

Министерство образования Республики Беларусь  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

## **Теория преобразования и передачи измерительной информации**

Программа дисциплины и методические указания  
к выполнению контрольной работы для студентов  
специальности 1-38 02 03

«Техническое обеспечение безопасности» заочной формы обучения

*Учебное электронное издание*

**Минск ◊ БНТУ ◊ 2009**

УДК 621.37(0.73.8)

***Авторы:***

*В.И. Сергеев,  
В.И. Сопряков*

***Рецензенты:***

*В.П. Мельников*, зам. зав. лабораторией электромагнитных измерений института физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, к.т.н.;

*А.М. Чапланов*, зав. лабораторией физики пленок неорганических материалов ФТИ НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор

В учебном пособии изложены: учебная программа дисциплины «Теория преобразования и передачи измерительной информации», примерный перечень лабораторных работ, список рекомендуемой литературы и вопросы по разделам дисциплины для самоконтроля при изучении курса. Приведены задания для контрольной работы и рекомендации по ее выполнению.

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г.Минск, Республика Беларусь  
Тел. (017) 232-77-52 факс (017) 232 91 37  
Регистрационный № БНТУ/ПСФ 90 – 1.2009

© БНТУ, 2009

© В.И.Сергеев, В.И.Сопряков, 2009

© В.И.Сергеев, компьютерный дизайн,  
2009

## СОДЕРЖАНИЕ

1. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ "ТЕОРИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ" .....	4
1.1. Пояснительная записка .....	4
1.1.1. Цель изучения дисциплины .....	4
1.1.2. Задачи изучения дисциплины .....	4
1.2. Содержание дисциплины .....	5
1.3. Перечень лабораторных работ .....	7
1.4. Перечень вопросов для самоконтроля.....	7
1.5. Информационно-методическое обеспечение .....	11
1.5.1. Основная литература .....	11
1.5.2. Дополнительная литература.....	11
2. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА.....	12
2.1. Контрольные задания .....	18
2.2. Методические указания по выполнению контрольной работы .....	18
2.3. Литература, рекомендуемая для использования при выполнении контрольной работы .....	36

# **1. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ "ТЕОРИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ"**

## **1.1. Пояснительная записка**

### **1.1.1. Цель изучения дисциплины**

Целью изучения дисциплины «Теория преобразования и передачи измерительной информации» является формирование знаний по основным понятиям информационно-измерительной техники и теории преобразования измерительной информации, по преобразованию информации в элементарных средствах измерений и при реализации методов прямых измерений, с функциональными преобразованиями и без них; по основным характеристикам измерительных сигналов и их преобразованию.

### **1.1.2. Задачи изучения дисциплины**

Задачи изучения дисциплины следуют из необходимости требований к знаниям и умениям студентов, которые устанавливает стандарт.

Студент должен знать:

- математические модели квазидетерминированных и случайных сигналов;
- виды преобразования измерительных сигналов;
- преобразование измерительной информации при реализации методов измерения и контроля;
- информационные модели сигналов и процесса измерения.

Уметь:

- распознавать детерминированный сигнал на фоне случайной помехи путем анализа ее статистических характеристик;
- рассчитывать характеристики звеньев измерительных устройств при случайном характере изменения параметров их элементов;
- оценивать результаты преобразования сигнала звеньями измерительных устройств и точность измерения на основе теории случайных функций.

Перечень обеспечивающих дисциплин:

- математика;
- теоретические основы электротехники;
- электроника.

## 1.2. Содержание дисциплины

### Часть I

#### 1. Введение

Значение измерений, как источника получения измерительной информации о свойствах объектов и явлений. Необходимость обмена информацией между звеньями технических систем, а также между человеком и техникой в процессе автоматического управления и измерения. Способность преобразовывать, передавать и накапливать информацию как критерий качества работы информационных устройств. Развитие методов преобразования и передачи измерительной информации.

#### 2. Основные понятия информационно-измерительной техники

Эмпирические методы познания (наблюдение, сравнение, контроль, счет, измерение, идентификация, научный эксперимент). Понятие о величине, счете, контроле и измерении. Понятие информации и измерения, эквивалентные свойства, понятие счета. Интенсивные величины, понятие контроля. Экстенсивные величины, понятие о единице величины и измерения. Понятие о шкалах измерений. Систематизация физических величин. Определение зависимостей, основные понятия.

#### 3. Преобразование измерительной информации при реализации операций и методов измерения и контроля

Измерение как многооперационная процедура. Элементарные и комплексные средства измерений. Мера. Устройства сравнения. Измерительный преобразователь. Масштабный преобразователь. Понятие о результате и погрешности измерения, уравнение измерений. Процедура и алгоритмы измерения. Уравнения измерений для различных наборов элементарных средств измерений (ЭСИ).

Классификация измерений.

Методы прямых измерений наборами ЭСИ без предварительных преобразований. Методы сопоставления. Методы нониуса, раstra и муара. Метод уравнивания. Методы ускоренного уравнивания.

Комбинированные методы прямых измерений, дифференциальный метод. Методы прямых измерений наборами ЭСИ при наличии предварительных преобразований.

Операции, методы и алгоритмы контроля. Понятие о комплексном объекте и методах определения параметров зависимости между физическими величинами.

## Часть II

### 1. Измерительные сигналы

Понятие о сигналах, используемых в информационно-измерительной технике. Систематизация, формы, модели сигналов.

Квазидетерминированные сигналы, их параметры и характеристики: элементарные и сложные квазидетерминированные сигналы, почти периодические сигналы, переходные сигналы, преобразование Лапласа, разложение сложных сигналов на элементарные, обобщенный ряд Фурье, "быстрое" преобразование Фурье.

Случайные сигналы и их характеристики: виды случайных сигналов, статистические параметры и характеристики, совместные и условные характеристики.

Сигналы с помехами.

### 2. Преобразование измерительных сигналов

Общие вопросы преобразования измерительных сигналов: классификация радиотехнических систем, преобразование сигналов в инерционных звеньях, гармонические модулированные сигналы и их особенности (амплитудная, частотная, фазовая модуляция и детектирование); импульсные модулированные сигналы.

Масштабное линейное преобразование аналоговых сигналов.

Нелинейное преобразование аналоговых измерительных сигналов.

Вычитание сигналов: вычитатели сигналов направленного действия и вычитатели с преобразованием; вычитатели с прерывателем; структурные схемы приборов.

Воспроизведение образцовых сигналов.

Масштабно-временное преобразование сигналов с помощью запоминающей электронно-лучевой трубки и стробоскопического преобразователя.

Фильтрация сигналов: аналоговая фильтрация, понятие о цифровой фильтрации. Частотная фильтрация.

Запоминание и регистрация сигналов: методы запоминания, классификация запоминания по виду сигнала, емкость памяти, погрешности хранения и считывания.

### 3. Информационные модели сигналов

Понятие информации и способов ее описания. Логарифмическая и вероятностная мера информации. Исходная энтропия значения непрерывной величины до измерения. Понятие об остаточной энтропии значения величины после измерения и ожидаемой измерительной информации. Понятие о избыточности источника измерительной информации.

#### **4. Квантование и дискретизация сигналов**

Квантование сигналов. Равномерное квантование по уровню. Неравномерное квантование по уровню. Погрешность квантования, статистические характеристики погрешности случайной величины.

Дискретизация сигналов. Равномерная и неравномерная дискретизация сигнала. Восстановление непрерывного сигнала из дискретизированного. Теорема Котельникова. Определение суммарной погрешности квантования и аппроксимации при восстановлении случайных сигналов.

### **1.3. Перечень лабораторных работ**

1. Знакомство с программой моделирования электронных устройств Workbench 5.0.
2. Полигармонические сигналы.
3. Спектральный анализ сигналов, используемых в информационной технике.
4. Моделирование амплитудно-модулированных сигналов.
5. Моделирование линейных измерительных преобразователей.
6. Модулирование нелинейных измерительных преобразователей.
7. Нелинейное преобразование сигналов.

### **1.4. Перечень вопросов для самоконтроля**

#### **Часть I**

1. Эмпирические методы познания: наблюдение, сравнение, контроль, счет, измерение, идентификация, научный эксперимент. Эмпирико-теоретические методы познания.
2. Понятие об информации и измерении. Значимость измерений в науке и технике. Проявление свойств объектов в отношении эквивалентности, порядка и аддитивности.
3. Свойства, удовлетворяющие отношению эквивалентности. Понятие счета.
4. Интенсивные величины. Понятие величины и контроля.
5. Экстенсивные величины. Понятие о единице величины и измерении. Понятие о шкалах измерений.
6. Систематизация физических величин.
7. Определение зависимостей.

8. Понятие измерений, как многооперационной процедуры. Элементарные и комплексные средства измерений.
9. Операция воспроизведения величины. Мера.
10. Операция сравнения величины. Устройства одновременного и разновременного сравнения.
11. Операция измерительного преобразования. Измерительный преобразователь.
12. Операция масштабирования величины. Масштабный преобразователь.
13. Результат и уравнение измерений. Процедура измерения и ее алгоритм.
14. Уравнение измерений для простейших наборов элементарных средств измерений (ЭСИ).
15. Классификация измерений. Понятие многомерных, прямых, косвенных, совместных, многомерных избыточных и многоканальных измерений.
16. Классификация методов прямых измерений с точки зрения использования элементарных и комплексных средств измерений.
17. Классификация методов прямых измерений наборами ЭСИ без предварительного преобразования рода величины.
18. Первый метод сопоставления.
19. Метод однократного нониуса, раstra и муара.
20. Второй и третий методы сопоставления с тремя ЭСИ. Метод одновременного попадания.
21. Первый метод уравнивания.
22. Метод ускоренного уравнивания с многоканальной регулируемой мерой. Методы уравнивания с тремя видами ЭСИ.
23. Ускоренные методы уравнивания с тремя видами ЭСИ.
24. Стробоскопические методы.
25. Комбинированные методы прямых измерений без предварительных преобразований. Дифференциальный метод измерений.
26. Методы замещения с предварительным преобразованием рода величины с регулируемой мерой и регулируемым масштабным преобразователем.
27. Методы измерений средних значений величины.
28. Методы измерений с предварительным функциональным преобразованием одной или нескольких величин.
29. Операции, методы и алгоритмы контроля.
30. Понятие о комплексном объекте и методах определения параметров зависимости между физическими величинами.



## Часть II

1. Классификация сигналов.
2. Четыре формы сигнала и их метрологические особенности.
3. Основные виды моделей сигналов.
4. Постоянный сигнал. Гармонический сигнал.
5. Единичный импульс. Формула динамического представления сигнала.
6. Полигармонический сигнал. Периодический импульсный сигнал.
7. Понятие почти периодического сигнала. Биения.
8. Переходные непериодические сигналы.
9. Разложение сложных сигналов на элементарные. Обобщенный ряд Фурье.
10. «Быстрое» преобразование Фурье.
11. Виды случайных сигналов (стационарные, нестационарные, эргодические сигналы).
12. Среднее значение, среднее значение квадрата и дисперсия случайного сигнала.
13. Плотность и функция распределения. Применение для плотности распределения идентификации простейших сигналов.
14. Автокорреляционная функция и спектральная плотность мощности. Применение этих характеристик для идентификации простейших сигналов.
15. Совместные и условные характеристики случайных сигналов. Понятие взаимной корреляционной функции.
16. Сигналы с помехами.
17. Классификация радиотехнических систем. Понятие стационарной и нестационарной, линейной и нелинейной, инерционной и безинерционной системы.
18. Преобразование сигнала в инерционных системах. Импульсная характеристика и представление выходного сигнала системы с помощью интеграла свертки.
19. Переходная характеристика системы.
20. Переходные и импульсные характеристики основных типов инерционных систем.
21. Модуляция и детектирование. Общие вопросы.
22. Амплитудная модуляция и детектирование.
23. Частотная и фазовая модуляция и детектирование.
24. Импульсные модулированные сигналы.
25. Масштабное линейное преобразование аналоговых сигналов.
26. Нелинейное преобразование аналоговых измерительных сигналов. Основные способы устранения нелинейности, методы обратной и неявной функции.

27. Особенности реализации некоторых нелинейных измерительных преобразователей: антилогарифматоры, логарифматоры, квадраторы, извлекатели квадратного корня.

28. Понятие об операции вычитания сигналов. Структурные схемы вычитателей аналоговых сигналов. Анализ погрешностей вычитателей.

29. Коэффициенты преобразования разности и схемы устройств вычитания.

30. Структурные схемы приборов, основанных на использовании методов вычитания.

31. Масштабно-временное преобразование сигналов на основе запоминающей электронно-лучевой трубки и стробоскопического преобразователя.

32. Фильтрация аналоговых сигналов.

33. Цифровая фильтрация.

34. Запоминание и регистрация сигналов.

35. Логарифмическая мера информации.

36. Вероятностная мера информации.

37. Исходная энтропия значения непрерывной величины до измерения.

38. Понятие об остаточной энтропии значений величины после измерения и ожидаемой измерительной информации.

39. Аналитическое представление дискретизированного сигнала, равномерная и неравномерная дискретизация.

40. Восстановление непрерывного сигнала из дискретизированного.

41. Частотный критерий выбора интервала равномерной дискретизации. Критерий Котельникова.

42. Корреляционный критерий Железнова при равномерной дискретизации.

43. Критерий допустимого отклонения при равномерной дискретизации.

44. Понятие об адаптивной дискретизации и сравнение различных видов аппроксимации.

45. Аналитическое представление квантованного сигнала. Равномерное и неравномерное квантование.

46. Понятие о погрешности квантования.

## **1.5. Информационно-методическое обеспечение**

### **1.5.1. Основная литература**

1. Орнатский, П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники: учебник / П.П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1987. – 455 с.
2. Дмитриев, В.И. Прикладная теория информации: учебник / В.И. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
3. Душин, В.К. Теоретические основы информационных процессов и систем: учебник / В.К. Душин. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К<sup>о</sup>», 2003. – 348 с.

### **1.5.2. Дополнительная литература**

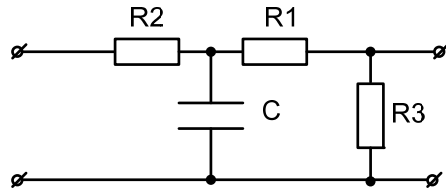
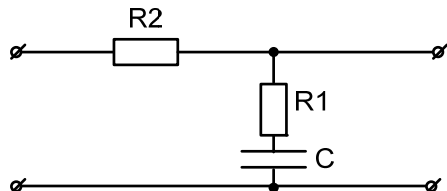
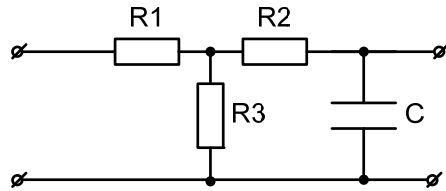
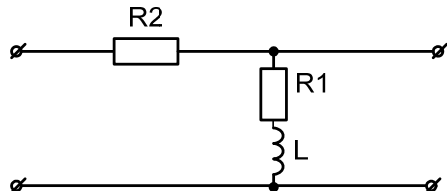
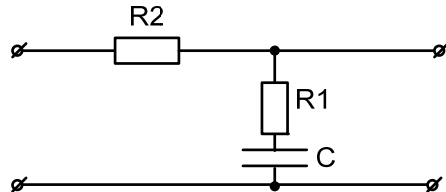
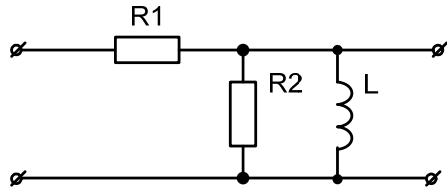
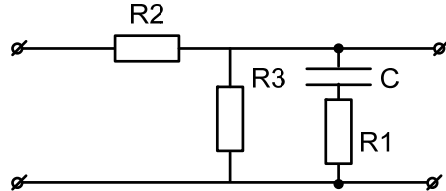
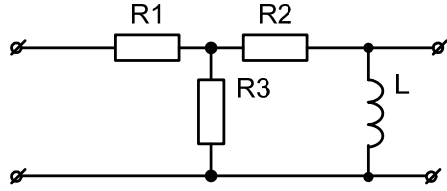
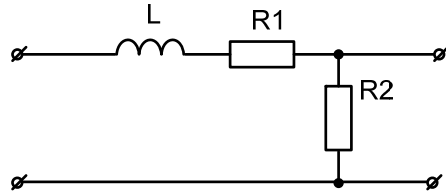
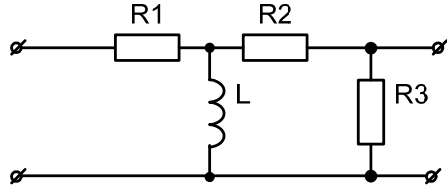
1. Темников, Ф.Е. Теоретические основы информационной техники: учебное пособие / Ф.Е. Темников, Б.А. Афонин, В.И. Дмитриев. – М.: Энергия, 1979. – 512 с.
2. Куликовский, Л.Ф. Теоретические основы информационных процессов: учебное пособие / Л.Ф. Куликовский, В.В. Мотов. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
3. Цымбал, В.П. Задачник по теории информации и кодированию / В.П. Цымбал. – Киев: Высшая школа, 1976. – 275 с.
4. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник / А.Б. Сергиенко. – СПб: Питер, 2003. – 608 с.

## 2. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

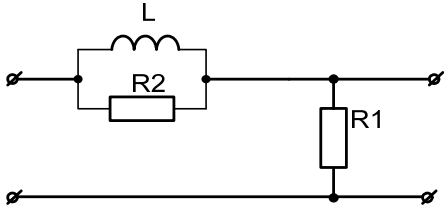
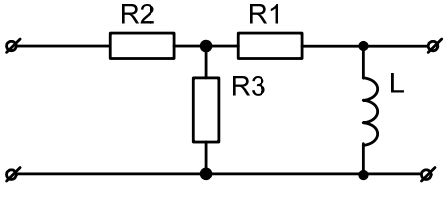
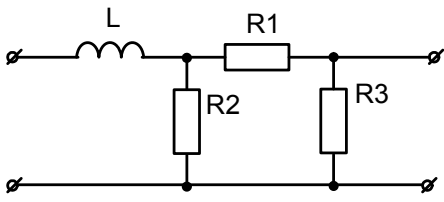
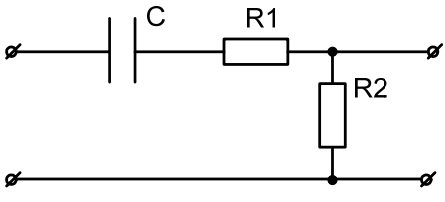
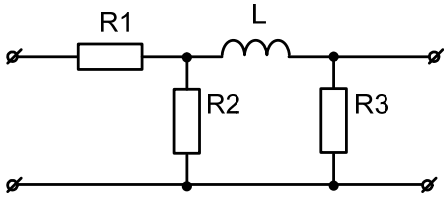
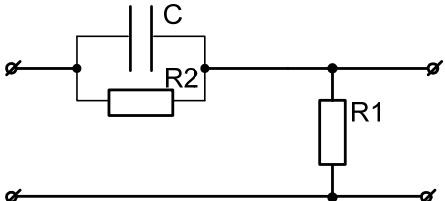
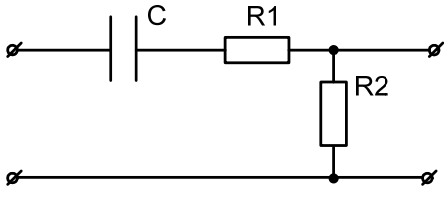
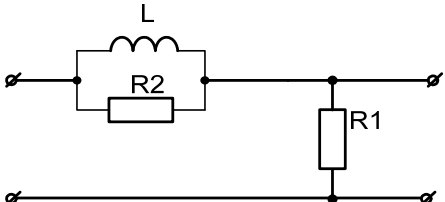
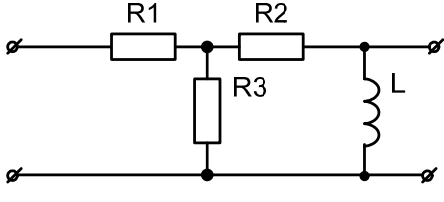
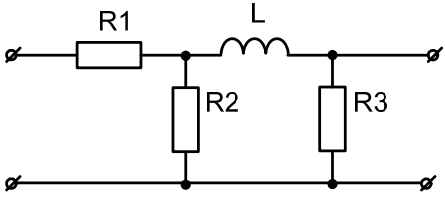
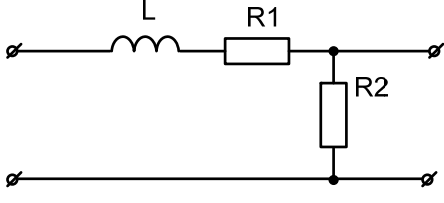
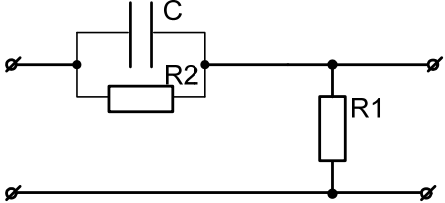
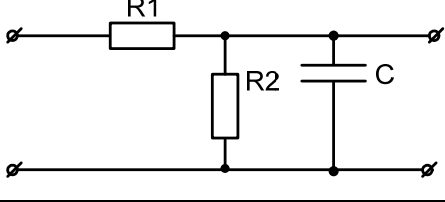
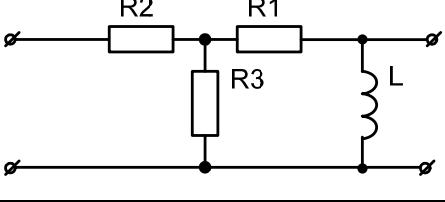
Контрольная работа представляет собой решение одного из трех контрольных заданий, условия которых приведены ниже. Вариант задания выдается каждому студенту-заочнику индивидуально преподавателем. На основании полученного варианта студент выбирает соответствующую электрическую схему в табл. 2.1 и форму входного сигнала в табл. 2.2.

Таблица 2.1

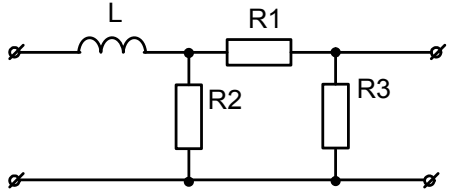
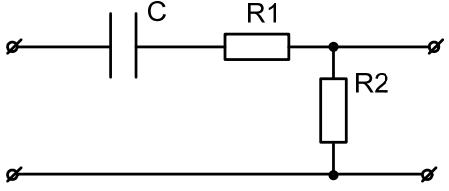
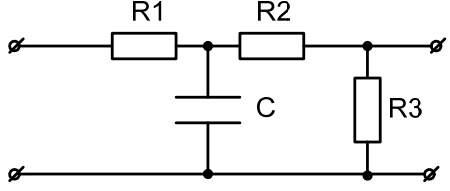
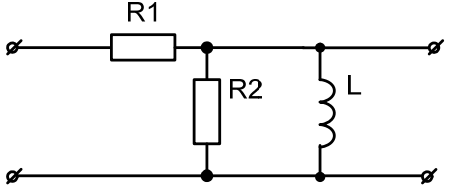
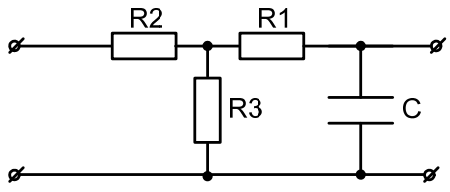
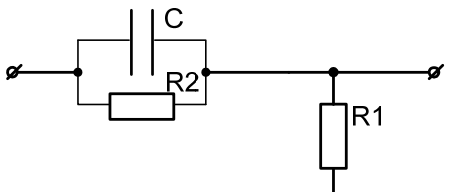
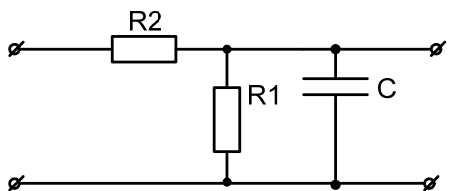
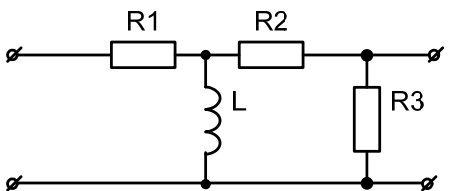
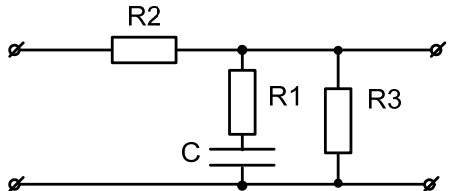
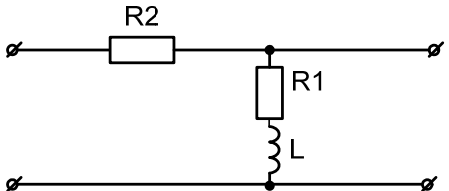
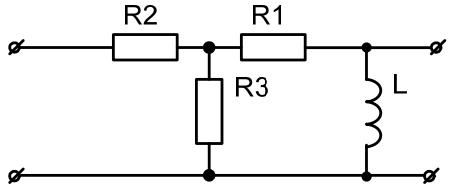
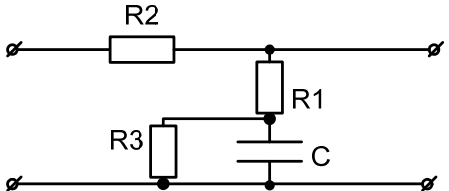
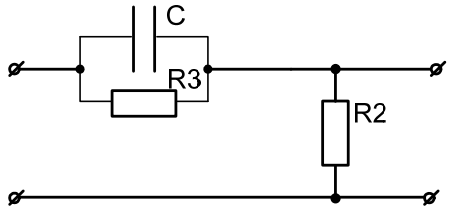
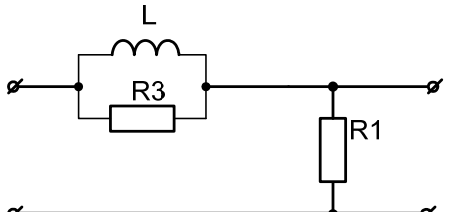
Электрические схемы

Вариант	Схема	Вариант	Схема
1		9	
2		10	
3		11	
4		12	
5		13	

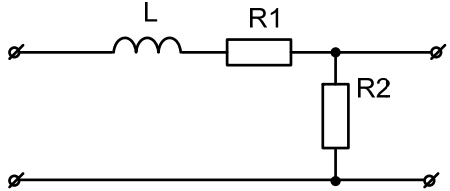
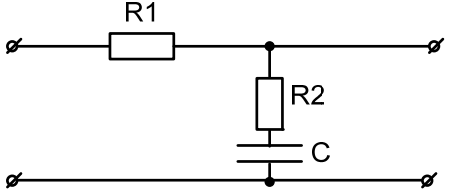
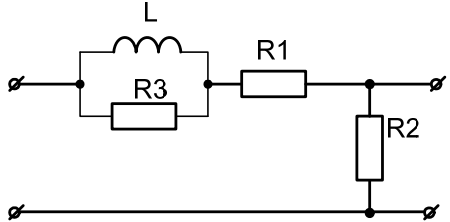
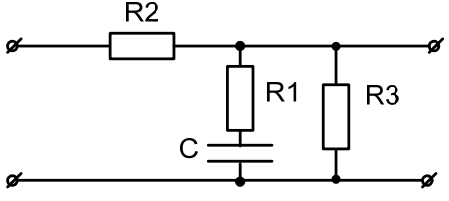
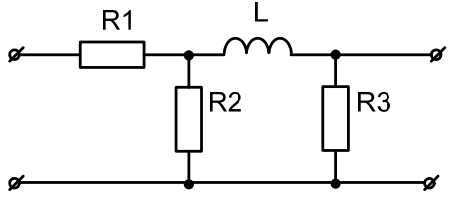
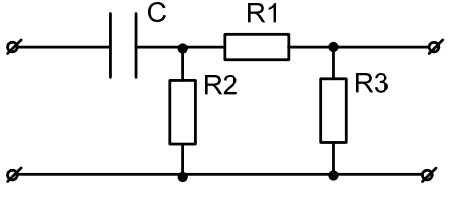
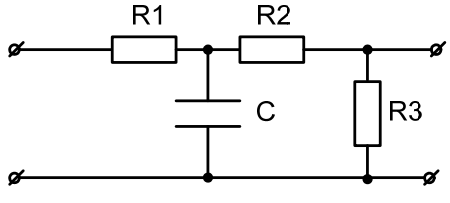
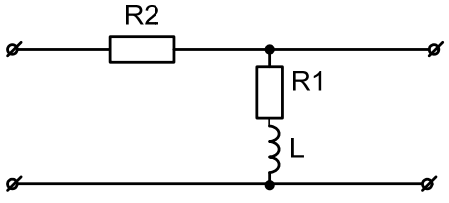
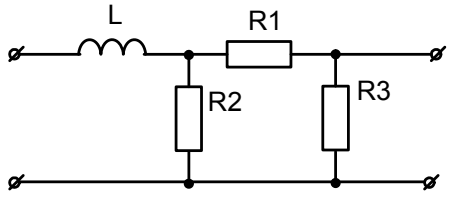
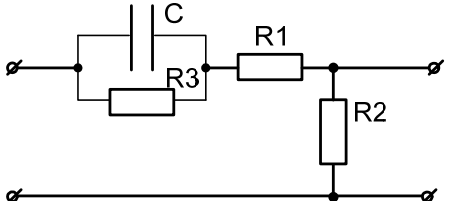
## Продолжение табл. 2.1

6		14	
7		15	
8		16	
17		26	
18		27	
19		28	
20		29	

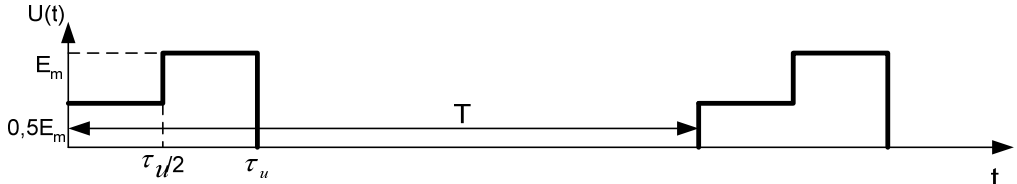



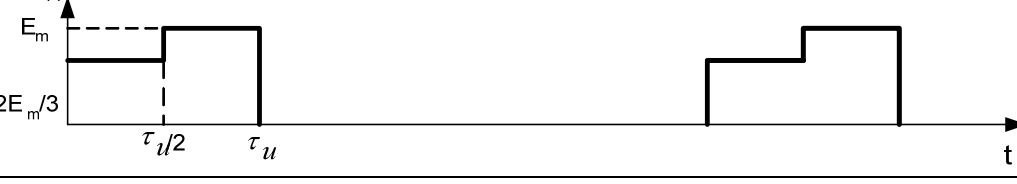
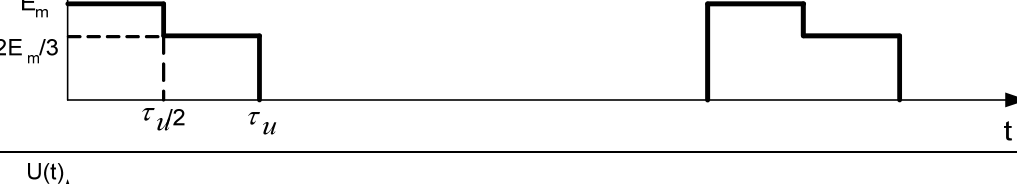
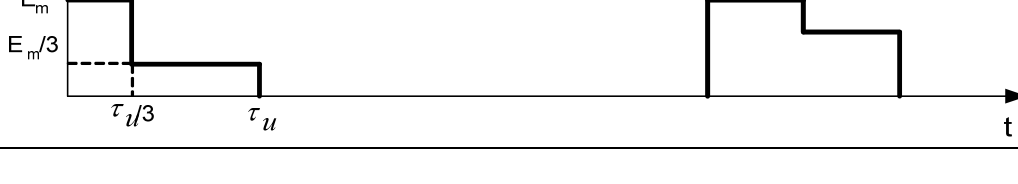
## Продолжение табл. 2.1

21		30	
22		31	
23		32	
24		33	
25		34	
35		42	
36		43	

## Окончание табл. 2.1

37		44	
38		45	
39		46	
40		47	
41		48	

## Входной сигнал

Вариант	Входной сигнал
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	



Окончание табл. 2.2

8	<p>Graph 8: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>E_m</math>, drops to <math>E_m/3</math> at <math>t = 2\tau_u/3</math>, and returns to <math>E_m</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-down signal.</p>
9	<p>Graph 9: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>2E_m/3</math>, jumps to <math>E_m</math> at <math>t = 2\tau_u/3</math>, and returns to <math>2E_m/3</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-up signal.</p>
10	<p>Graph 10: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>E_m/3</math>, jumps to <math>E_m</math> at <math>t = 2\tau_u/3</math>, and returns to <math>E_m/3</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-up signal.</p>
11	<p>Graph 11: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>E_m/3</math>, jumps to <math>E_m</math> at <math>t = \tau_u/3</math>, and returns to <math>E_m/3</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-up signal.</p>
12	<p>Graph 12: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>2E_m/3</math>, jumps to <math>E_m</math> at <math>t = \tau_u/3</math>, and returns to <math>2E_m/3</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-up signal.</p>
13	<p>Graph 13: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at <math>E_m</math>, drops to <math>2E_m/3</math> at <math>t = 2\tau_u/3</math>, and returns to <math>E_m</math> at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-down signal.</p>
14	<p>Graph 14: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at 1, drops to -1 at <math>t = 3\tau_u/4</math>, and returns to 1 at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-down signal.</p>
15	<p>Graph 15: <math>U(t)</math> vs <math>t</math>. The signal starts at 0.5, jumps to 1 at <math>t = \tau_u/2</math>, and returns to 0.5 at <math>t = \tau_u</math>. The second part of the graph shows a step-up signal.</p>

Контрольная работа оформляется в ученической тетради или на формате А4 в случае использования компьютерного набора.

## 2.1. Контрольные задания

1. Используя метод интегрального наложения, для заданной переходной функции электрической цепи схемы определить форму сигнала на ее выходе.
2. Для заданного сигнала определить его амплитудно-частотный (АЧС) и фазочастотный (ФЧС) спектры.
3. Определить и привести переходную характеристику  $h(t)$  для заданной электрической цепи.

## 2.2. Методические указания по выполнению контрольной работы

### Задания № 1, 3

Выполнение задания № 1 требует навыков в определении реакции цепи при воздействии на ее вход сигнала произвольной формы.

Если на вход цепи подается сложный сигнал, то его представляют как сумму типовых сигналов. Затем определяется реакция электрической цепи на каждое типовое воздействие. Путем суммирования откликов электрической цепи (выходных сигналов) на типовые сигналы. Определяется реакция электрической цепи (переходной процесс, выходной сигнал) на сложный входной сигнал (воздействие).

Представим сложный входной сигнал в виде суммы типовых сигналов. Пусть имеется кусочно-непрерывная функция в виде прямоугольного импульса (рис. 2.1).

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \tau_u < t < 0, \\ A_m, & 0 \leq t \leq \tau_u. \end{cases} \quad (2.1)$$

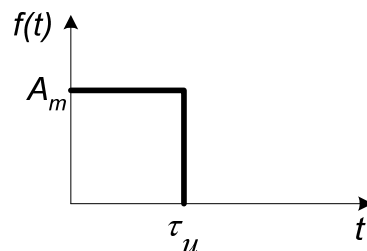


Рис. 2.1. Входной сигнал

Эту функцию можно представить в виде 2-х функций, сумма которых дает тот же сигнал (рис. 2.2).

$$f(t) = A_m 1(t) - A_m(t - \tau_n). \quad (2.2)$$

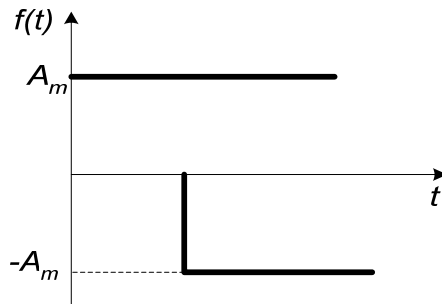


Рис. 2.2. Представление входного сигнала в виде двух функций

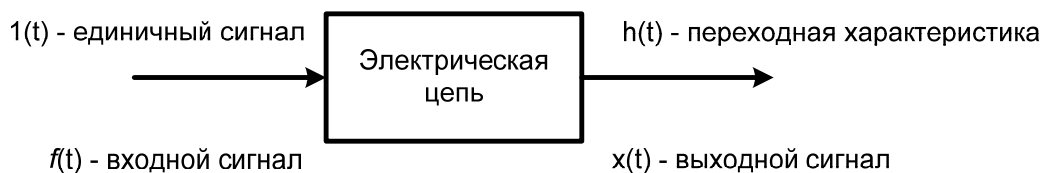


Рис. 2.3. Реакция электрической цепи на входной сигнал

При воздействии на электрическую цепь единичного сигнала  $1(t)$  на выходе будем иметь переходную характеристику  $h(t)$ , а при подачи на вход сложного сигнала  $f(t)$  на выходе получим сигнал  $x(t)$ .

Реакция электрической цепи может быть представлена в виде суммы:

$$x(t) = A_m h(t) - A_m h(t - \tau_n). \quad (2.3)$$

Результат представляет собой суперпозицию 2-х типовых сигналов, воздействующих на вход электрической цепи. Следовательно, отклик электрической цепи на сумму воздействий равен сумме откликов на эти воздействия, при помощи которых описан данный входной сигнал.

Если входной сигнал представляет собой непрерывную функцию  $f(t)$ , то его можно с некоторым приближением заменить ступенчатыми воздействиями.

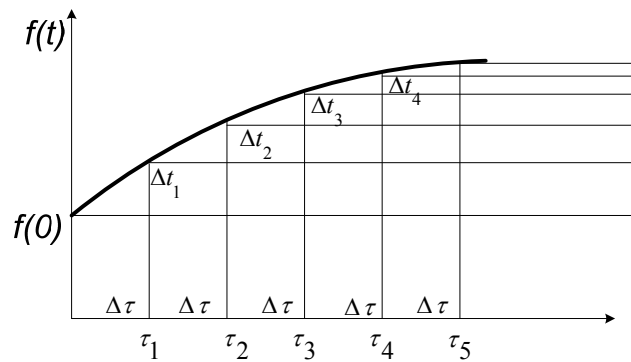


Рис. 2.4. Представление входного сигнала в виде ступенчатых воздействий

Сигнал на входе  $f_{ст}$  можно представить как сумму произведений функций соответствующих ступенек на единичную функцию:

$$f_{ст} = f(0) \cdot 1(t) + \Delta f_1 \cdot 1(t - \tau_1) + \Delta f_2 \cdot 1(t - \tau_2) + \Delta f_3 \cdot 1(t - \tau_3) + \dots + \Delta f_n \cdot 1(t - \tau_n), \quad (2.4)$$

$$f_{ст} = f(0) 1(t) + \sum_{k=1}^n \Delta f_k \cdot 1(t - \tau_k), \quad (2.5)$$

где  $n$  – число интервалов, на которые разбивается временная ось.

Реакцию электрической цепи на воздействие ступенчатой функции можно записать следующим образом:

$$x_{ст}(t) = f(0) h(t) + \sum_{k=1}^n \Delta f_k \cdot h(t - \tau_k). \quad (2.6)$$

Если промежуток времени  $\Delta\tau$  устремить к 0, а число интервалов наблюдения функции  $n \rightarrow \infty$ , то, умножив второе слагаемое выражение (2.6) на  $\frac{\Delta\tau_k}{\Delta\tau_k}$  и взяв предел, к которому будет стремиться функция  $x(t)$  при стремлении  $\Delta\tau_k \rightarrow 0$ , получим

$$x(t) = \lim_{\Delta\tau_k \rightarrow 0} (f(0)h(t) + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta f_k}{\Delta\tau_k} h(t - \tau_k) \Delta\tau_k), \quad (2.7)$$

$$x(t) = (f(0)h(t) + \int_0^t f'(0) h(t - \tau_k)) d\tau. \quad (2.8)$$

Полученная формула представляет собой интеграл наложения или интеграл Дюамеля.

Определим выходной сигнал электрической цепи, приведенной на рис. 2.5, при условии подачи на вход цепи одиночного импульса, приведенного на рис. 2.6.

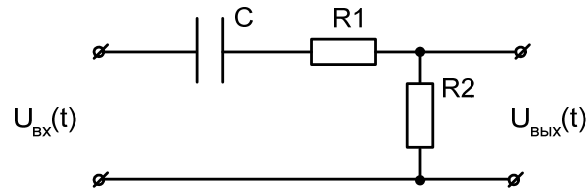


Рис. 2.5. Электрическая схема

Данные для расчета:

$$C = 51 \cdot 10^4 \text{ пФ}, E_m = 1 \text{ В},$$

$$R_1 = 17 \text{ кОм},$$

$$R_2 = 34 \text{ кОм}.$$

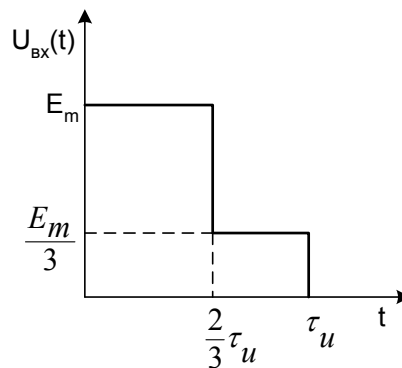


Рис. 2.6. Одиночный входной импульс

Используя формулу Дюамеля (2.8) имеем:

для интервала  $0 \leq t \leq \frac{2}{3}\tau_u$

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{\text{вх}}(0)h(t) + \int_0^t U'_{\text{вх}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau = 1 \cdot h(t), \quad (2.9)$$

где  $h(t)$  – переходная характеристика электрической схемы, определяемая по формуле:

$$h(t) = \frac{U_{\text{вых}}(t)}{U_{\text{вх}}(t)}. \quad (2.10)$$

Определим  $U_{\text{вых}}(t)$  в соответствии с заданной электрической схемой (рис. 2.5):

$$U_{\text{вых}}(t) = U_{R_2}(t) = iR_2.$$

Напряжение на конденсаторе определяется по формуле:

$$U_c(t) = U_{c\text{св}}(t) + U_{c\text{прин}}(t),$$

где  $U_{c\text{св}}(t)$  – свободная составляющая переходного процесса;

$U_{c\text{прин}}(t)$  – принужденная составляющая переходного процесса.

$$U_c(t) = A_1 e^{pt} + U_{c\text{прин}}(t),$$

$$U_{c\text{прин}} = E.$$

В момент коммутации напряжение на емкости остается таким же, каким оно было и перед коммутацией

$$U_c(0-) = U_c(0+),$$

$$A_1 e^{p \cdot 0} + U_{c\text{прин}} = 0,$$

откуда

$$A_1 = -E,$$

$$U_c(t) = -Ee^{pt} + E = E(1 - e^{pt}). \quad (2.11)$$

Для определения значения  $p$  составляем характеристическое уравнение для заданной цепи, используя дифференциальное уравнение для входного сигнала:

$$U_{\text{вх}}(t) = U_c(t) + C \frac{dU_c}{dt} (R_1 + R_2),$$

$$0 = 1 + C(R_1 + R_2)p,$$

откуда

$$p = -\frac{1}{C(R_1 + R_2)} = -\frac{1}{CR_{\text{ЭКВ}}} = -\frac{1}{\tau_{\text{ц}}}.$$

Активное эквивалентное сопротивление цепи равно:

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2.$$

Следовательно,

$$U_c(t) = E(1 - e^{-t/\tau_{\text{ц}}}). \quad (2.12)$$

Ток, протекающий в цепи равен:

$$i_c(t) = C \frac{dU_c}{dt} = \frac{EC}{\tau_{\text{ц}}} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}} = \frac{EC}{R_{\text{ЭКВ}} C} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}} = \frac{E}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}}.$$

Напряжение на выходе электрической цепи равно:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) &= i_c(t) R_2 = E - U_c(t) - i_c(t) R_1, \\ U_{\text{вых}}(t) &= E - E(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}}) - \frac{ER_1}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}}, \\ U_{\text{вых}}(t) &= \frac{ER_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Подставляя значение  $U_{\text{вых}}(t)$ , полученное по формуле (2.13) в формулу (2.10) и учитывая, что  $U_{\text{вх}}(t) = E$ , получим переходную характеристику цепи:

$$h(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}}. \quad (2.14)$$

Данные расчета переходной характеристики по формуле (2.14) представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

## Переходная характеристика электрической цепи

t, мс	0	0,1τ <sub>ц</sub> 2,6	0,2τ <sub>ц</sub> 5,2	0,4τ <sub>ц</sub> 10,4	0,8τ <sub>ц</sub> 21	τ <sub>ц</sub> 26	1,5τ <sub>ц</sub> 39	2τ <sub>ц</sub> 52	4τ <sub>ц</sub> 104	5τ <sub>ц</sub> 130
h(t)	0,66	0,6	0,54	0,44	0,3	0,24	0,15	0,09	0,05	0,004

График зависимости переходной характеристики представлен на рис. 2.7.

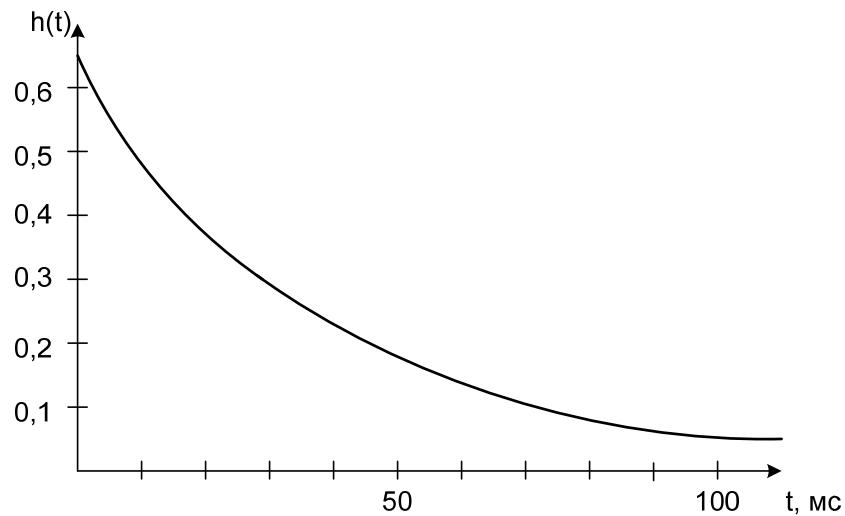


Рис. 2.7. Переходная характеристика электрической цепи

Определяем изменение выходного сигнала электрической цепи для интервала  $\frac{2}{3}\tau_u \leq t \leq \tau_u$ :

$$\begin{aligned}
 U_{\text{ВЫХ}}(t) = & U_{\text{ВХ}}(0)h(t) + \int_0^{2/3\tau_u} U'_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau_u + \\
 & + \Delta U_{\text{ВХ}}\left(\frac{2}{3}\tau_u\right)h\left(t-\frac{2}{3}\tau_u\right) + \int_0^t U'_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau_u,
 \end{aligned} \tag{2.15}$$



$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ц}}}} - \frac{2}{3} \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t + \frac{2}{3}\tau_u}{\tau_{\text{ц}}}}.$$

Для интервала  $\tau_u \leq t \leq \infty$ :

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}(t) = & U_{\text{ВХ}}(0)h(t) + \int_0^{2/3\tau_u} U'_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau_u + \\ & + \Delta U_{\text{ВХ}}\left(\frac{2}{3}\tau_u\right)h\left(t-\frac{2}{3}\tau_u\right) + \int_{2/3\tau_u}^{\tau_u} U'_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau_u + \\ & + \Delta U_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u) + \int_{\tau_u}^t U'_{\text{ВХ}}(\tau_u)h(t-\tau_u)d\tau_u, \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left( e^{-\frac{t}{\tau_u}} - \frac{2}{3} e^{-\frac{t + 2/3\tau_u}{\tau_u}} - \frac{1}{3} e^{-\frac{t + \tau_u}{\tau_u}} \right).$$

Данные расчета  $U_{\text{вых}}(t)$ , проведенные по вышеприведенным интервалам изменения входного сигнала представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Зависимость выходного сигнала электрической цепи от времени

t, мс	0	0,15 $\tau_{\text{ц}} = 4$	0,35 $\tau_{\text{ц}} = 9$	0,57 $\tau_{\text{ц}} = 15$	0,667 $\tau_{\text{ц}} = 17,3$	0,667 $\tau_{\text{ц}} = 17,3$	0,75 $\tau_{\text{ц}} = 19,5$	0,88 $\tau_{\text{ц}} = 23$	$\tau_{\text{ц}} = 26$	$\tau_{\text{ц}} = 26$
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	0,667	0,447	0,365	0,342	0,332	-0,111	0,05	0,14	0,15	0,03

На рис. 2.8 показаны входной и выходной сигналы.

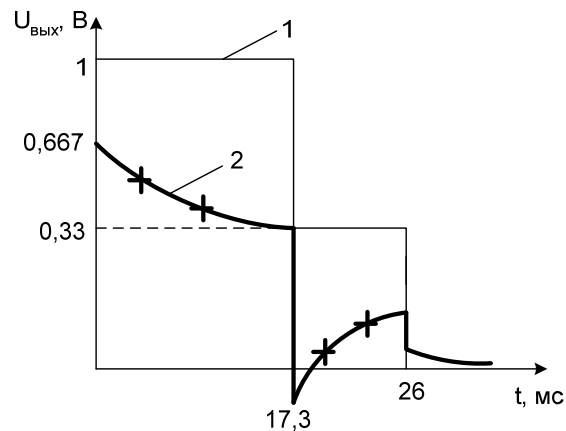


Рис. 2.8. Входной (1) и выходной (2) сигналы

### Задание № 2

Спектральный анализ сложных периодических сигналов заключается в том, что сложный сигнал представляется рядом Фурье в виде типовых сигналов, каждый из которых представляет собой гармонический сигнал, характеризующийся амплитудой, частотой и начальной фазой.

Рассмотрим периодическую последовательность прямоугольных видеоимпульсов (рис. 2.9).

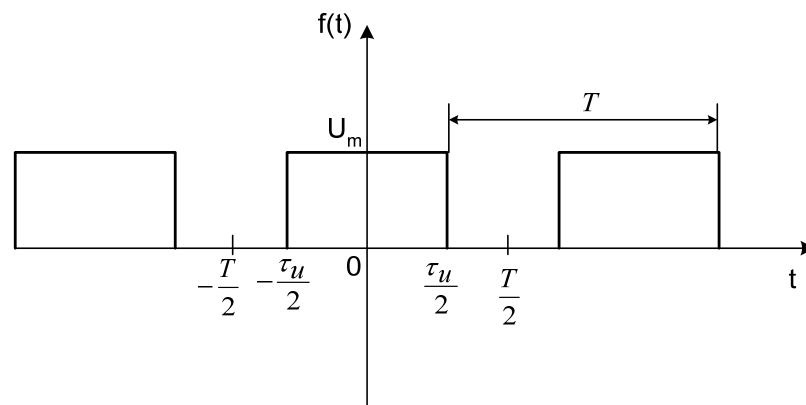


Рис. 2.9. Периодическая последовательность прямоугольных видеоимпульсов

Для определения спектров данного сигнала получим аналитическое выражение сигнала в пределах половины периода

$$U(t) = \begin{cases} U_m & t \leq \frac{\tau_u}{2} \\ 0 & \frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases}. \quad (2.17)$$

Постоянную составляющую определяем по формуле:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt, \quad (2.18)$$

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_{-\tau_u/2}^{\tau_u/2} U_m dt = \frac{U_m}{T} \left| t \right|_{-\tau_u/2}^{\tau_u/2} = U_m \frac{\tau_u}{T} = U_m \frac{1}{q},$$

где  $\frac{T}{\tau_u} = q$  – скважность.

Определяем комплексную амплитуду n-ой гармоники:

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U_m e^{-jn\omega_1 t} dt, \quad (2.19)$$

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2}{T} \int_{-\tau_u/2}^{\tau_u/2} U_m e^{-jn\omega_1 t} dt = \frac{2U_m}{T} \left( -\frac{1}{jn\omega_1} \right) e^{-jn\omega_1 t} \Bigg|_{-\tau_u/2}^{\tau_u/2}.$$

где  $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ ,

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2U_m}{T} \frac{e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{2}} - e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}}{jn\omega_1}.$$

Умножим числитель и знаменатель дроби на 2, получим:

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4U_m}{Tn\omega_1} \frac{e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{2}} - e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}}{2j} = \frac{4U_m}{Tn\omega_1} \sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}.$$

Если умножить и разделить полученное выражение на  $\frac{\tau_u}{2}$ , получим

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4U_m \frac{\tau_u}{2} \sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}{T n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}} = \frac{2U_m \sin \frac{2\pi \tau_u}{T} \frac{\tau_u}{2}}{\frac{T}{\tau_u} n \frac{2\pi \tau_u}{T} \frac{\tau_u}{2}}.$$

Так как  $\frac{T}{\tau_u} = q$ , то

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2U_m \sin \frac{n\pi}{q}}{q \frac{n\pi}{q}}. \quad (2.20)$$

Полученное выражение для комплексных амплитуд гармоник является вещественной величиной и может быть положительной или отрицательной в зависимости от знака  $\sin \frac{n\pi}{q}$ .

Выражение (2.20) справедливо при выборе начала отсчета времени в середине импульса. В случае изменения начала отсчета времени величина  $\dot{U}_{m_n}$  будет комплексной.

По определению  $\dot{U}_{m_n} = U_m e^{j\varphi_n}$ . Положительным значение  $\dot{U}_m$  будет в случае, если начальная фаза равна 0 ( $\varphi_n = 0$ , тогда  $e^{j0} = 1$ ). Отрицательным значение комплексной амплитуды будет в случае начальной фазы равной  $\pi$ , т.е.

$$e^{j\pi} = \cos\pi + j\sin\pi = -1.$$

Обычно амплитудно-частотный спектр записывается так:

$$U_{m_n} = \frac{2U_m}{q} \left| \frac{\sin \frac{\pi n}{q}}{\frac{\pi n}{q}} \right|, \quad (2.21)$$

а фазочастотный спектр записывается следующим образом:

$$\varphi_n = \begin{cases} 0 & \frac{\sin x}{x} \geq 0 \\ \pi & \frac{\sin x}{x} < 0 \end{cases}, \quad (2.22)$$

где  $x = n\omega_1 \frac{\tau_u}{2} = \frac{n\pi}{q}$ .

Выражение для спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов можно представить следующим рядом Фурье:

$$U(t) = \frac{U_m}{q} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2U_m}{q} \left| \frac{\sin \frac{\pi n}{q}}{\frac{\pi n}{q}} \right| \cos(\omega_1 t - \varphi_n). \quad (2.23)$$

Изменим начало отсчета последовательности прямоугольных импульсов (рис. 2.10).

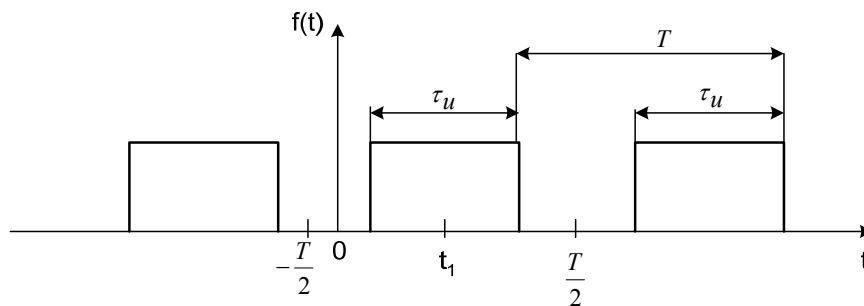


Рис. 2.10. Периодическая последовательность прямоугольных видеоимпульсов с изменением начала отсчета

Комплексная амплитуда составляющих сложного входного сигнала определяется по формуле (2.19):

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = \frac{2}{T} \int_{t_1 - \frac{\tau_u}{2}}^{t_1 + \frac{\tau_u}{2}} U_m e^{-jn\omega_1 t} dt,$$

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2U_m}{q} \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{2} e^{-jn\omega_1 t_1}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}. \quad (2.24)$$

Из полученного выражения видно, что изменение начала отсчета времени не влияет на амплитудно-частотный спектр сигнала.

$$U_{m_n} = \frac{U_m}{q} + \frac{2U_m}{q} \left| \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}} \right|.$$

Исходя из полученного выражения (2.24), с учетом знака  $U_{m_n}$  можно записать:

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2U_m}{q} \left| \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{2}} \right| e^{j0} e^{-jn\omega_1 t_1} \quad \text{при } U_{m_n} > 0,$$

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{2U_m}{q} \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{\frac{n\pi}{q}} e^{j\pi} e^{-jn\omega_1 t_1} \quad \text{при } U_{m_n} < 0.$$

Следовательно, для фазочастотного спектра можно записать:

$$\varphi_n = -n\omega_1 t + \begin{cases} 0 & \text{при } \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{\frac{n\pi}{q}} \geq 0 \\ \pi & \text{при } \frac{\sin \frac{n\pi}{q}}{\frac{n\pi}{q}} < 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Определим амплитудно-частотный (АЧС) и фазочастотный (ФЧС) спектры входного сигнала (см. рис. 2.6). Величина постоянной составляющей спектра равна:

$$U_0 = \frac{1}{T} \left( \int_0^{2/3\tau_u} E_m dt + \int_{2/3\tau_u}^{\tau_u} E_m dt \right) = \frac{2}{3} E_m \frac{\tau_u}{T} + \frac{1}{3} E_m \frac{\tau_u}{3} = \frac{7}{9} \frac{E_m}{q} = \frac{7}{27} = 0,26 \text{ В.}$$

Комплексная амплитуда гармоник равна:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{m_n} &= \frac{2}{T} \int_{\frac{\tau_u}{3} - \frac{\tau_u}{3}}^{\frac{\tau_u}{3} + \frac{\tau_u}{3}} E_m e^{-jn\omega_1 t} dt + \frac{2}{T} \int_{\frac{5\tau_u}{6} - \frac{\tau_u}{6}}^{\frac{5\tau_u}{6} + \frac{\tau_u}{6}} \frac{1}{3} E_m e^{-jn\omega_1 t} dt, \\ \dot{U}_{m_n} &= \frac{2E_m}{T} \left( -\frac{1}{jn\omega_1} \right) e^{-jn\omega_1 t} \left| \frac{\tau_u}{3} + \frac{\tau_u}{3} \right. + \frac{2E_m}{3T} \left( -\frac{1}{jn\omega_1} \right) e^{-jn\omega_1 t} \left| \frac{5\tau_u}{6} + \frac{\tau_u}{6} \right. \\ &\quad \left. \frac{\tau_u}{3} - \frac{\tau_u}{3} \right. \left. \frac{5\tau_u}{6} - \frac{\tau_u}{6} \right. \\ \dot{U}_{m_n} &= \frac{2E_m}{Tn\omega_1} \left( -\frac{1}{j} \right) \left( e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \cdot e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} - e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \cdot e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \right) + \\ &\quad + \frac{2E_m}{3Tn\omega_1} \left( -\frac{1}{j} \right) \left( e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}} \cdot e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} - e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}} \cdot e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} \right), \end{aligned}$$

$$U_{m_n} = \frac{2E_m}{Tn\omega_1} \left(-\frac{1}{j}\right) e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \left( e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} - e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \right) + \frac{2E_m}{3Tn\omega_1} \left(-\frac{1}{j}\right) \times \\ \times e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}} \left( e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} - e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} \right).$$

Умножим числитель и знаменатель на 2, получим:

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4E_m}{Tn\omega_1} e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \left( \frac{e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} - e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}}}{2j} \right) + \frac{4E_m}{3Tn\omega_1} \times \\ \times e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}} \left( \frac{e^{jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} - e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{6}}}{2j} \right),$$

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4E_m}{Tn\omega_1} e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \cdot \sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3} + \frac{4E_m}{3Tn\omega_1} e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}} \cdot \sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}.$$

Учитывая, что  $T = q\tau_u$ , умножим и разделим первое слагаемое на 3, а второе слагаемое на 6, получим

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4E_m}{3q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} e^{-jn\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} + \frac{4E_m}{18q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} e^{-jn\omega_1 \frac{5\tau_u}{6}}.$$

Так как  $e^{-j\varphi} = \cos\varphi - j\sin\varphi$ , можно записать:

$$\dot{U}_{m_n} = \frac{4E_m}{3q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \left( \cos n\omega_1 \frac{\tau_u}{3} - j\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3} \right) +$$



$$\begin{aligned}
& + \frac{4E}{18q} \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} \left( \cos n\omega_1 \frac{5\tau_u}{6} - j \sin n\omega_1 \frac{5\tau_u}{6} \right), \\
\dot{U}_{mn} = & \frac{4Em}{3q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \cos n\omega_1 \frac{\tau_u}{3} + \frac{4Em}{18q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} \cos n\omega_1 \frac{5\tau_u}{6} - \\
& - j \left( \frac{4Em}{3q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{3}} \sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{3} + \frac{4Em}{18q} \cdot \frac{\sin n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}}{n\omega_1 \frac{\tau_u}{6}} \sin n\omega_1 \frac{5\tau_u}{6} \right).
\end{aligned}$$

Амплитудно-частотный спектр входного сигнала определяется по формуле:

$$U_{mn} = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (2.26)$$

где 
$$A = \frac{4Em}{3q} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi n}{3q}}{\frac{2\pi n}{3q}} \cos \frac{2\pi n}{3q} + \frac{1}{6} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi n}{6q}}{\frac{2\pi n}{6q}} \cos \frac{2\pi n}{6q},$$

$$B = \frac{4Em}{3q} \cdot \left( \frac{\sin \frac{2\pi n}{3q}}{\frac{2\pi n}{3q}} \sin \frac{2\pi n}{3q} + \frac{1}{6} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi n}{6q}}{\frac{2\pi n}{6q}} \sin \frac{10\pi n}{6q} \right).$$

Фазочастотный спектр (ФЧС) входного сигнала определяется по формуле:

$$\psi_{nвх} = -\arctg \frac{B}{A}. \quad (2.27)$$

Данные расчета АЧС и ФЧС приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Результаты расчета АЧС и ФЧС входного сигнала

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , Гц	0	9,6	19,2	28,8	38,4	48,0	57,7	67,3	76,9	86,6
$U_{mn}$ , В	0,26	0,45	0,26	0,12	0,05	0,04	0,06	0,082	0,06	0
$\psi_{nex}$ , град	-0	-50	-73	74	67	-60	-72	72	48	0
$n$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$f$ , Гц	96,2	105,7	115,3	125	134,6	144,2	153,8	163,5	173,1	
$U_{max}$ , В	0,04	0,05	0,03	0,016	0,015	0,025	0,036	0,026	0	
$\psi_{nex}$ , град	-53	-74	76	73	-55	-68	73	47	0	

На рис. 2.11 представлен амплитудно-частотный спектр входного сигнала.

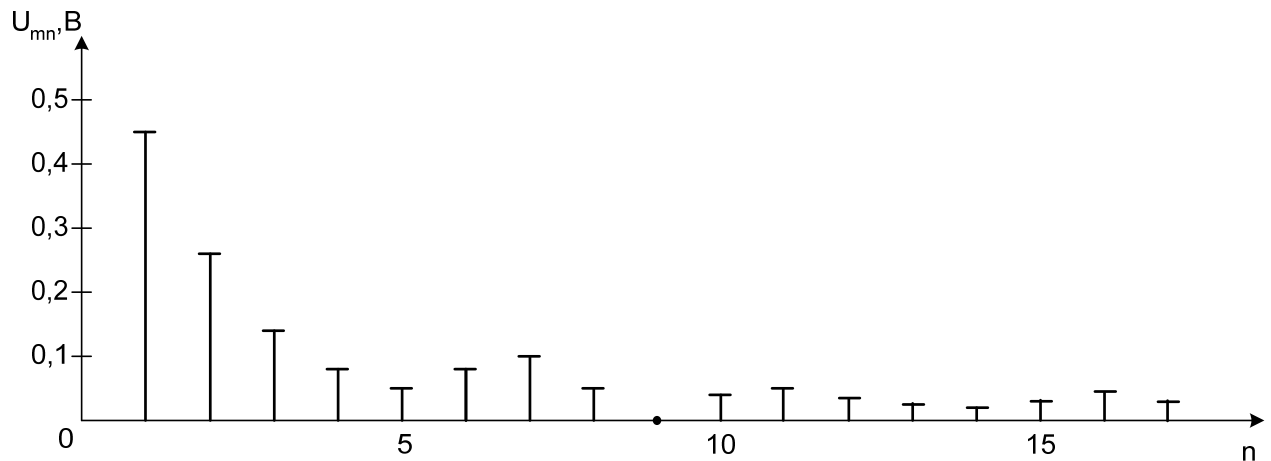


Рис. 2.11. Амплитудно-частотный спектр входного сигнала

На рис. 2.12 представлен фазочастотный спектр входного сигнала.

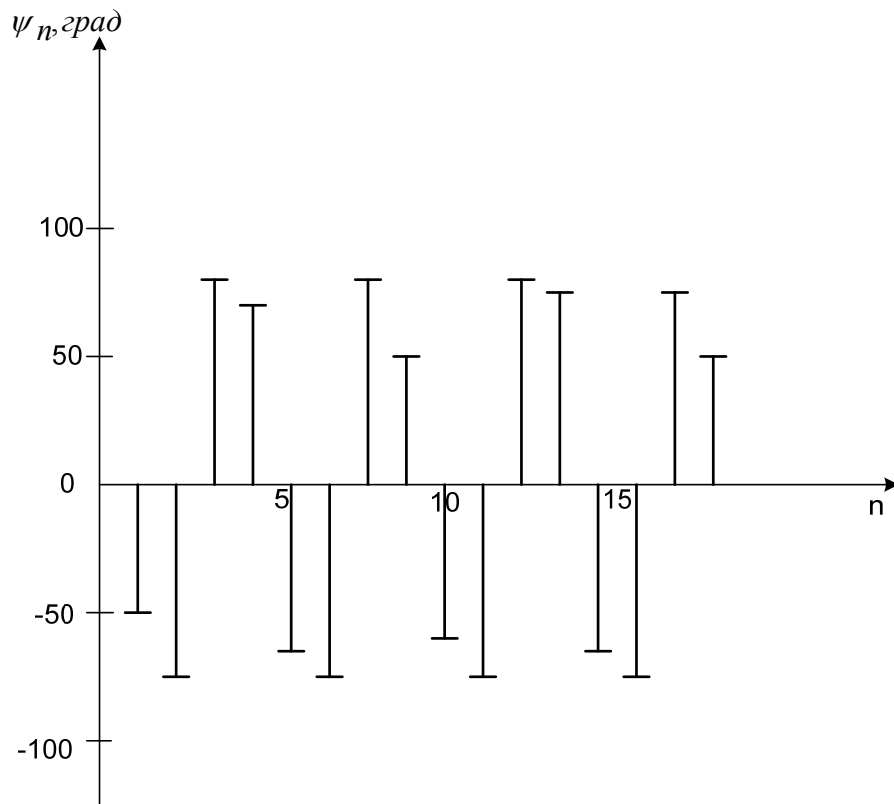


Рис. 2.12. Фазочастотный спектр входного сигнала

### **2.3. Литература, рекомендуемая для использования при выполнении контрольной работы**

1. Батура, М.П. Теория электрических цепей: Учебник для электротехнических специальностей вузов / М.П. Батура, А.П. Кузнецов, А.П. Курулев: под общ. ред. Курулева А.П. – 2-е изд., испр. – Мн.: Вышэйшая школа, 2007. – 606 с.

2. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов по спец. «Радиотехника» / С.И. Баскаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.

3. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники / Г.И. Атабеков. – 5-е изд. в 3-х частях. Ч. 1. Линейные электрические цепи. – М.: Энергия, 1978. – 592 с.