать для определения указанных выше параметров?
3. Разобрать и изучить решение задач 5.1(P), 5.3(P).

Рабочее задание

1. Решить задачи: 5.2, 5.11, 5.12, 5.20.
2. Тест на расчет цепей с магнитной связью

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнения четырехполюсника в A, H, Y, Z параметрах.
2. Сформулируйте определение симметричного, взаимного четырехполюсника.
3. Какие типы параметров могут использоваться для описания многополюсников с произвольным числом полюсов?

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 170-175,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 64-70.

Лабораторно-практическое занятие 11

Тема: Симметричные четырехполюсники. Вторичные параметры.

Содержание работы

Расчеты: расчет параметров симметричных четырехполюсников

Домашняя подготовка

1. Написать уравнения симметричного четырехполюсника с вторичными параметрами (Z_c и $\dot{\Gamma}$).
2. Написать уравнения связи A – параметров со вторичными (Z_c и $\dot{\Gamma}$).
3. Изучить решение задачи 5.18(Р).
4. Решить задачу 5.17.

Рабочее задание

1. Решить задачи: 5.21, 5.19*
2. Тест на расчет параметров четырехполюсников

Контрольные вопросы

1. Вторичные параметры - определение, способы расчета, измерения.
2. Каково соотношение между напряжениями на входе и выходе четырехполюсника, если он нагружен на сопротивление Z_c ?
3. Какие типы параметров целесообразно применять для описания четырехполюсников, включенных каскадно?
4. Определите условия взаимности и симметрии для различных типов параметров.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 176-182, 192-194,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 220-235.

Лабораторно-практическое занятие 12

Тема: Четырехполюсники

Содержание работы

Расчеты: расчет параметров четырехполюсников (типа А, Z, Y, H)

Эксперимент: экспериментальное определение коэффициентов четырехполюсника

Домашняя подготовка

1. Для схемы рис. 11.1 в соответствии с вариантом записать уравнения типа А четырехполюсника и получить аналитические выражения для его коэффициентов. Рассчитать параметры четырехполюсника при частоте входного напряжения $f = (8 + 0,1n)$ кГц, где n – номер стенда.

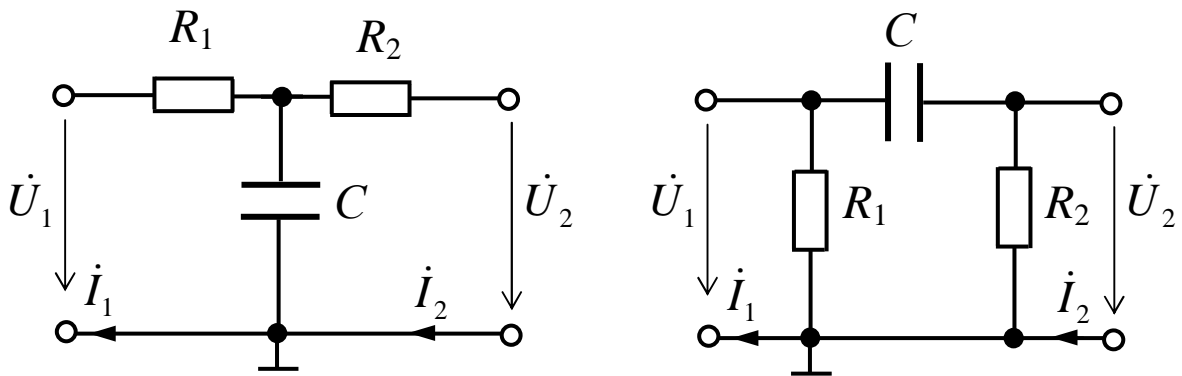


Рис. 11.1 – Схемы четырехполюсников (слева – для четного варианта, справа – для нечетного): $R_1=1$ кОм, $R_2=2$ кОм, $C=5.6$ нФ.

2. Подготовить протокол рабочего задания для экспериментального определения параметров:
 - а) A_{11} и A_{21}
 - б) A_{12} и A_{22} (см. методические указания)

Рабочее задание

1. Собрать четырехполюсник и произвести измерения для определения параметров A_{11} и A_{21} при частоте генератора f кГц и амплитуде 5 В.

2. Собрать схему и произвести измерения для определения параметров A_{12} и A_{22} четырехполюсника при частоте генератора f кГц и амплитуде 5 В.
3. По полученным экспериментальным данным рассчитать А-параметры четырехполюсника. Результаты представить в виде таблицы:

Параметр	A_{11}	A_{12}	A_{21}	A_{22}
Теоретическое значение				
Экспериментальное значение				

Контрольные вопросы

1. Перечислите типы параметров четырехполюсников.
2. Какие эквивалентные схемы применяются для замещения четырехполюсников?
3. Какие типы параметров целесообразно применять для описания четырехполюсников, включенных последовательно, параллельно, каскадно?
4. Определите условия взаимности и симметрии для различных типов параметров.
5. Какие типы параметров определены для $2n$ -полюсников при $n > 2$?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 302-308,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 220-235

Лабораторно-практическое занятие 13

Тема: Частотные характеристики

Содержание работы

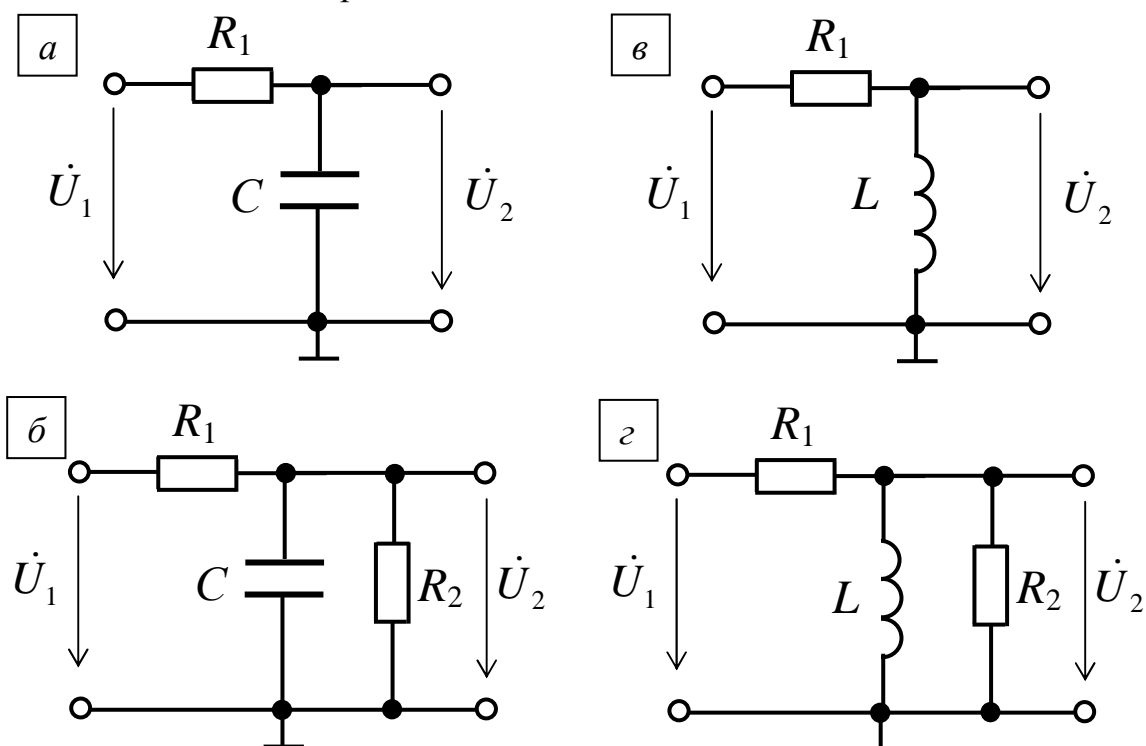
Расчеты: расчет передаточных функций, построение АЧХ и ФЧХ

Эксперимент: экспериментальное определение частотной характеристики пассивной цепи

Домашняя подготовка

1. Для схем четырехполусников рис. 13.1 (четный вариант – схемы *a* и *б*, нечетный – схемы *в* и *г*) получить аналитические выражения передаточных функций.

Рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ схем.



$$R_1=1 \text{ кОм}, R_2=2 \text{ кОм}, C=5,6 \text{ нФ}, L=31 \text{ мГн}$$

Рис. 13.1

Рабочее задание

1. Нарисовать и собрать электрическую цепь рис. 13.1.*a* (четный вариант), 13.1.*в* (нечетный вариант), подключив к входу цепи

генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В. Подключить к цепи осциллограф для измерения входного напряжения (первый канал) и выходного напряжения (второй канал).

- Изменяя частоту генератора, измерить амплитуды напряжений и сдвиг фаз между ними, приняв начальную фазу входного напряжения равной нулю. Результаты представить в виде таблицы $f_0 = 1/2\pi\tau$

f , кГц	$0.3f_0$	$0.5f_0$	$0.8f_0$	f_0	$1.2f_0$	$1.5f_0$	$1.8f_0$	$2.0f_0$	$2.5f_0$	$3.0f_0$
U_1 , В										
U_2 , В										
Δt , мкс										
$H(f)$										
$\varphi(f)$										

- Нанести экспериментально полученные точки АЧХ и ФЧХ на теоретически построенные зависимости.
- Собрать электрическую цепь рис. 13.1.б (четный вариант), 13.1.г (нечетный вариант), подключив к входу цепи генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В.
- Произвести необходимые измерения для получения экспериментальной АЧХ цепи. Данные представить в виде таблицы аналогичной таблице п.2. Нанести результат на теоретически полученную характеристику.

Контрольные вопросы

- Дайте определение передаточной функции, АЧХ, ФЧХ.
- Дайте определение явлению резонанса.
- Каким образом можно определить резонансные частоты цепи?

Литература

- Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 314-316,
- Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 220-235.

Лабораторно-практическое занятие 14

Тема: Частотные характеристики

Содержание работы

Расчеты: расчет передаточных функций, построение АЧХ и ФЧХ

Эксперимент: экспериментальное определение частотной характеристики пассивной цепи

Домашняя подготовка

1. Получить аналитическое выражение для комплексной передаточной функции RLC цепи – рис. 14.1.*a*.
2. Построить АЧХ и ФЧХ фильтра для двух значений сопротивления R : 1 кОм и 10 кОм (частотные характеристики при разных величинах R совместить на одном графике). Определить резонансную линейную частоту и добротность контура для двух значений сопротивления R .

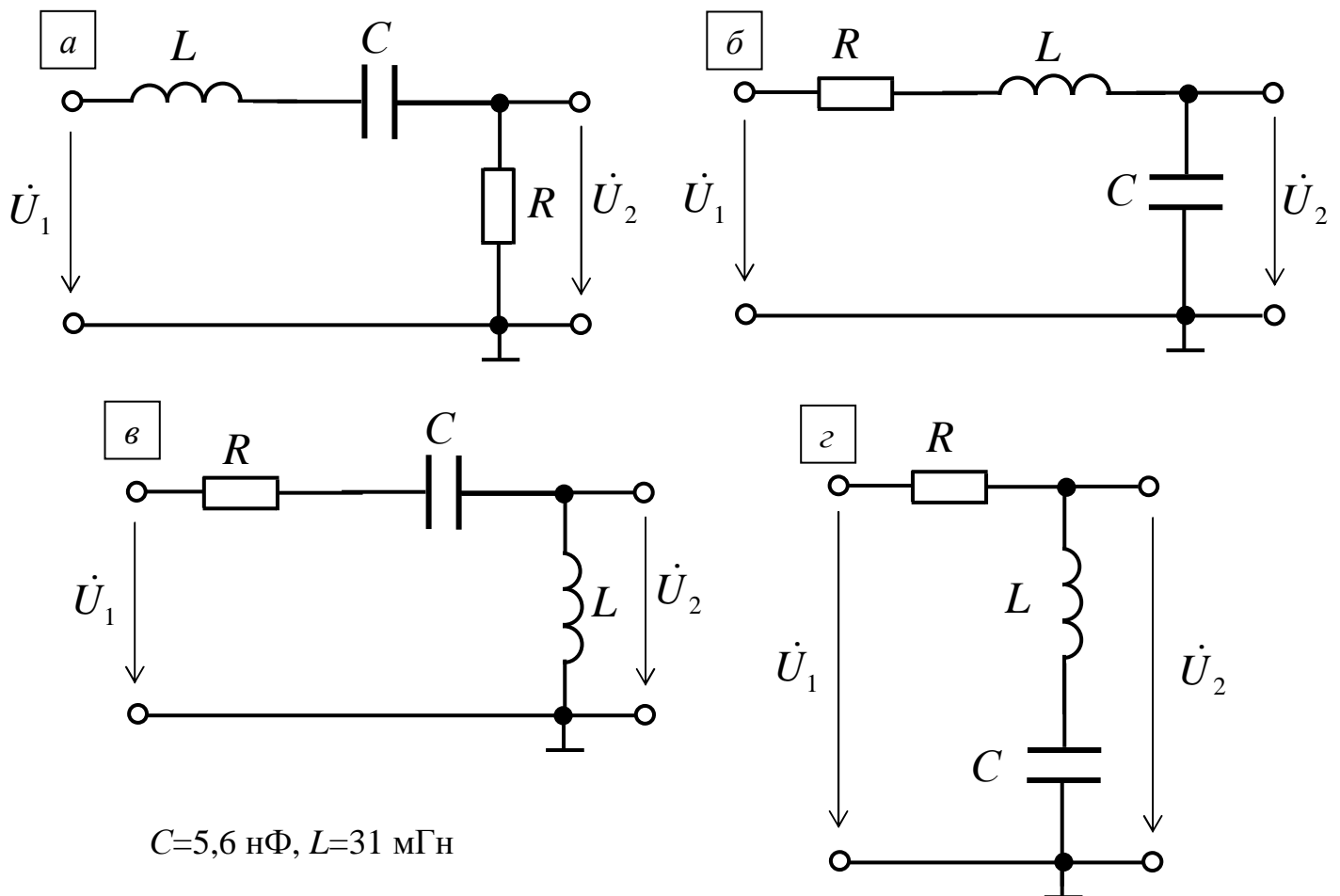


Рис. 14.1

Рабочее задание

1. Нарисовать и собрать электрическую цепь рис. 14.а при $R = 1$ кОм, подключив к входу фильтра генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В.
2. Подключить к цепи осциллограф для измерения входного напряжения (первый канал) и выходного напряжения (второй канал). Экспериментально определить резонансную частоту фильтра f_0 .
3. Измерить амплитуды напряжений и сдвиг фаз между ними, приняв начальную фазу входного напряжения равной нулю. Результаты представить в виде таблицы.

f , кГц	$0.3f_0$	$0.5f_0$	$0.8f_0$	f_0	$1.2f_0$	$1.5f_0$	$1.8f_0$	$2.0f_0$	$2.5f_0$	$3.0f_0$
U_1 , В										
U_2 , В										
Δt , мкс										
$W(f)$										
$\varphi(f)$										

4. Нанести экспериментально полученные точки АЧХ и ФЧХ на теоретически построенные зависимости. По экспериментальным данным определить добротность.
5. Повторить пп. 1–4 для $R = 10$ кОм.
6. Нарисовать и собрать электрическую цепь рис. 14.1.б для нечетного и рис. 14.1.в – для четного вариантов при $R = 1$ кОм. К входу цепи подключить генератор синусоидальных колебаний с амплитудой 5 В.
7. Произвести необходимые измерения для получения экспериментальной АЧХ фильтра, данные представить в виде таблицы. Нанести экспериментальные точки на теоретически полученные характеристики.
8. Построить модель цепи рис. 14.1.г в программе Design Center. Рассчитать частотные характеристики цепи. Сравнить результат с полученными ранее.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение передаточной функции, АЧХ, ФЧХ.
2. Дайте определение явлению резонанса.
3. Определите понятие «добротность» резонансного контура.
4. Укажите особенности вычисления ФЧХ для цепей второго

порядка.

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 335-347,
2. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр.110-111,
3. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 133-135

Лабораторно-практическое занятие 15

Тема: установившийся режим в линейной цепи с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет токов и напряжений в линейных цепях с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС и тока

Теоретическая справка

Периодические функции могут быть представлены с помощью ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)$$

с коэффициентами:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega_1 t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega_1 t) dt$$

здесь T – период (так что $u(t+T)=u(t)$), ω_1 – частота первой (основной) гармоники,

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$$

Величину U_0 (среднее значение функции) называют постоянной составляющей; k называют номером гармоники (гармонической составляющей); гармонические составляющие с номером $k > 1$ называют высшими гармониками.

Расчет линейной цепи с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС и тока сводится к расчету (в соответствии с принципом суперпозиции) режимов цепи для каждой гармонической составляющей источников в отдельности. Полученные при этом *мгновенные* значения токов и напряжений в цепи суммируются.

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи 3.1(р), 3.2(р)
2. Решить задачи 3.3, 3.4

Рабочее задание

1. Решить задачи: 3.13, 3.16, 3.18

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возможно разложение функции в тригонометрический ряд (ряд Фурье)?
2. Дайте определения действующего, среднего, среднего по модулю значения несинусоидальной периодической функции.
3. Дайте определения коэффициентам, характеризующим форму несинусоидальной периодической кривой.
4. Каким образом производится расчет токов и напряжений в линейной цепи при действии несинусоидальных периодических источников, какие принципы и методы при этом применяются?

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 335-347,
2. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 112-118,
3. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 133-135.

Лабораторно-практическое занятие 16

Тема: установившийся режим в неразветвленной линейной цепи с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС

Содержание работы

Расчеты:

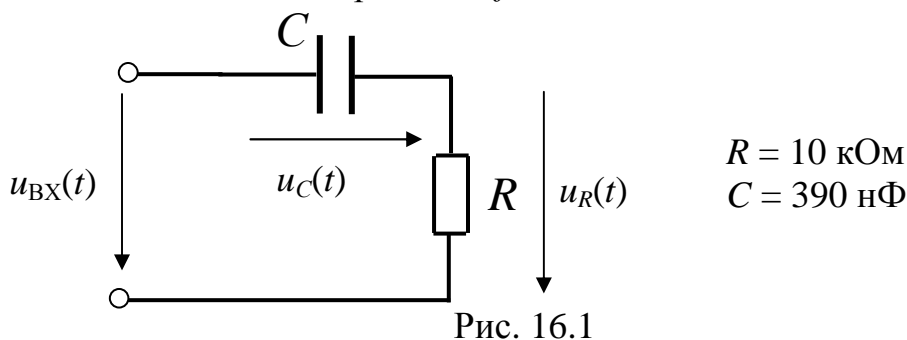
1. Расчет установившихся режимов в линейных цепях с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС

Эксперимент:

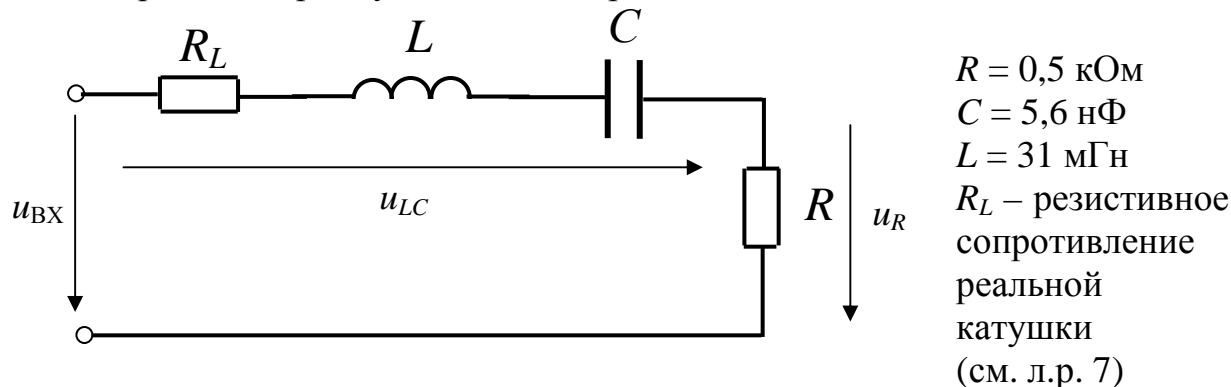
1. Исследование линейной цепи с несинусоидальными периодическими источниками ЭДС

Домашняя подготовка

1. Для схемы рис. 16.1, полагая известными $u_{ВХ}(t)=2+5\sin(\omega t)$ (В) и величины параметров элементов схемы, рассчитать мгновенные значения напряжений на элементах схемы, их действующие значения, действующее значение входного напряжения, при частоте синусоидальной составляющей входного напряжения $f = 4,1$ кГц.



2. В последовательной RLC-цепи (рис. 16.2) $u_{ВХ}(t)$ – периодическое напряжение прямоугольной формы (меандр), $U_m = 4$ В, частота основной гармоники $f_1 = 12,1$ кГц. Разложить входное напряжение в тригонометрический ряд (учитывать 5 гармоник).



3. Рассчитать мгновенное значение напряжения u_R , построить график. Рассчитать действующее значение напряжений $u_{ВХ}$, u_R , u_{LC} .

Рабочее задание

1. Собрать цепь рис. 16.1, взяв в качестве источника ЭДС генератор синусоидального напряжения с амплитудой 5 В и смещением 1 В. Частоту установить равной 4,1 кГц. Подключить к цепи осциллограф для наблюдения напряжения на входе (первый канал) и напряжения на резисторе (второй канал). Подключить вольтметр поочередно для измерения напряжений на емкости (вольтметр в режиме измерения постоянного напряжения), на резисторе (вольтметр в режиме измерения действующего значения переменного напряжения). Сравнить полученные результаты с п. 1 домашней подготовки.

2. Собрать цепь рис. 16.2, взяв в качестве источника ЭДС генератор напряжения прямоугольной формы с амплитудой 4 В. Частоту установить равной 12,1 кГц. Подключить к цепи осциллограф для наблюдения напряжения на входе (первый канал) и напряжения на резисторе (второй канал). Подключить вольтметр поочередно для измерения действующего значения напряжений $u_{ВХ}$, u_R , u_{LC} . Сравнить полученные результаты с п. 2 домашней подготовки.

Контрольные вопросы

1. Разложение периодической последовательности прямоугольных импульсов (меандр) в ряд Фурье.

2. Действующее значение несинусоидальной периодической величины.

3. Перечислите, какие виды измерительных приборов могут применяться для измерения токов и напряжений, какие параметры несинусоидальных периодических токов и напряжений они измеряют?

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 335-347,

2. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 112-118,

3. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 133-135.

Лабораторно-практическое занятие 17

Тема: Исследование простейшего частотно-разделительного устройства

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет частотно-разделительного устройства (фильтра частот) на примере выделения одного несинусоидального периодического сигнала на фоне другого

Домашняя подготовка

1. Записать разложение двух последовательностей прямоугольных импульсов $u_{ВХ1}$, $u_{ВХ2}$ в ряд Фурье (учитывать 7 гармоник). Амплитуда обоих сигналов 1 В, период первого сигнала 10 мкс, второго – 1 мкс. Скважность первого сигнала $n + 1$ для номеров стендов n с 1 по 11 и $(n-10)$ – для номеров стендов от 12 до 22. Скважность второго сигнала $(13-n)$ для номеров стендов n с 1 по 11 и $(24-n)$ – для номеров стендов от 12 до 22.
2. Построить на одном графике линейчатые спектры напряжений $u_{ВХ1}$ и $u_{ВХ2}$
3. Получить передаточные функции и построить частотные характеристики цепей рис. 17.1 при $R = 1000$ Ом, $C = 4$ нФ.

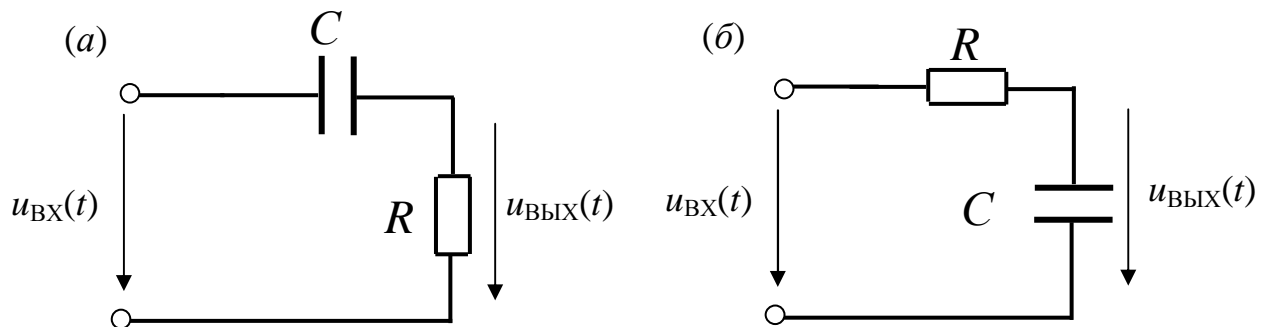


Рис. 17.1

Рабочее задание

1. С помощью специализированного математического пакета построить графики мгновенных значений напряжений $u_{ВХ1}$, $u_{ВХ2}$ и $u_{ВХ} = u_{ВХ1} + u_{ВХ2}$.
2. Рассчитать амплитуды гармонических составляющих напряжения на выходе цепи рис. 17.1.a при действии на входе цепи напряжения $u_{ВХ}$. Построить мгновенное значение напряжения на выходе.
3. Рассчитать амплитуды гармонических составляющих напряжения на

выходе цепи рис. 17.1.б при действии на входе цепи напряжения $u_{вх}$. Построить мгновенное значение напряжения на выходе.

4. Сделать выводы о возможности выделения одного из сигналов с помощью простейшего фильтра частот.

Контрольные вопросы

1. Какой тип частотной характеристики соответствует фильтру высоких частот, низких частот, полосно-пропускающему фильтру, полосно-заграждающему фильтру?

2. Сформулируйте условие прохождения сигнала через фильтр без искажения формы.

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 192-207,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 64-70

Лабораторно-практическое занятие 18

*Тема: переходные процессы в цепях первого порядка.
Классический метод*

Содержание работы

Расчеты:

1. Составление и решение дифференциальных уравнений
2. Расчет без составления дифференциального уравнения

Теоретическая справка

Рассматривается задача расчета переходного режима (переходного процесса) в линейной электрической цепи, содержащей один накопитель энергии (индуктивность либо емкость). Расчет осуществляется в следующей последовательности (классический метод расчета):

1. Расчет независимого начального условия (ННУ) в цепи *до коммутации*: в цепи с емкостью следует определить напряжение на конденсаторе $u_C(0-)$, а в цепи с индуктивностью – ток в катушке $i_L(0-)$.

2. В цепи *после коммутации* составляется дифференциальное уравнение относительно искомой величины. Дифференциальное уравнение составляется на основе записи уравнений по законам Кирхгофа и компонентных уравнений:

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad \text{и} \quad u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

Если цепь содержит только постоянные или синусоидальные источники, то дифференциальное уравнение можно не составлять.

3. Определяется корень характеристического уравнения λ (или постоянная времени цепи τ): если для цепи составлено дифференциальное уравнение, то характеристическое (алгебраическое) уравнение получают, заменяя оператор дифференцирования d/dt на λ и приравнивая правую часть уравнения к нулю. Постоянная времени может быть найдена для пассивной электрической цепи (источники приняты равными нулю) по формулам:

$$\tau = R_3 C \quad \text{или} \quad \tau = L / R_3$$

где R_3 – входное сопротивление цепи относительно зажимов накопительного элемента (емкости либо индуктивности).

Постоянная времени связана с корнем характеристического уравнения соотношением:

4. Расчет установившегося режима в цепи: составляют эквивалентную схему для установившегося режима, когда (при $t \rightarrow \infty$)

переходной процесс считают завершившимся. При постоянных источниках такая схема строится заменой индуктивности на короткое замыкание, а емкости – на холостой ход. В эквивалентной схеме произвольным способом рассчитывают установившееся значение искомой величины.

5. Расчет зависящего начального условия (ЗНУ) – начального значения искомой величины в цепи после коммутации. Для этого составляют эквивалентную схему для начального момента времени ($t = 0$), заменяя индуктивность источником тока $i_L(0-)$ и емкость – источником напряжения $u_C(0-)$, так как в соответствии с *законами коммутации* ток в индуктивности и напряжение на емкости не меняются скачком. Начальное значение искомой величины получают, проводя расчет эквивалентной схемы произвольным методом, применяемым для расчета цепей *постоянного тока*.

Искомая величина (например, ток) в переходном режиме изменяется по закону:

$$i(t) = I_{уст} + Ae^{\lambda t}$$

где $I_{уст}$ – установившееся значение, A – постоянная интегрирования. Постоянную интегрирования находят, записывая выражение для начального момента времени: $i(0) = I_{уст} + A$.

Домашняя подготовка

Разобрать задачи №№ 6.1(р), 6.12(р)

Рабочее задание

1. Решить задачи №№ 6.3, 6.4, 6.14, 6.18*
2. Тест на расчет постоянной времени

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Объясните принцип формирования дифференциальных уравнений.
3. К какому классу относятся дифференциальные уравнения для токов и напряжений в линейной цепи?
4. Какие компоненты входят в состав интеграла дифференциального уравнения?
5. Как рассчитать постоянную времени цепи без составления дифференциального уравнения?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 17-32,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273.

Лабораторно-практическое занятие 19

*Тема: переходные процессы в цепях первого порядка.
Классический метод*

Содержание работы

Расчеты:

Расчет переходного процесса классическим методом

Эксперимент: экспериментальное определение постоянной времени цепи

Теоретическая справка

Экспериментальное определение постоянной времени цепи может осуществляться следующими способами:

1. Необходимо определить начальное и установившееся значения наблюдаемого переходного процесса; в произвольный момент времени t_0 найти значение напряжения $u(t_0)$. Так как переходной процесс подчиняется известному закону:

$$u(t) = U_{уст} + Ae^{-t/\tau} \quad ,$$

то по результатам измерений можно определить A , а затем и τ :

$$A = u(0) - U_{уст}, \quad \tau = -\frac{t_0}{\ln\left(\frac{u(t_0) - U_{уст}}{A}\right)}$$

2. Необходимо измерить длину подкасательной, как это показано на рис. 19.1.

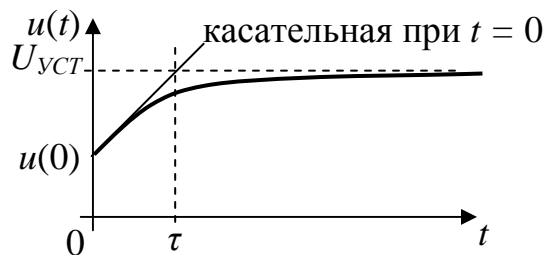


Рис. 19.1

Домашняя подготовка

1. Для схем рис. 19.2 (по вариантам: a , b – нечетный; v , z – четный) получить законы изменения напряжения $u_2(t)$ в интервалах импульса и паузы входного напряжения $u_1(t)$ прямоугольной формы – рис. 2.3. Нарисовать кривые напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$, считая постоянную

времени много меньшей длительности импульса ($t_{и}$) и паузы ($t_{п}$).

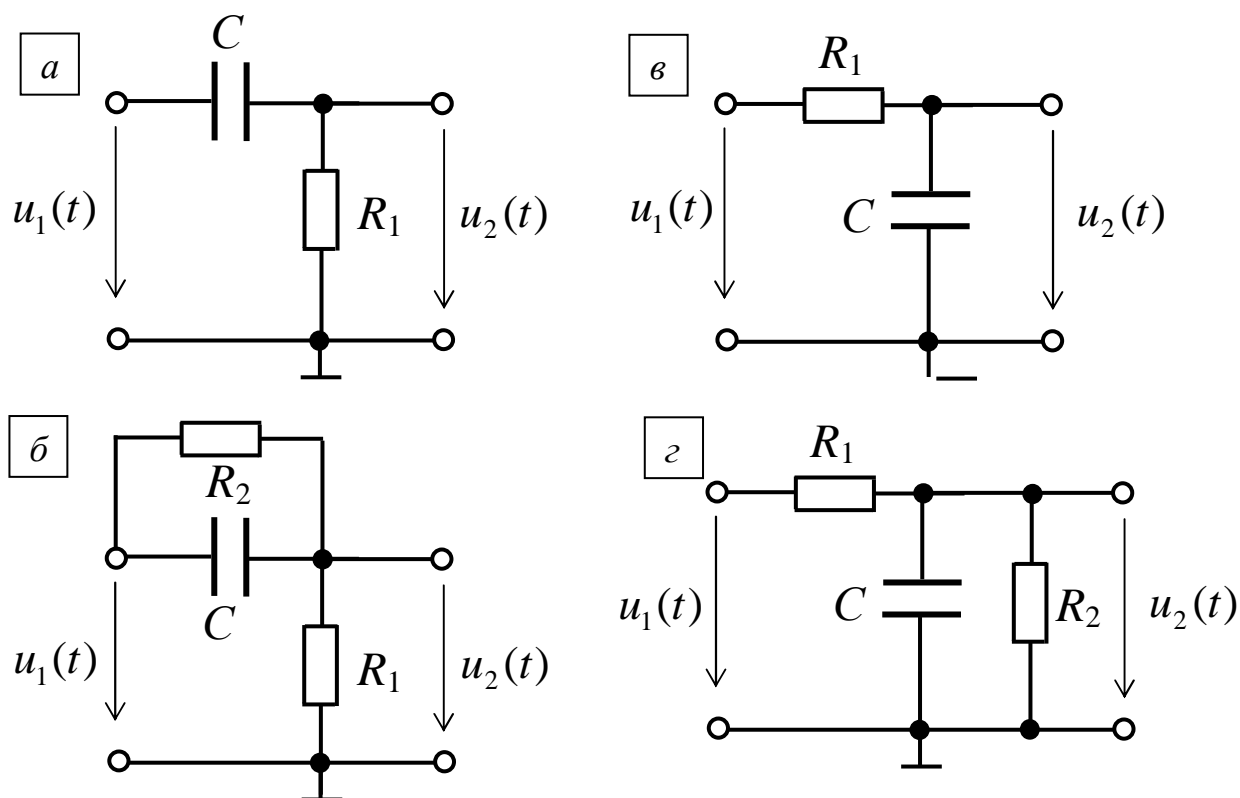


Рис. 19.2

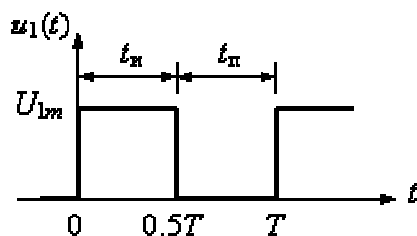


Рис. 19.3

Рабочее задание

1. Собрать электрическую цепь по рис. 19.2.а или 19.2.в (в соответствии с вариантом), подключив к входу цепи генератор напряжения прямоугольной формы рис. 19.3 ($t_{и}=t_{п}=0.5T$) с амплитудой $U_{1m}=1$ В и периодом $T=0.1$ мс.
2. Подключить к цепи осциллограф для измерения входного напряжения (первый канал) и выходного напряжения (второй канал). Получить экспериментальные кривые напряжения $u_2(t)$. Совместить на экране осциллографа кривую этого напряжения с кривой входного напряжения, зафиксировать результат.
3. По полученным данным определить установившееся значение выходного напряжения $u_{2уст}$ и постоянную времени τ в интервалах

- импульса и паузы (двумя способами). Результаты свести в таблицу.
4. Повторить пп. 1–3 для схемы 19.2.б, 19.2.г.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Объясните принцип формирования дифференциальных уравнений.
3. Как экспериментально определить постоянную времени?
4. Как рассчитать постоянную времени цепи без составления дифференциального уравнения?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 17-32
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 20

*Тема: переходные процессы в цепях первого порядка.
Классический метод*

Содержание работы

Расчеты:

1. Составление и решение дифференциальных уравнений
2. Расчет без составления дифференциального уравнения

Домашняя подготовка

1. Решить задачу № 6.15
2. Разобрать задачу № 6.19(р)

Рабочее задание

1. Решить задачи №№ 6.9, 6.53, 6.77
2. Составить дифференциальное уравнение, рассчитать ток i в цепи рис. 20.1, $R_1=R_2=1000$ Ом, $L=1$ мГн, $T = 1$ мкс.

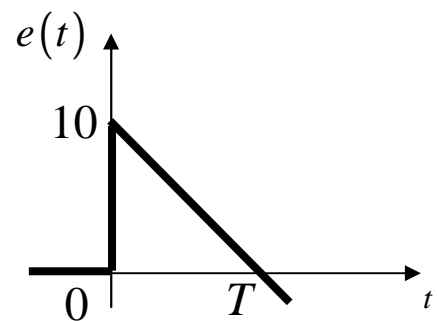
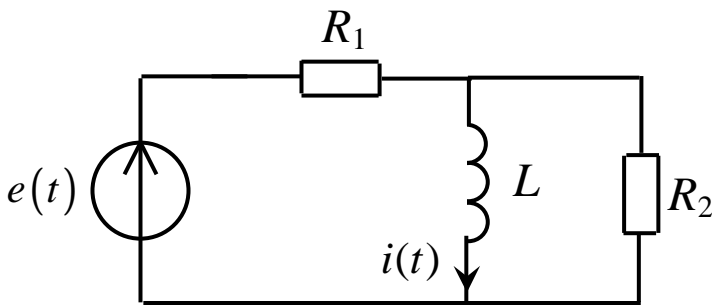


Рис. 20.1

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Объясните принцип формирования дифференциальных уравнений.
3. К какому классу относятся дифференциальные уравнения для токов и напряжений в линейной цепи?
4. Какие компоненты входят в состав интеграла дифференциального уравнения?
5. Как рассчитать постоянную времени цепи без составления дифференциального уравнения?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1., стр. 33-45

Лабораторно-практическое занятие 21

*Тема: переходные процессы в цепях второго порядка.
Классический метод расчета.*

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет без составления дифференциального уравнения

Эксперимент: исследование RLC контура

Теоретическая справка

Расчет переходного процесса в цепи с двумя накопительными элементами (например, в цепи, содержащей емкость и индуктивность) осуществляется в том же порядке, что и расчет в цепи с одним накопительным элементом:

1. В цепи до коммутации необходимо определить токи в катушках и/или напряжения на конденсаторах $i_L(0-)$ и $u_C(0-)$, очевидно в цепи с двумя накопителями – два независимых начальных условия.

2. В цепи *после коммутации* составляется дифференциальное уравнение относительно искомой величины – обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка.

3. Определяются корни характеристического уравнения λ_1, λ_2 . Вид общего решения однородного дифференциального уравнения зависит от значений корней:

- а) корни действительные, разные $\lambda_1 \neq \lambda_2$: $A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}$ – аperiodический процесс;

- б) корни действительные, равные $\lambda_1 = \lambda_2$: $A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 t e^{\lambda_1 t}$ – предельный аperiodический процесс;

- в) комплексно-сопряженные корни $\lambda_1 = -\alpha + j\omega_{CB} = (\lambda_2)^*$: $A e^{-\alpha t} \sin(\omega_{CB} t + \varphi)$ – колебательный процесс.

Каждый вид общего решения однородного уравнения содержит две постоянных интегрирования A_1, A_2 (A и φ в случае колебательного процесса).

4. Расчет установившегося режима в цепи при $t \rightarrow \infty$. При постоянных источниках индуктивности заменяются на короткие замыкания, а емкости – на холостой ход, произвольным способом рассчитывается установившееся значение искомой величины.

5. Для расчета двух постоянных интегрирования необходимы два независимых начальных условия: начальное значение искомой величины и начальное значение первой производной искомой величины. Для

определения ЗНУ записывают уравнения по законам Кирхгофа, дифференцируют полученные уравнения, используют компонентные уравнения.

Домашняя подготовка

1. В цепи рис. 21.1 рассчитать переходные процессы для u_C , i , u_L при $R = 1$ и 10 кОм, $C = 5,6$ нФ, $L = 31$ мГн на интервалах импульса и паузы ($t_{\text{и}}=t_{\text{п}}=0,5T$) входного напряжения амплитудой 1 В, считая, что переходной процесс за время $0,5T$ успевает завершиться. Построить графики переходных процессов при $0 \leq t < T$ ($T=0,5$ мс).

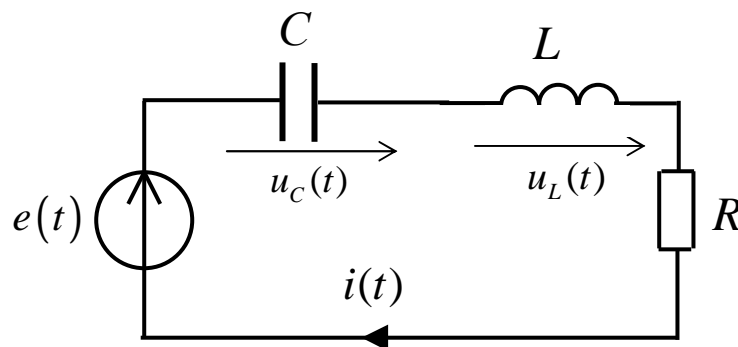


Рис. 21.1

2. Нарисовать схемы для наблюдения переходных процессов u_C , u_R , u_L , предусмотрев подключение генератора импульсов и осциллографа. Подготовить формулы для расчета постоянной затухания α и частоты свободных колебаний $\omega_{\text{СВ}}=2\pi/T_{\text{СВ}}$ по результатам наблюдений колебательного процесса (здесь $T_{\text{СВ}}$ – период свободных колебаний). Сделать необходимые пояснения на графиках, построенных в п.1.

Рабочее задание

1. Нарисовать и собрать электрическую цепь для наблюдения напряжения на сопротивлении (1 кОм), предусмотрев в качестве источника генератор напряжения прямоугольной формы с амплитудой $U_{\text{1м}}=1$ В. Установить частоту генератора в соответствии с п. 1 домашней подготовки.
2. Подключить к цепи осциллограф для измерения входного напряжения (первый канал) и выходного напряжения (второй канал). Получить экспериментальные кривые напряжений и сопоставить их с данными п. 1 домашней подготовки.
3. По полученному графику выходного напряжения определить коэффициент затухания α и период свободных колебаний $T_{\text{СВ}}$. Результаты представить в виде таблицы.
4. Изменить величину сопротивления R на 10 кОм. Получить экспериментальные кривые напряжений. Объяснить результат.

5. Повторить пп. 1, 2, 4 для наблюдения напряжения на емкости.
6. Повторить пп. 1, 2, 4 для наблюдения напряжения на индуктивности.

Контрольные вопросы

1. Что такое ЗНУ и ННУ?
2. Как определить ЗНУ с помощью специальных схем?
3. Как экспериментально определить постоянную затухания и частоту свободных колебаний?
4. Перечислите виды переходных процессов в цепях второго порядка.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 17-45,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 22

*Тема: переходные процессы в цепях второго порядка.
Классический метод расчета*

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет без составления дифференциального уравнения

Теоретическая справка

Характеристическое уравнение для произвольной цепи может быть получено без составления дифференциального уравнения:

1. Следует принять независимые источники равными нулю; емкости замерить элементами с сопротивлением $1/\lambda C$, индуктивности – с сопротивлением λL .

2. В полученной схеме *разорвать* любую ветвь и записать выражение для входного сопротивления $Z_{ВХ}(\lambda)$ (или входной проводимости $Y_{ВХ}(\lambda)$) относительно разрыва.

3. Уравнение $Z_{ВХ}(\lambda)=0$ либо $Y_{ВХ}(\lambda)=0$ совпадает с характеристическим.

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи №№ 6.23(р), 6.27(р).
2. Решить задачу № 6.33, считая источник постоянным $E=20$ В.

Рабочее задание

1. Решить задачи: 6.24, 6.26, 6.28
2. Контрольная работа

Контрольные вопросы

1. Как определить ЗНУ с помощью специальных схем?
2. Перечислите виды переходных процессов в цепях второго порядка.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 17-45,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 23

*Тема: переходные процессы в цепях первого и второго порядка.
Операторный метод расчета*

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет переходных процессов операторным методом

Теоретическая справка

Расчет переходного процесса операторным методом состоит в следующем:

1. Определение ННУ;
2. Построение операторной схемы (рис. 23.1)

Исходный элемент					
Эквивалентная операторная схема					

Рис. 23.1

Здесь $I(p)$, $U(p)$ изображения по Лапласу для тока и напряжения, соответственно; $E(p)$, $J(p)$ – изображения источников (например, для постоянных источников в цепи после коммутации в нулевой момент времени, такие изображения имеют вид: E/p и J/p , где E – постоянная ЭДС, J – сила тока источника);

3. Расчет изображения искомой величины в операторной схеме произвольным способом.

4. Переход от изображения к оригиналу с помощью обратного преобразования Лапласа по таблицам, либо с помощью теоремы разложения:

а) изображение искомой величины представляется в виде отношения полиномов степени p :

$$I(p) = \frac{N(p)}{D(p)}$$

б) расчет полюсов p_1, p_2, \dots, p_n функции-изображения:

$$D(p) = 0 \rightarrow p_1, p_2, \dots, p_n$$

в) собственно расчет оригинала:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{D'(p_k)} e^{p_k t}$$

где $D'(p)$ – производная $D(p)$ по переменной p .

В случае кратных (равных) полюсов применяется правило Лопиталья для раскрытия неопределенности; в случае наличия пар комплексно-сопряженных полюсов можно применить следующее свойство:

$$p_1 = (p_2)^* \rightarrow \frac{N(p_1)}{D'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N(p_2)}{D'(p_2)} e^{p_2 t} = 2 \operatorname{Re} \left[\frac{N(p_1)}{D'(p_1)} e^{p_1 t} \right]$$

Домашняя подготовка

1. Решить задачи №№ 6.40, 6.41.
2. Разобрать задачу 6.42(р).

Рабочее задание

1. Решить задачи: 6.50, 6.53, 6.46

Контрольные вопросы

1. Запишите формулу преобразования Лапласа.
2. Объясните принцип формирования операторной схемы.
3. Какие способы перехода от изображения к оригиналу вы знаете?
4. Запишите формулу для вычисления оригинала с помощью теоремы разложения.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр.93-100,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 24

Тема: импульсная и переходная характеристики цепи

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет переходной характеристики классическим методом
2. Расчет переходной характеристики операторным методом

Теоретическая справка

Переходная характеристика $h(t)$ определяется как реакция линейной пассивной цепи на входное воздействие в виде единичной ступенчатой функции $1(t)$ при нулевых независимых начальных условиях. Под входным воздействием подразумевают напряжение на входе цепи, а под реакцией цепи – переходной процесс для искомой величины (напряжения на выходе), при этом переходная характеристика – безразмерна. В случае, если искомая величина – ток, то аналогично определяю переходную проводимость $g(t)$; если входное воздействие является током, а искомая величина – напряжение, то используют переходное сопротивление $R(t)$. Если и входное воздействие и выходная величина токи, то определяют переходную характеристику по току $h_i(t)$.

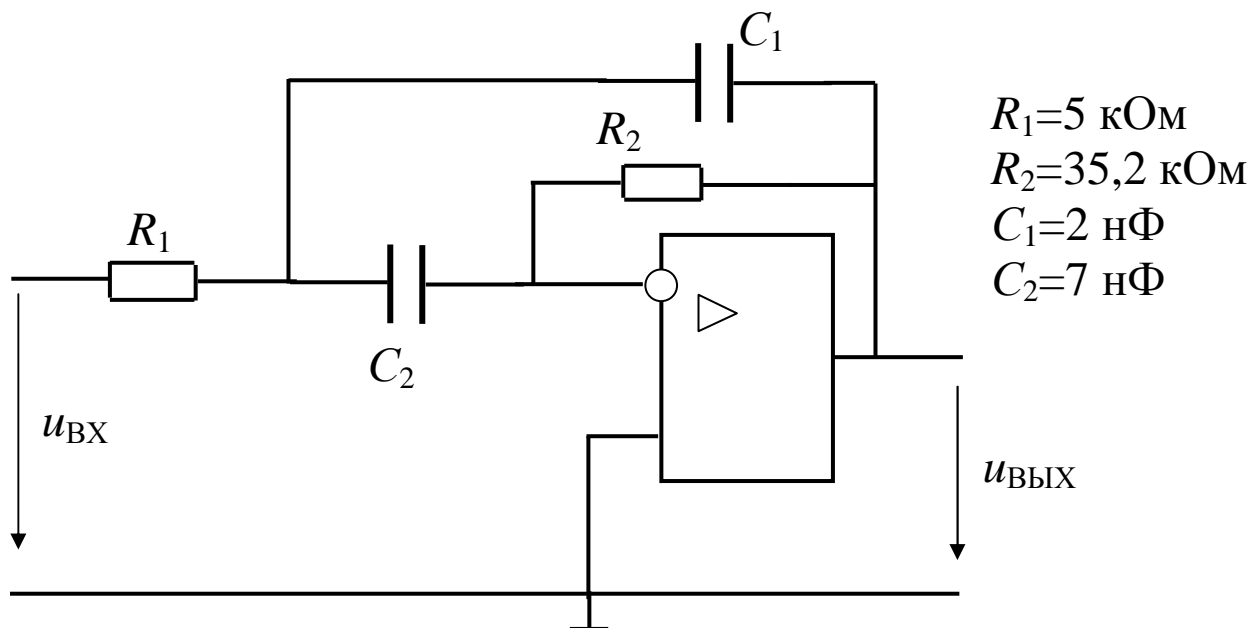
Импульсная характеристика цепи $w(t)$ – реакция пассивной линейной цепи на входное воздействие в виде дельта-импульса (функции Дирака) $\delta(t)$.

Домашняя подготовка

1. Найти переходную характеристику в задаче 6.1, считая входным воздействием источник ЭДС, а напряжение u_C – искомой величиной.
2. Найти переходное сопротивление в задаче 6.13, считая входным воздействием источник тока, а напряжение u_L – искомой величиной.

Рабочее задание

1. Найти переходную проводимость в задаче 6.23, считая входным воздействием источник ЭДС, а ток i_L – искомой величиной.
2. В цепи рис. 24.1 найти переходную характеристику (применить операторный метод): нарисовать эквивалентную операторную схему, считая операционный усилитель идеальным, получить систему уравнений по методу узловых потенциалов, выразить управляющее и выходное напряжения, перейти к пределу при коэффициенте усиления $k \rightarrow \infty$, выполнить обратное преобразование Лапласа.



Контрольные вопросы

1. Что такое переходная характеристика? Импульсная характеристика?
2. Каковы особенности расчета переходных характеристик в цепях с активными элементами (операционными усилителями)?
3. При использовании операторного метода для расчета переходной характеристики – какое изображение соответствует входному воздействию? При расчете импульсной характеристики?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 17-45,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 25

Тема: переходная характеристика и интеграл Дюамеля

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет переходных процессов с помощью интеграла Дюамеля

Теоретическая справка

Для расчета переходного процесса в линейной цепи относительно какой-либо одной искомой (выходной) величины при действии произвольно меняющегося во времени источника тока или напряжения применяется интеграл Дюамеля:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = u_{\text{ВХ}}(0)h(t) + \int_0^t u'_{\text{ВХ}}(x)h(t-x)dx$$

здесь $u_{\text{ВХ}}(t)$ – входное напряжение (напряжение источника), $u_{\text{ВЫХ}}(t)$ – выходное напряжение (искомая величина), $h(t)$ – переходная характеристика цепи.

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачу 6.65(р)
2. Решить задачи 6.52, 6.66

Рабочее задание

1. Решить задачи: 6.67, 6.64, 6.69

Контрольные вопросы

1. Как определяют переходную и импульсную характеристику?
2. Каким образом связаны переходная, импульсная характеристики и передаточная функция?
3. Запишите интеграл Дюамеля, интеграл свертки.

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 121-127

Лабораторно-практическое занятие 26

Тема: взаимосвязь частотных и временных характеристик, активные цепи.

Содержание работы

Расчеты:

1. Анализ временных характеристик цепи на основе частотных характеристик
2. Расчет и моделирование активной RC-цепи

Теоретическая справка

Частотные и временные характеристики цепи связаны между собой следующими соотношениями:

$$w(t) = \mathcal{L}^{-1}(W(p))$$

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{W(p)}{p}\right)$$

здесь $w(t)$ – импульсная характеристика, $h(t)$ – переходная характеристика, $W(p)$ – передаточная функция цепи, \mathcal{L}^{-1} – обратное преобразование Лапласа.

Пределные соотношения для преобразования Лапласа позволяют определить соотношение между характерными значениями АЧХ, ФЧХ и переходной характеристики:

$$h(0) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} (W(j\omega))$$

$$h(t \rightarrow \infty) = \lim_{\omega \rightarrow 0} (W(j\omega))$$

Домашняя подготовка

1. Для цепи рис. 26.1.а (нечетный вариант) или 26.1.б (четный вариант) нарисовать эквивалентную схему, используя схему замещения идеального операционного усилителя, охваченного петлей обратной связи;

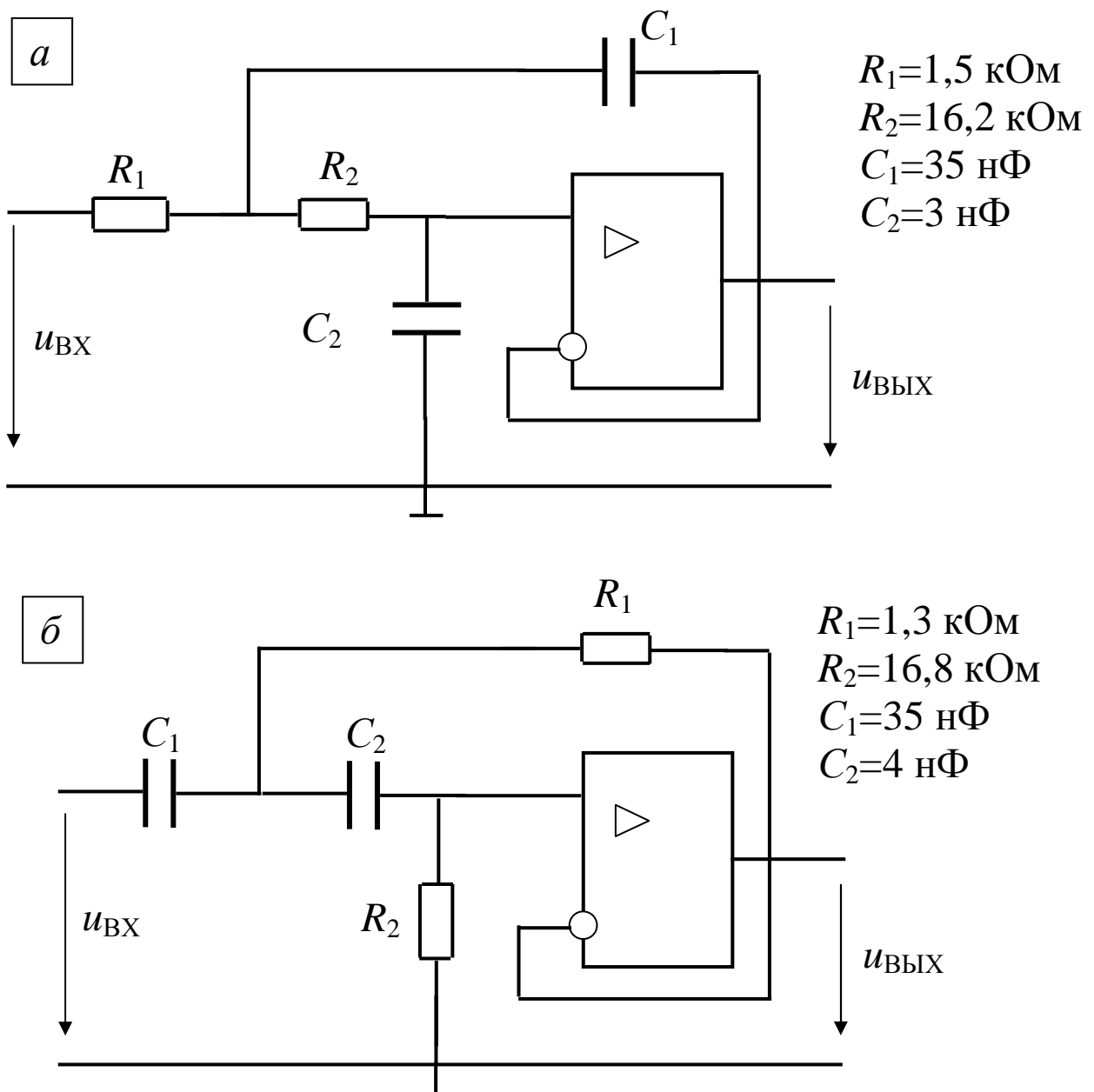


Рис. 26.1

2. Составить систему уравнений по методу узловых потенциалов в частотной области, принимая обозначение $p = j\omega$. Выразить управляющий потенциал, выходное напряжение, получить выражение для передаточной функции. Построить АЧХ и ФЧХ.
3. Не производя расчет переходной характеристики, качественно построить ее график, используя взаимосвязь частотных и временных характеристик.

Рабочее задание

1. С помощью передаточной функции цепи, полученной в домашней подготовке, используя теорему разложения, получить выражение для

- переходной характеристики цепи, построить график.
2. С помощью программы *Design Center* собрать модель рассматриваемой цепи, произвести расчет АЧХ и ФЧХ на основе численного моделирования.
 3. С помощью программы *Design Center* собрать модель рассматриваемой цепи, произвести численный расчет переходного процесса, вызываемого действием одиночного прямоугольного импульса входного напряжения амплитудой 1 В и длительностью 1 мс.

Контрольные вопросы

1. Как связаны между собой передаточная функция и переходная, импульсная характеристики?
2. Каким образом, используя графики АЧХ, ФЧХ, можно качественно построить переходную характеристику цепи?
3. Нарисуйте качественные графики частотных и временных характеристик *RLC*-контура при съеме выходного напряжения с сопротивления, емкости, индуктивности.
4. Нарисуйте эквивалентные схемы реального и идеального операционного усилителя.

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 93-109,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 27

Тема: метод переменных состояния

Содержание работы

Расчеты:

1. Составление уравнений состояния цепи
2. Расчет переходных процессов с помощью метода переменных состояния

Теоретическая справка

Динамические процессы в линейной электрической цепи описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнения состояния), в матричной форме:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \mathbf{A}_1\bar{x} + \mathbf{B}_1\bar{v}$$

где

$\bar{x} = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]^T$ – вектор-столбец переменных состояния;

$\bar{v} = [v_1(t) \ v_2(t) \ \dots \ v_m(t)]^T$ – вектор-столбец входных переменных;

$\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1$ – матрицы $[n \times n]$ и $[n \times m]$ соответственно.

В электрической цепи в качестве переменных состояния целесообразно использовать напряжения на емкостях и токи в индуктивностях. Входные переменные соответствуют независимым источникам электрической энергии.

Любые другие (выходные) величины в электрической цепи могут быть определены в произвольный момент времени с помощью системы линейных алгебраических уравнений:

$$\bar{y} = \mathbf{A}_2\bar{x} + \mathbf{B}_2\bar{v}$$

Здесь

$\bar{y} = [y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_k(t)]^T$ – вектор-столбец выходных переменных;

$\mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2$ – матрицы $[k \times n]$ и $[k \times m]$ соответственно.

Таким образом расчет переходного процесса методом переменных состояния состоит из двух этапов:

1) формирование уравнений состояния (то есть определение матриц $\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_1$ и $\mathbf{A}_2, \mathbf{B}_2$);

2) собственно решение (интегрирование) уравнений состояния.

Формирование матриц выполняется следующим образом:

а) составляется эквивалентная схема, в которой емкости заменяются на источники ЭДС u_C , а индуктивности – на источники тока i_L .

б) в соответствии с принципом суперпозиции, произвольным способом рассчитываются коэффициенты (взаимные частичные проводимости, взаимные частичные сопротивления, коэффициенты передачи тока, коэффициенты передачи напряжения), связывающие независимые источники энергии, источники u_C и i_L с одной стороны, и токи i_C , напряжения u_L , а также выходные величины, с другой стороны.

в) применение компонентных уравнений

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad \text{и} \quad u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

позволяет выразить элементы матриц \mathbf{A}_1 , \mathbf{B}_1 через найденные коэффициенты для i_C и u_L , в то время как элементы матриц \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_2 просто совпадают с соответствующими коэффициентами для выходных величин.

Решение уравнений состояния записывается в общем виде с помощью интеграла от матричной экспоненты:

$$\bar{x}(t) = e^{\mathbf{A}t} \bar{x}(0) + e^{\mathbf{A}t} \int_0^t e^{-\mathbf{A}t} \mathbf{B}_1 \bar{v}(t) dt$$

Вычисление матричной экспоненты осуществляется, например с помощью формулы Бейкера:

$$e^{\mathbf{A}t} = \frac{D_{n-1}}{D} \mathbf{A}_1^{n-1} + \dots + \frac{D_2}{D} \mathbf{A}_1^2 + \frac{D_1}{D} \mathbf{A}_1 + \frac{D_0}{D} \mathbf{1}$$

где

$$D = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \lambda_1^2 & \lambda_2^2 & \dots & \lambda_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda_1^{n-1} & \lambda_2^{n-1} & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{vmatrix} \quad D_i = \begin{vmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{\lambda_1 t} & e^{\lambda_2 t} & \dots & e^{\lambda_n t} \\ \lambda_1^{i+1} & \lambda_2^{i+1} & \dots & \lambda_n^{i+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{vmatrix}$$

– определители Вандермонда, а λ_i – собственные числа матрицы \mathbf{A}_1 .

Начальные значения $x(0)$ переменных состояния соответствуют независимым начальным условиям и должны быть вычислены в цепи до коммутации.

Иначе можно получить решение уравнений состояния с помощью преобразования Лапласа:

$$\mathbf{X}(p) = (\mathbf{1}p - \mathbf{A}_1)^{-1} (\mathbf{B}_1 \mathbf{V}(p) + \bar{x}(0)), \quad \bar{x} = \mathcal{L}^{-1}(\mathbf{X}(p))$$

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи 6.93(р), 6.88(р) (3 часть)
2. Решить задачу 6.92 (составить уравнения состояния)

Рабочее задание

1. Решить задачи: 6.94 (с помощью матричной экспоненты), 6.97 (с помощью преобразования Лапласа)

Контрольные вопросы

1. Какие величины используются в качестве переменных состояния?
2. На примере последовательного RLC-контура сформируйте уравнения состояния.
3. Как, зная уравнения состояния (при известных матрицах \mathbf{A}_1 , \mathbf{B}_1 и \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_2), найти корни характеристического уравнения цепи?
4. Как, зная уравнения состояния (при известных матрицах \mathbf{A}_1 , \mathbf{B}_1 и \mathbf{A}_2 , \mathbf{B}_2), найти установившийся режим при постоянных источниках?

Литература

1. *Демирчян К.С.*, Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 55-66
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с., стр. 264-273

Лабораторно-практическое занятие 28

Тема: длинные линии в установившемся режиме

Содержание работы

Расчеты:

2. Расчет вторичных параметров линии
3. Расчет установившегося режима в длинной линии

Теоретическая справка

Рассматривается цепь с распределенными параметрами в установившемся режиме – двухпроводная длинная линия при воздействии синусоидальных источников электрической энергии. В установившемся режиме при синусоидальных источниках осуществляется переход к комплексным амплитудам тока и напряжения (см. раздел линейные цепи синусоидального тока, лабораторные работы №№). Решение телеграфных уравнений в этом случае может быть записано в виде суммы прямых (падающих) и обратных (отраженных) волн напряжения и тока:

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{U}_{\text{ПР}}(x) + \dot{U}_{\text{ОБР}}(x) = \dot{A}_1 e^{-\gamma x} + \dot{A}_2 e^{\gamma x} \\ \dot{I}(x) = \dot{I}_{\text{ПР}}(x) - \dot{I}_{\text{ОБР}}(x) = \frac{\dot{A}_1}{Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{\dot{A}_2}{Z_B} e^{\gamma x} \end{cases}$$

где \dot{A}_1, \dot{A}_2 – комплексные постоянные интегрирования, называемые также постоянными прямой и обратной волны;

γ и Z_B – вторичные параметры линии, постоянная распространения и волновое сопротивление;

$$Z_B = \frac{\dot{U}_{\text{ПР}}(x)}{\dot{I}_{\text{ПР}}(x)} = \frac{\dot{U}_{\text{ОБР}}(x)}{\dot{I}_{\text{ОБР}}(x)}$$

ось координат x направлена от генераторного конца линии ($x=0$) к нагрузочному ($x=l$), где l – длина линии (см. рис. 28.1).

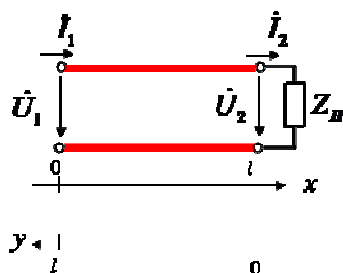


Рис. 28.1

Вторичные параметры определяются следующим образом:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(j\omega L_0 + r_0)(j\omega C_0 + g_0)}$$

$$Z_B = \sqrt{\frac{j\omega L_0 + r_0}{j\omega C_0 + g_0}}$$

где r_0 – сопротивление проводников на единицу длины (Ом/м); g_0 – проводимость среды между проводниками на единицу длины (См/м); C_0 – удельная емкость между проводниками (Ф/м); L_0 – индуктивность контура, образованного участками проводов (Гн/м) – первичные параметры линии;

коэффициент α (действительная часть постоянной распространения) называют постоянной затухания;

коэффициент β (мнимая часть постоянной распространения) называют постоянной фазы.

Выражения для тока и напряжения можно представить в виде:

$$\begin{cases} \dot{U}(x) = \dot{A}_1 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + \dot{A}_2 e^{\alpha x} e^{j\beta x} \\ \dot{I}(x) = \frac{\dot{A}_1}{Z_B} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} - \frac{\dot{A}_2}{Z_B} e^{\alpha x} e^{j\beta x} \end{cases}$$

Из этих выражений следует, что коэффициент α определяет изменение (затухание) амплитуды прямой и обратной волн при распространении вдоль линии; коэффициент β определяет изменение фазы прямой и обратной волн при распространении вдоль линии.

Фазовая скорость в линии задается соотношением:

$$v_\phi = \frac{\omega}{\beta},$$

а длина волны λ :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \leftrightarrow \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Для расчета режима в линии (то есть для расчетов токов и напряжений в произвольных точках линии) следует определить значения постоянных интегрирования. Для этого необходимо использовать известные токи или напряжения на концах линии – граничные условия. На пассивной нагрузке граничное условие задается в виде соотношения между током и напряжением – в виде сопротивления нагрузки; в этом случае удобно перейти к другой системе координат – направленной от нагрузочного конца линии ($y=0$) к генераторному ($y=l$):

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{C}_1 e^{\alpha y} e^{j\beta y} + \dot{C}_2 e^{-\alpha y} e^{-j\beta y} \\ \dot{I}(y) = \frac{\dot{C}_1}{Z_B} e^{\alpha y} e^{j\beta y} - \frac{\dot{C}_2}{Z_B} e^{-\alpha y} e^{-j\beta y} \end{cases}$$

Здесь введены новые постоянные интегрирования, связь между которыми может быть записана с помощью коэффициента отражения N :

$$N = \frac{\dot{U}_{\text{ОБР}}}{\dot{U}_{\text{ПР}}} = \frac{\dot{I}_{\text{ОБР}}}{\dot{I}_{\text{ПР}}} = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B}$$

$$\dot{C}_2 = N\dot{C}_1$$

Граничные условия могут быть заданы непосредственно, но часто возникает необходимость рассчитывать ток или напряжение на генераторном конце линии, используя схему цепи с сосредоточенными параметрами, подключенную к генераторному концу линии, заменяя саму линию ее входным сопротивлением:

$$Z_{BX}(y) = \frac{\dot{U}(y)}{\dot{I}(y)} = Z_B \frac{1 + Ne^{-2\gamma x}}{1 - Ne^{-2\gamma x}}$$

В случае, когда сопротивление нагрузки равно волновому $Z_H = Z_B$ в линии отсутствует отраженная волна ($N=0$) – режим согласованной нагрузки. Для определения вторичных параметров линии можно использовать соотношение между входным сопротивлением линии Z_K при коротком замыкании на нагрузке и входным сопротивлением линии Z_X при холостом ходе на нагрузке:

$$\text{th}(\gamma l) = \sqrt{Z_K / Z_X}$$

$$Z_B = \sqrt{Z_K Z_X}$$

Домашняя подготовка

1. Ознакомьтесь с решением задач: 10.1(р), 10.3(р),

Рабочее задание

1. Решить задачи: 10.11, 10.12, 10.13, 10.21, 10.17

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятиям длина волны, фазовая скорость.
2. В каких случаях следует рассматривать цепь с распределенными параметрами в переходном, установившемся режиме?
3. Что называют первичными, а что вторичными параметрами линии?
4. При каком условии в линии отсутствует отраженная волна?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 275-277, 280-283,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с., стр. 9-15.

Лабораторно-практическое занятие 29

Тема: длинные линии без потерь в установившемся режиме

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет установившегося режима в длинной линии без потерь

Теоретическая справка

Длинная линия, в которой отсутствуют омические потери ($r_0 = 0$, $g_0 = 0$), называется линией без потерь. В такой линии постоянная распространения – мнимая величина:

$$\gamma = j\beta = \sqrt{j\omega L_0 j\omega C_0} = j\omega\sqrt{L_0 C_0},$$

волны распространяются вдоль линии не затухая; волновое сопротивление – действительная величина:

$$Z_B = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Распределение токов и напряжений в линии подчиняется следующим формулам:

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{C}_1 e^{j\beta y} + \dot{C}_2 e^{-j\beta y} \\ \dot{I}(y) = \frac{\dot{C}_1}{Z_B} e^{j\beta y} - \frac{\dot{C}_2}{Z_B} e^{-j\beta y} \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \dot{U}(y) = \dot{U}_2 \cos \beta y + j\dot{I}_2 Z_B \sin \beta y \\ \dot{I}(y) = j\frac{\dot{U}_2}{Z_B} \sin \beta y + \dot{I}_2 \cos \beta y \end{cases}$$

Входное сопротивление может быть найдено по формуле:

$$Z_{BX}(y) = Z_B \frac{Z_H + jZ_B \operatorname{tg} \beta y}{Z_B + jZ_H \operatorname{tg} \beta y}$$

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачу 10.22(р).
2. Решить задачи: 10.14, 10.20, 10.23

Рабочее задание

1. Решить задачи: 10.25(р), 10.36(р), 10.37, 10.32, 10.31

Контрольные вопросы

1. При каких значениях первичных параметров длинная линия – без потерь?
2. Каковы особенности вторичных параметров длинных линий без потерь?
3. Напишите формулу для коэффициента отражения.
4. Запишите решение телеграфных уравнений в различной форме.

Литература

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 284-290,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с., стр. 9-15.

Лабораторно-практическое занятие 30

Тема: Согласование в длинных линиях

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет согласующих устройств в длинной линии без потерь

Теоретическая справка

Задача согласования некоторой произвольной активно-реактивной нагрузки с длинной линией состоит в обеспечении согласованного режима в линии, присоединенной к генератору. В согласованной части линии отсутствует отраженная волна, иными словами, эта часть линии работает в режиме бегущей волны. Для решения задачи согласования используются специальные согласующие устройства (СУ, рис. 30.1), обеспечивающие выполнение условия:

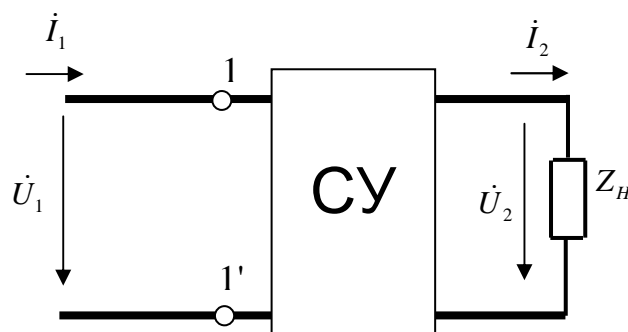


Рис. 30.1

$$Z_{BX\ 1-1'} = Z_B$$

Согласующие устройства могут содержать:

а) шлейф – отрезок длинной линии с коротким замыканием (КЗ-шлейф) или с холостым ходом (ХХ-шлейф) на конце, при этом входное сопротивление шлейфа имеет чисто реактивный характер (то есть является мнимой величиной); шлейф может быть включен в линию последовательно или параллельно; длина шлейфа выбирается таким образом, чтобы компенсировать мнимую часть сопротивления нагрузки;

б) четвертьволновый трансформатор – отрезок линии длиной $0,25\lambda$, включаемый каскадно для согласования чисто активной нагрузки; волновое сопротивление трансформатора рассчитывается по формуле:

$$Z_{BT} = \sqrt{Z_B R_H}$$

Согласования можно добиться одним из следующих способов:

– компенсировать реактивную составляющую нагрузки шлейфом

(шлейф при этом подключается непосредственно к нагрузке), а активную составляющую нагрузки согласовать с помощью четвертьволнового трансформатора;

– разместить четвертьволновый трансформатор в точке, где входное сопротивление несогласованной линии оказывается чисто активным (то есть в точке минимума, либо максимума напряжения/тока);

– найти в несогласованной линии точку, в которой действительная часть входного сопротивления равна волновому сопротивлению линии, а мнимую часть входного сопротивления скомпенсировать с помощью последовательного шлейфа;

– найти в несогласованной линии точку, в которой действительная часть входной проводимости равна величине, обратной волновому сопротивлению линии, а мнимую часть входной проводимости скомпенсировать с помощью параллельного шлейфа.

Степень согласования в линии оценивается с помощью коэффициента стоячей волны (КСВ), либо коэффициента бегущей волны (КБВ):

$$\text{КСВ} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1+|N|}{1-|N|} = \text{КБВ}^{-1}$$

Домашняя подготовка

1. Решить задачи: 10.30, 10.34.
2. Разобрать задачи 10.38(р), 10.44(р).

Рабочее задание

1. Решить задачи: 10.40, 10.42, 10.43

Контрольные вопросы

1. Какие согласующие устройства на основе отрезков длинных линий вы знаете?
2. Каковы особенности согласования с помощью четвертьволнового трансформатора?
3. Можно ли согласовать чисто реактивную нагрузку?
4. Каковы достоинства и недостатки различных типов согласующих устройств?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 284-290,

2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с., стр. 9-15

Лабораторно-практическое занятие 31

Тема: Переходные процессы в длинных линиях

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет переходного режима в длинной линии без потерь

Теоретическая справка

Расчет переходных режимов в длинной линии без потерь основан на поэтапном формировании бегущих волн – падающих (распространяющихся от генераторного конца линии к нагрузочному) и отраженных (распространяющихся от нагрузочного конца линии к генераторному). Принцип суперпозиции позволяет рассчитать ток или напряжение в любой точке линии в любой момент времени как сумму падающих и отраженных волн, сформировавшихся к этому моменту времени.

При формировании прямых волн следует учитывать, что цепь генератора, подключенная к длинной линии, отдает в линию энергию в виде бегущей волны, причем соотношение между волнами тока и напряжения задается волновым сопротивлением z_B . Таким образом, может быть получена эквивалентная схема, в которой линия моделируется резистивным элементом, сопротивление которого равно волновому (рис. 31.1).

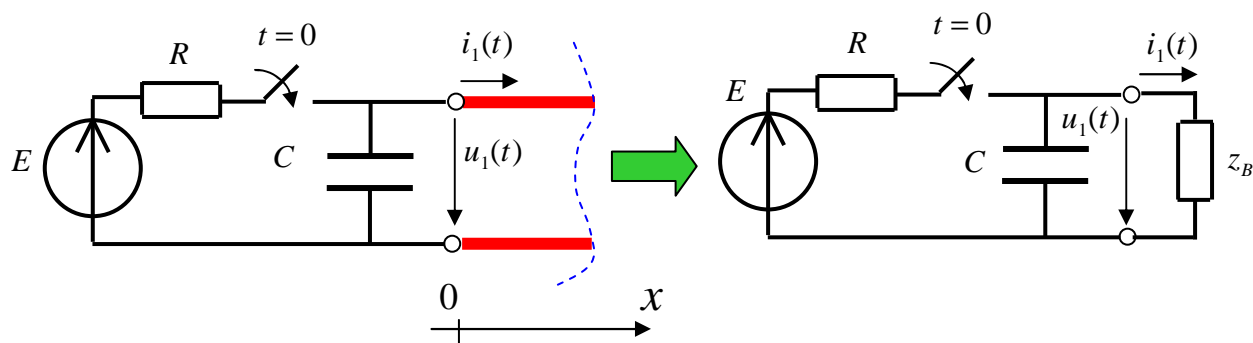


Рис. 31.1

В случае чисто активной нагрузки отраженные волны можно рассчитывать с помощью коэффициента отражения:

$$n = \frac{R_H - z_B}{R_H + z_B}$$

Если нагрузка представляет собой цепь, содержащую реактивные элементы, то следует использовать эквивалентную схему (схему Петерсона, рис. 31.2):

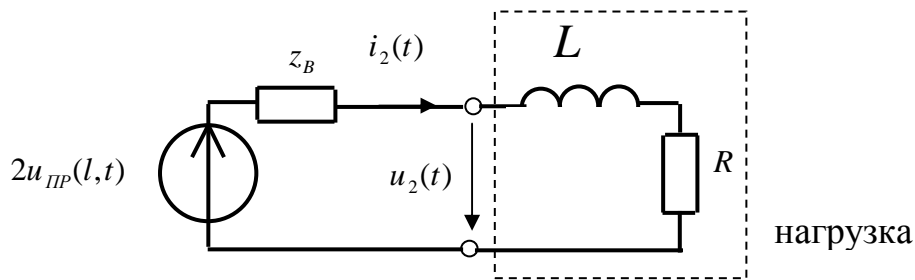


Рис. 31.2

В эквивалентной схеме рассчитывается переходный процесс для тока и напряжения в нагрузке (например, классическим методом), а затем получаются отраженные волны тока и напряжения:

$$u_o(t) = u_2(t) - u_{II}(t)$$

$$i_o(t) = -i_2(t) + i_{II}(t)$$

Когда отраженная волна достигает генераторного конца линии, следует рассчитывать переотражение, используя коэффициент отражения от генераторного конца линии, либо аналог схемы Петерсона для расчета переходного процесса для тока и напряжения на входе в линию.

Длительность переходного процесса в линии определяется временем распространения сигнала вдоль линии и количеством переотражений в линии, которые необходимо учесть, прежде чем процесс можно будет считать завершенным (когда все последующие формируемые волны будут вносить пренебрежимо малый вклад в режим линии).

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи: 11.6(p), 11.7(p)

Рабочее задание

1. Решить задачи: 11.2, 11.3, 11.4

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте эквивалентную схему для расчета отраженной волны.
2. Каков порядок расчета отраженной волны с помощью операторного коэффициента отражения?
3. На какое сопротивление нагружен генератор в момент подключения к длинной линии?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 291-311,
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. *Бутырина* П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с., стр. 33-39.

Лабораторно-практическое занятие 32

Тема: Нелинейные резистивные цепи постоянного тока

Содержание работы

Расчеты:

1. Расчет статических режимов в нелинейных резистивных цепях

Эксперимент: измерение вольтамперной характеристики полупроводниковых диода и стабилитрона

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи 7.1(p), 7.14(p)
2. Решить задачу 7.2

Рабочее задание

1. Решить задачи: 7.3, 7.4, 7.15.
2. Нарисовать и собрать электрическую цепь – рис. 32.1, дополнив ее измерительными приборами. Изменяя величину резистора R (в пределах от 100 до 10000 Ом), измерить напряжения на зажимах диода (U_D) и ток цепи (I), результаты представить в виде таблицы.

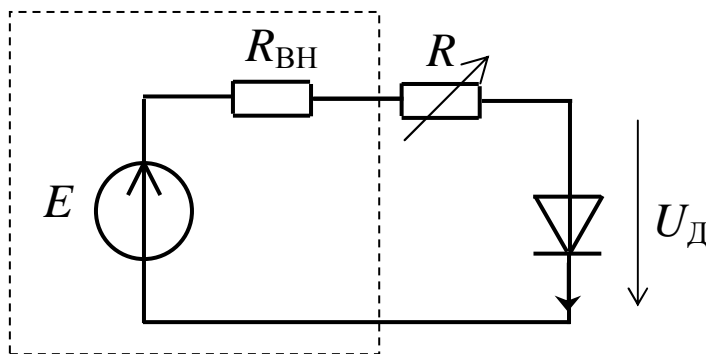


Рис. 32.1

3. По полученным данным построить участок ВАХ диода, соответствующий состоянию открытого диода. Аппроксимировать характеристику двумя отрезками прямых. Нарисовать схемы замещения каждого участка и найти их параметры.
4. Нарисовать и собрать схему рис. 30.1, заменив источник постоянного напряжения на генератор импульсов. Установить параметры генератора: амплитуда 5 В, частота 100 Гц, форма импульсов - треугольная. Подключить к цепи осциллограф: первый канал к

зажимам источника, второй – к зажимам диода. Включив режим ХУ осциллографа, наблюдать зависимость выходного напряжения от входного.

5. Заменить диод на стабилитрон. Установив амплитуду напряжения на генераторе 10 В. Выделив характерные линейные участки характеристики, нарисовать эквивалентные схемы замещения и определить их параметры.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности расчета нелинейных резистивных цепей?
2. При каких условиях возможно применить метод узловых потенциалов, метод контурных токов?
3. Каким образом можно аппроксимировать характеристику полупроводникового диода, стабилитрона?

Литература

1. *Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 323-331, 380-376
2. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с., стр. 33-39.

Лабораторно-практическое занятие 33

Тема: Нелинейные резистивные цепи с синусоидальными источниками

Содержание работы

Расчеты: Расчет установившегося режима в нелинейной цепи с синусоидальными источниками

Эксперимент: исследование работы одно- и двухполупериодного выпрямителей.

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи: 7.19(р), 7.22(р)
2. Решить задачу 7.20

Рабочее задание

1. Нарисовать и собрать электрическую цепь однополупериодного выпрямителя, дополнив ее измерительными приборами. В качестве нагрузки использовать сопротивление 1 кОм. Получить осциллограммы выходного напряжения при напряжении источника 5 В, частоте 1 кГц.

2. Подключить параллельно сопротивлению нагрузки конденсатор $C=390$ нФ (нарисовать схему). Получить осциллограмму выходного напряжения, измерить пульсации выходного напряжения.

3. Нарисовать и собрать электрическую цепь мостового двухполупериодного выпрямителя, дополнив ее измерительными приборами. В качестве нагрузки использовать сопротивление 1 кОм. Получить осциллограммы выходного напряжения при напряжении источника 5 В, частоте 1 кГц.

4. Подключить параллельно сопротивлению нагрузки конденсатор $C=390$ нФ (нарисовать схему). Получить осциллограмму выходного напряжения, измерить пульсации выходного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности расчета нелинейных цепей при синусоидальных источниках?
2. В чем состоит метод кусочно-линейной аппроксимации?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 402-411.

Лабораторно-практическое занятие 34

Тема: Нелинейные цепи с синусоидальными источниками

Содержание работы

Расчеты: Расчет установившегося режима в нелинейной цепи с синусоидальными источниками

Домашняя подготовка

1. Разобрать задачи: 7.27(р), 7.34(р)

Рабочее задание

1. Решить задачи 7.29, 7.31, 7.35

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют нелинейные элементы?
2. Каковы особенности графических и аналитических методов расчета цепей с безынерционными элементами?
3. Каковы особенности расчета цепей с инерционными элементами?

Литература

1. *Демирчян* К.С., *Нейман* Л.Р., *Коровкин* Н.В., *Чечурин* В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2., стр. 332, 406-409, 417-420.

Список литературы

1. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.1.
2. *Демирчян* К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. СПб.: Питер, 2003, Т.2.
3. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.1, 595с.
4. *Сборник* задач по теоретическим основам электротехники/под ред. Бутырина П.А. -М.:Издательский дом МЭИ, 2012, Т.2, 571с.
5. *Кузовкин* В.А. Теоретическая электротехника –М.: Логос, 2005
6. *Задачник* по теоретическим основам электротехники/ под ред. Бутырина П.А. Электронный образовательный ресурс, МЭИ, 2008

Приложение 1. Комплексные числа

Мнимая единица: j $j^2 = -1$

Формула Эйлера: $e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$

Комплексное число, алгебраическая форма:

$$z = x + jy$$

Комплексное число, показательная форма:

$$z = Ae^{j\varphi}$$

Комплексное число, полярная форма:

$$z = A \angle \varphi$$

Действительная часть комплексного числа:

$$\operatorname{Re}(z) = x = A \cos \varphi$$

Мнимая часть комплексного числа:

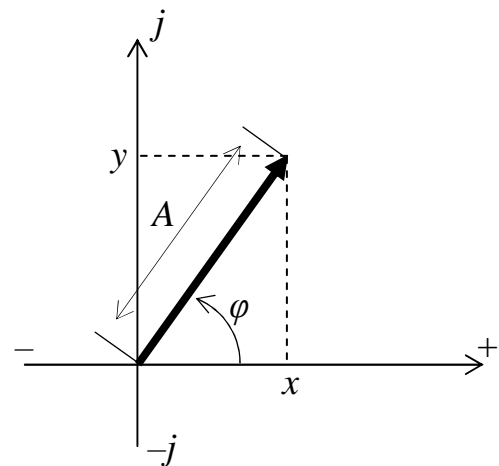
$$\operatorname{Im}(z) = y = A \sin \varphi$$

Модуль комплексного числа:

$$|z| = A = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Аргумент комплексного числа:

$$\arg(z) = \varphi$$



Комплексная плоскость

$x > 0$	$y > 0$	$\varphi \in [0, 90^\circ]$	$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$
$x > 0$	$y < 0$	$\varphi \in [0, -90^\circ]$	$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$
$x < 0$	$y > 0$	$\varphi \in [90^\circ, 180^\circ]$	$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + 180^\circ$
$x < 0$	$y < 0$	$\varphi \in [180^\circ, 270^\circ]$	$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + 180^\circ$

Приложение 2. Операции с комплексными числами

Если комплексное число $z = x + jy = A\angle\varphi$,

то $(z)^* = x + j(-y) = A\angle(-\varphi)$ – комплексно-сопряженное с ним

Возведение в степень:

$$z^n = A^n \angle(n\varphi)$$

Например: $\frac{1}{z} = z^{-1} = \frac{1}{A} \angle(-\varphi)$

$$\sqrt{z} = z^{\frac{1}{2}} = \sqrt{A} \angle\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Если $\begin{cases} z_1 = x_1 + jy_1 = A_1 \angle \varphi_1 \\ z_2 = x_2 + jy_2 = A_2 \angle \varphi_2 \end{cases}$ – пара комплексных чисел, то

сумма (разность):

$$z_1 \pm z_2 = (x_1 \pm x_2) + j(y_1 \pm y_2)$$

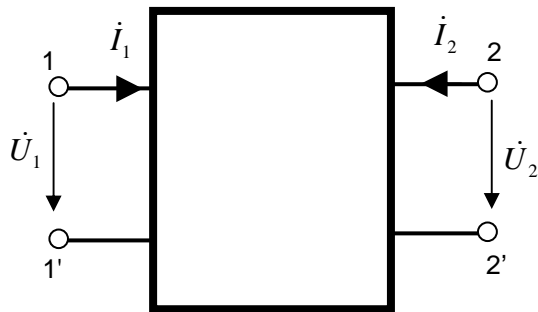
произведение:

$$z_1 z_2 = A_1 A_2 \angle(\varphi_1 + \varphi_2)$$

отношение:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{A_1}{A_2} \angle(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Приложение 3. Четырехполюсники



Y-параметры:

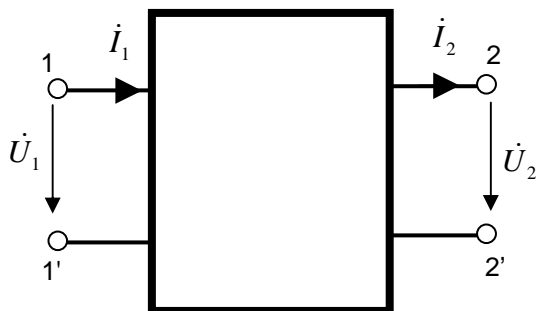
$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \end{cases}$$

Z-параметры:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 \end{cases}$$

H-параметры:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2 \end{cases}$$

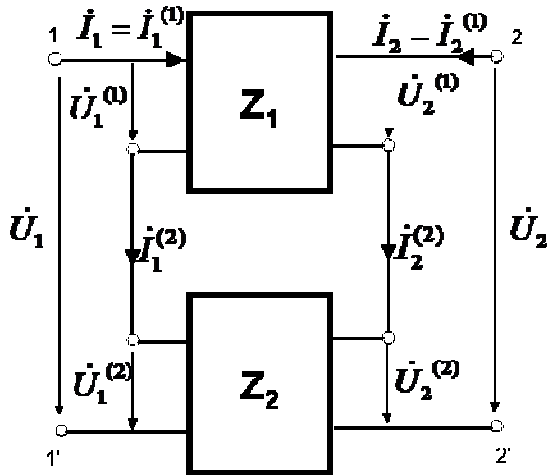


A-параметры:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 \end{cases}$$

Приложение 4. Соединение четырёхполюсников

Последовательное соединение:

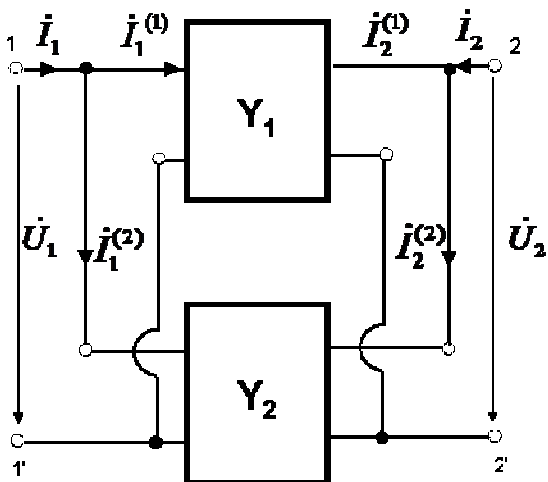


Эквивалентная матрица Z-параметров
последовательного соединения

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(1)} & Z_{12}^{(1)} \\ Z_{21}^{(1)} & Z_{22}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11}^{(2)} & Z_{12}^{(2)} \\ Z_{21}^{(2)} & Z_{22}^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(1)} + Z_{11}^{(2)} & Z_{12}^{(1)} + Z_{12}^{(2)} \\ Z_{21}^{(1)} + Z_{21}^{(2)} & Z_{22}^{(1)} + Z_{22}^{(2)} \end{bmatrix}$$

Параллельное соединение:

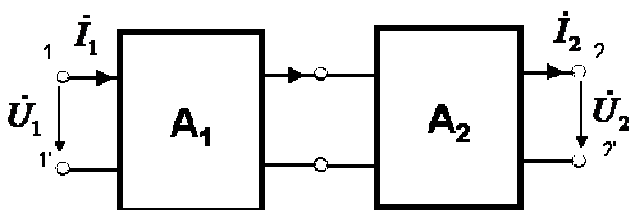


Эквивалентная матрица Y-параметров
параллельного соединения

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_1 + \mathbf{Y}_2 = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(1)} & Y_{12}^{(1)} \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(2)} \\ Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(1)} + Y_{12}^{(2)} \\ Y_{21}^{(1)} + Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(1)} + Y_{22}^{(2)} \end{bmatrix}$$

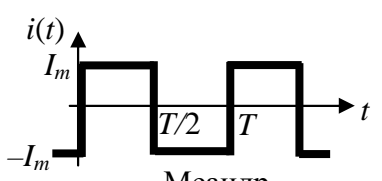
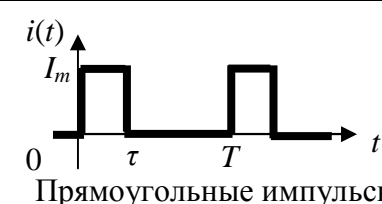
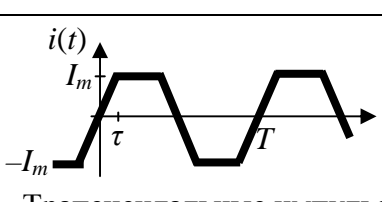
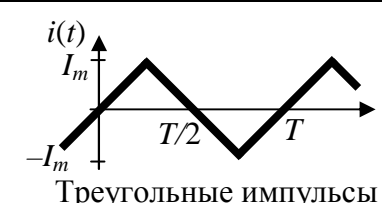
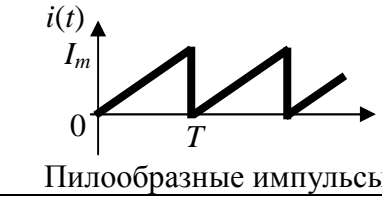
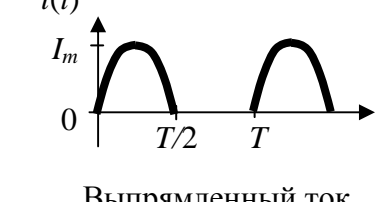
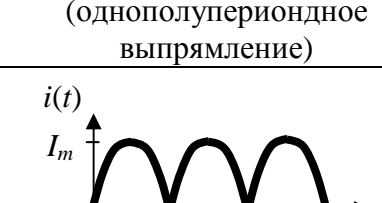
Каскадное соединение:



Эквивалентная матрица A-параметров
каскадного соединения

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{(1)} & B^{(1)} \\ C^{(1)} & D^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{(2)} & B^{(2)} \\ C^{(2)} & D^{(2)} \end{bmatrix}$$

Приложение 5. Ряды Фурье

График $i(t)$	Разложение в ряд
 <p style="text-align: center;">Меандр</p>	$i(t) = \frac{4I_m}{\pi} \left(\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t + \dots \right)$
 <p style="text-align: center;">Прямоугольные импульсы</p>	$i(t) = I_m \left[\frac{\tau}{T} + \frac{2}{\pi} \left(\begin{aligned} &\sin \omega_1 \tau \cos \omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 \tau \cos 2\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 \tau \cos 3\omega_1 t + \dots \end{aligned} \right) \right]$
 <p style="text-align: center;">Трапецеидальные импульсы</p>	$i(t) = I_m \frac{4T}{\pi \tau} \left(\begin{aligned} &\sin \omega_1 \tau \sin \omega_1 t + \frac{1}{9} \sin 3\omega_1 \tau \sin 3\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{25} \sin 5\omega_1 \tau \sin 5\omega_1 t + \dots \end{aligned} \right)$
 <p style="text-align: center;">Треугольные импульсы</p>	$i(t) = \frac{8I_m}{\pi^2} \left(\sin \omega_1 t - \frac{1}{9} \sin 3\omega_1 t + \frac{1}{25} \sin 5\omega_1 t + \dots \right)$
 <p style="text-align: center;">Пилообразные импульсы</p>	$i(t) = I_m \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \left[\sin \omega_1 t + \frac{1}{2} \sin 2\omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_1 t + \dots \right] \right)$
 <p style="text-align: center;">Выпрямленный ток (однополупериодное выпрямление)</p>	$i(t) = I_m \frac{2}{\pi} \left(\begin{aligned} &\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega_1 t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega_1 t - \\ &- \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega_1 t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega_1 t + \dots \end{aligned} \right)$
 <p style="text-align: center;">Выпрямленный ток (двухполупериодное выпрямление)</p>	$i(t) = I_m \frac{4}{\pi} \left(\begin{aligned} &\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega_1 t + \\ &+ \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega_1 t + \dots \end{aligned} \right)$

Приложение 6. Свойства преобразования Лапласа

Преобразование Лапласа

$$F(p) = \mathcal{L}(f(t)) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt$$

$f(t)$ – оригинал

$F(p)$ – изображение по Лапласу

p – комплексная переменная

$$p = \sigma + j\omega$$

$$\sigma = \operatorname{Re}(p), \quad \omega = \operatorname{Im}(p)$$

Линейность преобразования Лапласа:

$$\mathcal{L}(a \cdot f(t) + b \cdot g(t)) = a\mathcal{L}(f(t)) + b\mathcal{L}(g(t)) = aF(p) + bG(p)$$

Дифференцирование оригинала:

$$\mathcal{L}\left(\frac{df(t)}{dt}\right) = pF(p) - f(0)$$

Интегрирование оригинала:

$$\mathcal{L}\left(\int_0^t f(t)dt\right) = \frac{F(p)}{p}$$

Запаздывание оригинала:

$$\mathcal{L}(f(t - \tau)) = F(p)e^{-p\tau}$$

Сдвиг изображения:

$$\mathcal{L}(f(t)e^{\alpha t}) = F(p - \alpha)$$

Масштабирование оригинала:

$$\mathcal{L}\left(\frac{1}{k} f\left(\frac{t}{k}\right)\right) = F(kp)$$

Интеграл свертки

$$\mathcal{L}\left(\int_0^t f(\tau)g(t - \tau)d\tau\right) = F(p)G(p)$$

Предельные соотношения:

$$f(0) = \lim_{p \rightarrow \infty} (pF(p))$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} (pF(p))$$

Приложение 7. Некоторые оригиналы и изображения по Лапласу

Оригинал	Изображение
$1(t)$	$\frac{1}{p}$
$\delta(t)$	1
t	$\frac{1}{p^2}$
t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p + \alpha}$
$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{p(p + \alpha)}$
$\frac{1}{\alpha - \beta} (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t})$	$\frac{1}{(p + \alpha)(p + \beta)}$
$\frac{1}{\alpha - \beta} (\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t})$	$\frac{p}{(p + \alpha)(p + \beta)}$
$\frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\alpha - \beta} \left(\frac{1}{\beta} e^{-\beta t} - \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t} \right)$	$\frac{1}{p(p + \alpha)(p + \beta)}$
$\cos \omega t$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$

Содержание

Лабораторно-практическое занятие 1	4
Лабораторно-практическое занятие 2	7
Лабораторно-практическое занятие 3	9
Лабораторно-практическое занятие 4	10
Лабораторно-практическое занятие 5	13
Лабораторно-практическое занятие 6	14
Лабораторно-практическое занятие 7	15
Лабораторно-практическое занятие 8	18
Лабораторно-практическое занятие 9	19
Лабораторно-практическое занятие 10	22
Лабораторно-практическое занятие 11	23
Лабораторно-практическое занятие 12	24
Лабораторно-практическое занятие 13	26
Лабораторно-практическое занятие 14	28
Лабораторно-практическое занятие 15	31
Лабораторно-практическое занятие 16	33
Лабораторно-практическое занятие 17	35
Лабораторно-практическое занятие 18	37
Лабораторно-практическое занятие 19	39
Лабораторно-практическое занятие 20	42
Лабораторно-практическое занятие 21	43
Лабораторно-практическое занятие 22	46
Лабораторно-практическое занятие 23	47
Лабораторно-практическое занятие 24	49
Лабораторно-практическое занятие 25	51
Лабораторно-практическое занятие 26	52
Лабораторно-практическое занятие 27	55

Лабораторно-практическое занятие 28	58
Лабораторно-практическое занятие 29	61
Лабораторно-практическое занятие 30	63
Лабораторно-практическое занятие 31	65
Лабораторно-практическое занятие 32	67
Лабораторно-практическое занятие 33	69
Лабораторно-практическое занятие 34	70
Список литературы	71
Приложение 1. Комплексные числа	72
Приложение 2. Операции с комплексными числами	73
Приложение 3. Четырехполюсники	74
Приложение 4. Соединение четырехполюсников	75
Приложение 5. Ряды Фурье	76
Приложение 6. Свойства преобразования Лапласа	77
Приложение 7. Некоторые оригиналы и изображения по Лапласу	78
Содержание	79