

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра сетей и устройств телекоммуникаций

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

по дисциплине

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**

(раздел «Цифровая обработка сигналов»)

для студентов

специальностей I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
и I-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации»  
заочной формы обучения

МИНСК 2007

УДК 621.391  
ББК 32.811  
М 54

Составитель  
И. И. Астровский

**М 54** **Методические** указания и контрольные задания по дисциплине «Теория электрической связи» (раздел «Цифровая обработка сигналов») для студ. спец. I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» и I-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации» заоч. формы обуч. / сост. И. И. Астровский. – Минск : БГУИР, 2007. – 20 с.

В издание включены программа, методические указания по самостоятельному изучению дисциплины «Теория электрической связи» (раздел «Цифровая обработка сигналов»), а также задание к контрольной работе. Издание может быть полезным при самостоятельном знакомстве студента с новейшей литературой о современных системах передачи информации.

**УДК 621.391**  
**ББК 32.811**

© Астровский И. И., 2007  
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

## ВВЕДЕНИЕ

Современные системы передачи информации и телекоммуникационные технологии развиваются столь быстрыми темпами, что их изучение возможно лишь при постоянном внимании к периодическим и специальным изданиям. Одни из студентов-заочников по роду своей деятельности могут иметь такую возможность. Другие же, наоборот, имеют ограниченный доступ к источникам новейшей информации и хотели бы пользоваться доступными учебниками. Но как одни, так и другие должны знать основы и тенденции построения современных систем передачи информации.

Учитывая то, что в современных системах связи преобладает цифровая обработка сигналов и решающую роль в ускорении и увеличении достоверности передачи информации играют алгоритмы цифровой обработки, при составлении программы дисциплины и выборе заданий для контрольной работы в качестве основного учебника было взято учебное пособие В. В. Лосева «Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки».

В пособии В. В. Лосева кратко, в доступной для студента-заочника форме изложены классические алгоритмы, ускоряющие выполнение базовых операций, многократно выполняемых при приеме сигналов. Приведены и всесторонне рассмотрены быстрые алгоритмы спектральных преобразований, без которых трудно представить современные системы связи. Значительное внимание в книге уделено теории и ускоренным способам вычисления сверток и корреляционных функций, на вычислении которых основана оптимальная в смысле обеспечения максимальной помехоустойчивости обработка сложных дискретных сигналов.

Безусловно, только указанного пособия ни в коей мере не достаточно для успешного овладения дисциплиной и студент обязан самостоятельно знакомиться с новейшей литературой о современных системах передачи информации. Определенную направленность работе с литературой могут дать приводимая ниже программа дисциплины, вопросы к контрольной работе, вопросы к зачету и предлагаемая для изучения литература.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «Теория электрической связи» (раздел «Цифровая обработка сигналов») для студентов заочной формы обучения специальностей I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» и I-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации» предполагает изучение следующих вопросов.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ, ЕЕ МЕСТО В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

#### 1.1. Цель изучения дисциплины

Преподавание дисциплины предполагает формирование инженеров с широким кругозором в области современных систем передачи информации.

Основное внимание уделяется изучению современных методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов и соответствующих устройств, повышающих качественные показатели современных систем передачи информации.

В процессе изучения дисциплины студент должен освоить основы теории и техники современных систем передачи информации, которые подразумевают цифровую обработку сигналов. Основное внимание следует уделить синтезу и реализации эффективных алгоритмов обработки информации, минимизирующих аппаратные, вычислительные и временные затраты.

В результате изучения дисциплины студент должен уметь выбрать соответствующий алгоритм, эффективный в конкретном приложении, знать достоинства и недостатки аппаратной и программной реализаций методов ЦОС, уметь производить их техническую реализацию в современных системах электросвязи.

#### 1.2. Задачи изучения дисциплины:

- освоение математических основ современных систем передачи информации;
- знакомство с научно-техническими решениями и открытиями в современных системах передачи информации;
- изучение наиболее эффективных алгоритмов и перспективных технических решений по цифровой обработке сигналов в системах передачи информации;
- знакомство с проблемами и задачами, решение которых имеет важное научное или народнохозяйственное значение.

### 1.3. Перечень дисциплин, на которых базируется изучение теории электрической связи

Название дисциплины	Тема
1. Высшая математика	Интегральные и дифференциальные исчисления. Вычисления с комплексными числами. Теория вероятностей
2. Высшая алгебра	Алгебра логики. Теория чисел
3. Физика	Электричество. Магнетизм. Теория электромагнитных колебаний и волн
4. Схемотехника в телекоммуникационных системах	Основы построения цифровых, микропроцессорных и вычислительных устройств
5. Теория электрических цепей	Основные законы и соотношения для электрических цепей. Основные методы анализа и расчета электрических цепей
6. Теория электрической связи	Модели, характеристики и параметры сигналов. Основы проектирования и анализа систем связи различного назначения
7. Радиопередающие устройства	Принципы построения и основные характеристики радиопередающих устройств
8. Радиоприемные устройства	Принципы построения и основные характеристики радиоприемных устройств

Изучению дисциплины должно предшествовать усвоение основ: алгебры логики, теории чисел, теории вероятностей, основ построения цифровых, микропроцессорных и вычислительных устройств, основ проектирования и анализа систем связи различного назначения.

Излагаемый материал базируется на использовании основ абстрактной алгебры, включая векторные пространства и матричную алгебру, преобразований в конечных полях, спектральных преобразований сигналов и их композиций, использовании свертки, спектрального и корреляционного анализа.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 2.1. Название тем, их содержание

Название темы	Содержание
Раздел 1 Теоретические основы современных систем передачи информации	
Тема 1. Введение	<p>Предмет и задачи дисциплины, его взаимосвязь с другими дисциплинами специальности. Основные достоинства современных систем цифровой обработки сигналов. Использование специализированных процессоров и микроЭВМ. Особенности проектирования и эксплуатации цифровых устройств, систем передачи и обработки сигналов в условиях комплексной миниатюризации электро-связи.</p> <p>Информация и средства ее передачи. Основные виды аналоговых и цифровых линий связи. Структурные схемы типовых линий связи, их сравнительный анализ. Достоинства и недостатки аналоговых и цифровых линий связи.</p> <p>Применение результатов теории кодирования в системах передачи информации, вычислительных и микропроцессорных системах обработки и хранения информации, микроэлектронике, производстве, эксплуатации цифровых систем и устройств в целях повышения достоверности передаваемой, хранимой, обрабатываемой информации, сокращения избыточности, защиты информации от несанкционированного доступа.</p>
Тема 2. Алгоритмы цифровой обработки сигналов в системах передачи информации	<p>Пространственно-временная обработка сигналов. Фильтровый и корреляционный способы. Эффективность алгоритмов и оценка их вычислительной сложности. Вычисления с комплексными числами. Вычисление степеней. Вычисление полиномов. Умножение полиномов. Векторно-матричное и матричное умножения. Факторизация матриц.</p>
Тема 3. Обработка сигналов с помощью дискретных ортогональных	<p>Представление сигналов функциональными рядами и обобщенный спектр. Наиболее употребительные для специальной цифровой</p>

<p>преобразований</p>	<p>обработки сигналов системы базисных функций.</p> <p>Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и его свойства. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Алгоритм БПФ с прореживанием по времени. Алгоритм БПФ с прореживанием по частоте. Алгоритм БПФ с произвольным основанием (алгоритм Кули–Тьюки). Алгоритм Винограда. Применение БПФ для программной реализации цифровых фильтров. Вычисление сверток и корреляционных функций. Примеры применения БПФ в системах связи.</p> <p>Функции Уолша и дискретное преобразование Уолша–Адамара (БПУ). Китайская теорема об остатках. Восстановление чисел с использованием китайской теоремы об остатках. Восстановление полиномов с использованием китайской теоремы об остатках. Алгоритм Евклида. Решение диофантовых уравнений с помощью алгоритма Евклида. Особенности аппаратной реализации алгоритмов. Теоретико-числовые преобразования (ТЧП). ТЧП Ферма. ТЧП Мерсенна. Преобразование Хаара. Свойства и сравнительный анализ преобразований.</p> <p>Цифровые фильтры и обнаружители на основе ортогональных преобразований. Техническая реализация цифровых фильтров и обнаружителей с использованием специальных процессоров.</p>
<p>Тема 4. Специальные алгоритмы</p>	<p>Алгоритмы дискретного преобразования Фурье по смешанным основаниям. Характеристики алгоритмов. Общий алгоритм БПФ по смешанным основаниям. Преобразование составных последовательностей. Алгоритм обработки длинных последовательностей. Модификация для ЭВМ с иерархической организацией памяти. Векторизация алгоритма взаимно простых множителей.</p> <p>Вычисление многомерного ДПФ. Векторизация алгоритмов свертки. Алгоритм прямоугольного преобразования. Векторизация алгоритма Винограда преобразования Фурье. Реализация алгоритмов цифровой фильтрации на основе конвейерных векторных процессоров. Матричные структуры для реализации</p>

	итерационных алгоритмов.
Тема 5. Применение цифровой обработки сигналов в системах передачи, хранения и обработки информации	<p>Спектроскопические исследования. Получение изображения радиоисточника. Цифровой метод, базирующийся на алгоритме прямой корреляции во временной области. Процессор на основе БПФ. Спектрокоррелятор с БПФ. Реализация системы обработки сигналов на основе спектроанализатора с БПФ.</p> <p>Мультиплексорная система обработки сигналов. Задачи реально-временного моделирования систем передачи данных. Специализированные процессоры обработки сигналов в мультиплексорной конфигурации. Цифровая обработка блоков данных. Микроконвейерный режим работы процессоров. Структура программного и аппаратного обеспечения. Сопряжение с внешней аппаратурой. Аппаратурное обеспечение и реализация.</p> <p>Применение мультиплексорных ЭВМ, управляемых данными, в цифровой обработке сигналов. Физические ограничения на совершенствование технологии и улучшение характеристик ЭВМ. Архитектурный метод повышения производительности ЭВМ.</p> <p>Программирование мультипроцессорных ЭВМ под управлением данных. Применение систолических матриц. Волновой процессор. Поточковые машины. Поточковая архитектура с несколькими уровнями разрешения.</p> <p>Синхронные потоки данных (СПД) в задачах цифровой обработки сигналов. Базовые архитектуры. Проверка корректности и планирование. Формализация графа СПД. Планирование в однопроцессорных системах. Планирование в параллельных мультиплексорных системах. Практическая реализация.</p> <p>Системы интеллектуальной цифровой обработки сигналов.</p>
Тема 6. Заключение	Перспективы развития цифровых методов и устройств обработки сигналов в системах передачи информации.



## 2.2. Лабораторно-практические занятия, их содержание и объем в часах

Наименование	Объем в часах
1. Быстрые преобразования Фурье и их применение в радиосвязи	4
2. Цифровые фильтры на основе быстрых спектральных преобразований	4
3. Обработка сигналов с использованием быстрых преобразований Уолша–Адамара	4
4. Вычисление сверток и корреляционных функций на основе быстрых спектральных преобразований	2
5. Теоретико-числовые преобразования и их применение в радиосвязи	2
Всего за учебный год	16

Порядок выполнения лабораторных работ устанавливается преподавателем, проводящим лабораторные занятия, по согласованию с лектором.

## 3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### 3.1. Основная литература

1. Лосев, В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки: учеб. пособие для вузов / В. В. Лосев. – Минск : Высш. шк., 1990.

2. Шелухин, О. И. Цифровая обработка и передача речи / О. И. Шелухин, Н. Ф. Лукьянцев. – М. : Радио и связь, 2000.

3. Бондарев, В. Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства / В. Н. Бондарев, Г. Трестер, В. С. Чернега. – Севастополь : СевГТУ, 1999.

4. Куприянов, М. С. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. 2-е изд., перераб. и доп. / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин. – СПб. : Политехника, 2002.

5. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003.

### 3.2. Дополнительная

6. Цифровая обработка сигналов: справочник / Л. М. Гольденберг [и др.]. – М. : Радио и связь, 1985.

7. Габидулин, Э. М. Кодирование в радиоэлектронике / Э. М. Габидулин, В. Б. Афанасьев. – М. : Радио и связь, 1986.

8. Трахтман, А. М. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. – М. : Сов. радио, 1975.

9. Блейхут, Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Р. Блейхут. – М. : Мир, 1986.

10. Питерсон, У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М. : Мир, 1976.

11. Мак-Вильямс, Ф. Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф. Дж. Мак-Вильямс, Н. Дж. Слоэн. – М. : Связь, 1979.

12. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978.

13. Кларк Кейн, Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. – М. : Радио и связь, 1985.

14. Конопелько, В. К. Надежное хранение информации в полупроводниковых запоминающих устройствах / В. К. Конопелько, В. В. Лосев. – М. : Радио и связь, 1986.

15. Ахмед, Н. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Н. Ахмед, К. Р. Рао. – М. : Связь, 1980.

#### 4. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

4.1. Изучение теоретического материала по конспектам и рекомендуемой литературе.

4.2. Подготовка к выполнению и защите лабораторных работ.

4.3. Самостоятельная проработка научной литературы.

#### 5. ВОПРОСЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Основные достоинства современных систем цифровой обработки сигналов. Использование специализированных процессоров и микроЭВМ.

2. Особенности проектирования и эксплуатации цифровых устройств, систем передачи и обработки сигналов в условиях комплексной миниатюризации в электросвязи.

3. Аналоговые и дискретные сигналы. Дискретизация и квантование. Представление чисел. Специальные системы счисления.

4. Представление чисел и цифровых сигналов в виде полиномов. Арифметические и логические операции.

5. Алгоритмы цифровой обработки сигналов. Понятие алгоритма и основные требования, предъявляемые к алгоритмам.

6. Эффективность алгоритмов и оценка их вычислительной сложности.

7. Алгоритмы вычислений с комплексными числами.

8. Вычисление степеней.

9. Вычисление полиномов. Метод Горнера.

10. Вычисление полиномов в точках.

11. Умножение полиномов. Примеры алгоритмов.

12. Векторно-матричное и матричное умножения.
13. Представление сигналов функциональными рядами.
14. Обработка сигналов с помощью дискретных ортогональных преобразований.
15. Дискретные экспоненциальные функции и их свойства.
16. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Матричное представление ДПФ.
17. Свойства дискретного преобразования Фурье. Теорема о свертке и ее применение.
18. Быстрые методы вычисления дискретного преобразования Фурье.
19. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прореживанием по времени.
20. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прореживанием по частоте.
21. Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) с произвольным основанием (алгоритм Кули–Тьюки).
22. Вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ) действительных последовательностей.
23. Функции Уолша и дискретное преобразование Уолша–Адамара.
24. Быстрое преобразование Уолша–Адамара (БПА).
25. Двухмерное преобразование Уолша–Адамара. Взаимосвязь спектров БПФ и БПА.
26. Теоретико-числовые преобразования и вычисление сверток.
27. Функции Хаара и преобразование Хаара.
28. Линейная, циклическая и диадная свертки.
29. Линейная, циклическая и диадная корреляционные функции.
30. Прямые методы вычисления сверток и корреляционных функций.
31. Вычисление сверток и корреляционных функций при помощи быстрых ортогональных преобразований.
32. Вычисление коротких сверток и произведений полиномов.
33. Китайская теорема об остатках.
34. Элементы высшей алгебры. Полиномы над полем.
35. Алгоритм Евклида.
36. Вычисление коротких сверток при помощи китайской теоремы об остатках.
37. Вычисление длинных сверток с помощью вложения коротких (гнездовой алгоритм).
38. Мультипликативная сложность вычисления свертки.
39. Алгоритм Винограда преобразования Фурье.
40. Гнездовой алгоритм. Вычисление коротких преобразований.
41. Эффективность и общая структура алгоритма Винограда.
42. Декодирование корректирующих кодов при помощи быстрого преобразования Адамара.
43. Разделение мажоритарно-уплотненных сигналов при помощи диадной свертки.
44. Усеченные алгоритмы.
45. Основные области применения специальных цифровых алгоритмов.

46. Перспективные структуры программного и аппаратного обеспечения.

47. Перспективы развития цифровых методов обработки сигналов в системах связи.

Основная литература. Лосев, В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В. В. Лосев. – Минск : Высш. шк., 1990.

## 6. ВОПРОСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Построить наиболее экономичную схему цифрового коррелятора М-последовательности (длина кода равна 1023). Генераторный полином выбрать самостоятельно.

2. Привести алгоритм возведения числа 17 в 11-ю степень наиболее экономичным методом.

3. Вычислить произведение полиномов  $p(z) \cdot q(z)$  наиболее экономичным методом при:  $p(z) = z^3 + 2z + 3$ ;  $q(z) = z^3 + 3z$ ;  $z = \{-2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ .

4. Вычислить произведение полиномов  $p(z) \cdot q(z)$  наиболее экономичным методом при:  $p(z) = z^2 + z + 1$ ;  $q(z) = z^3 + 2z^2 + 1$ ;  $z = \{-4, -1, 0, 1, 2, 3\}$ .

5. Умножить матрицу А на вектор X наиболее экономичным методом при:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad X = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}.$$

6. Умножить матрицу А на вектор X наиболее экономичным методом при:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad X = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}.$$

7. Умножить матрицу А на вектор X наиболее экономичным методом при:

$$A = \begin{bmatrix} 5 & -5 & 5 & 5 \\ -5 & -5 & 5 & 5 \\ 5 & 5 & -5 & -5 \\ 5 & -5 & -5 & 5 \end{bmatrix}; \quad X = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}.$$

8. Найти коэффициенты Фурье сигнала:  $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ .

9. Найти коэффициенты Фурье дискретной последовательности:

$X = \{2, -2, 3, 4, -4\}$ .

10. Найти коэффициенты Фурье дискретной последовательности:

$X = \{2, 5, -1, 0, 2, 1, 1\}$ .

11. Найти коэффициенты Фурье дискретной последовательности:  
 $X = \{7, -5, 10, -3, 1, -4\}$ .
12. Найти коэффициенты Фурье дискретной последовательности:  
 $X = \{-4, -2, 4, 3, 2, -3, 4, -4\}$ .
13. Найти коэффициенты Фурье дискретной последовательности  $X$ , используя быстрые алгоритмы:  $X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ .
14. Разработать эффективный алгоритм вычисления коэффициентов Фурье дискретной последовательности значностью  $n=9$ .
15. Вычислить наиболее экономичным методом коэффициенты Фурье дискретной последовательности:  $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ .
16. Разработать эффективный алгоритм вычисления коэффициентов Фурье дискретной последовательности значностью  $n=72$ .
17. Разработать эффективный алгоритм вычисления коэффициентов Фурье дискретной последовательности значностью  $n=432$ .
18. Найти коэффициенты Уолша–Адамара дискретной последовательности  $X$ :  $X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ .
19. Привести схему эффективного алгоритма вычисления апериодической свертки дискретной последовательности значностью  $n=7$ .
20. Привести схему эффективного алгоритма вычисления периодической свертки дискретной последовательности значностью  $n=7$ .
21. Привести схему эффективного алгоритма вычисления диадной свертки дискретной последовательности значностью  $n=8$ .
22. Привести схему эффективного алгоритма вычисления апериодической автокорреляционной функции дискретной последовательности значностью  $n=7$ .
23. Привести схему эффективного алгоритма вычисления периодической автокорреляционной функции дискретной последовательности значностью  $n=7$ .
24. Привести схему эффективного алгоритма вычисления диадной автокорреляционной функции дискретной последовательности значностью  $n=8$ .
25. Найти коэффициенты преобразования по Хаару дискретной последовательности  $X = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ .
26. Привести схему алгоритма Евклида для нахождения наибольших общих делителей полиномов, степень которых не выше 3.
27. Привести схему алгоритма Евклида для нахождения наибольших общих делителей полиномов, степень которых не выше 4.
28. Привести способы и вычислить апериодическую свертку двух дискретных последовательностей:  $X_1 = \{-3, -2, -1, 0, 1\}$ ;  $X_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ .
29. Привести способы и вычислить периодическую свертку двух дискретных последовательностей:  $X_1 = \{-2, -1, 0, 1\}$ ;  $X_2 = \{1, 2, 3, 4\}$ .
30. Привести способы и вычислить периодическую свертку двух дискретных последовательностей:  $X_1 = \{-2, -1, 0, 1\}$ ;  $X_2 = \{1, 2, 3, 4\}$ .
31. Вычислить и привести графики апериодической, периодической и диадной сверток дискретной последовательности:  $X = \{1, 2, 3, 4\}$ .

32. Вычислить и привести графики аперiodической, периодической и диадной автокорреляционных функций дискретной последовательности:  $X=\{1, 2, 3, 4\}$ .

33. Вычислить и привести графики аперiodической, периодической и диадной (взаимных) сверток дискретных последовательностей:  $X_1=\{-2, -1, 0, 1\}$ ;  $X_2=\{1, 2, 3, 4\}$ .

34. Вычислить и привести графики аперiodической, периодической и диадной взаимокорреляционных функций дискретных последовательностей:  $X_1=\{-2, -1, 1, 5\}$ ;  $X_2=\{1, 2, 3, 4\}$ .

35. Вычислить и привести графики аперiodической и периодической автокорреляционных функций для последовательности максимальной длины значностью  $n=7$ . Генераторный полином выбрать самостоятельно. В качестве элементов последовательности взять значения  $\pm 1$ .

Пояснить, как изменятся графики, если вместо выбранной последовательности взять негативную (инвертированную по значениям) последовательность.

36. Вычислить и привести графики аперiodических автокорреляционных и взаимокорреляционных функций двух различных последовательностей максимальной длины значностью  $n=7$ . Генераторные полиномы выбрать самостоятельно. В качестве элементов последовательностей взять значения  $\pm 1$ .

37. Вычислить и привести графики аперiodической и периодической сверток для последовательности максимальной длины значностью  $n=7$ . Генераторный полином выбрать самостоятельно. В качестве элементов последовательности взять значения  $\pm 1$ .

Пояснить, как изменятся графики, если вместо выбранной последовательности взять зеркальную (инверсную по времени) последовательность.

38. Пояснить и показать на примерах, зависит ли вид аперiodических, периодических и диадных сверток от начальной фазы исходной последовательности. Начальную фазу изменять путем циклического сдвига исходной последовательности.

39. Пояснить и показать на примерах, зависит ли вид аперiodических, периодических и диадных взаимных сверток от начальных фаз исходных последовательностей. (Начальную фазу изменять путем циклического сдвига исходной последовательности).

40. Пояснить и показать на примерах, зависит ли вид аперiodических, периодических и диадных автокорреляционных функций от начальной фазы исходной последовательности. (Начальную фазу изменять путем циклического сдвига исходной последовательности).

41. Пояснить и показать на примерах, зависит ли вид аперiodических, периодических и диадных взаимокорреляционных функций от начальных фаз исходных последовательностей. (Начальную фазу изменять путем циклического сдвига исходной последовательности).

42. Пояснить и сравнить (с помощью примеров, рисунков и др.) сущность циклического и диадного сдвигов.

43. Показать, как осуществляются и минимизируются арифметические операции над комплексными числами.

44. Оценить сложность нахождения  $X^N$ :

- прямым методом,
- бинарным методом,
- обобщенным методом при  $N=64$ .

45. Привести и сравнить методы вычисления  $X^{35}$ .

46. Привести и сравнить методы вычисления  $X^{19}$ .

47. Зависят ли методы вычисления полиномов от:

- степени полинома,
- количества точек, в которых должен быть вычислен полином?

Дать аргументированный ответ.

48. Требуется вычислить полином в нечетном количестве точек, например в 17. Можно ли применить алгоритм «разделяй и властвуй»? Ответ пояснить.

49. Требуется найти произведение полиномов  $p(z) \cdot q(z)$ , где  $p(z) = z^5 + 3z^3 - 2z^2 + 1$ ;  $q(z) = z^4 + 2z^2 - z - 5$ . Предложить эффективный алгоритм.

50. Требуется умножить входной вектор на матрицу порядка 8, состоящую из  $\pm 1$ . Какой может быть сложность алгоритма? Ответ пояснить.

51. Задан полином  $p(z) = 7z^3 + 3z^2 - 2z + 3$ . Вычислить его в точках  $z = \{-2, -1, 0, 3\}$ , используя сравнения по модулю.

52. Требуется найти произведение полиномов  $p(z) \cdot q(z)$ , где  $p(z) = 3z^5 - 2z^3 + 3z^2 + 2$ ;  $q(z) = z^4 + 2z^2 - 3z + 4$ . Оценить сложность алгоритма.

53. Для последовательности  $s(n)$ , имеющей 8 отсчетов, известны коэффициенты Фурье  $f(k) = \{f_0, f_1, \dots, f_7\}$ . Записать коэффициенты Фурье для последовательности  $s(n+3)$ .

54. При каком виде свертки (апериодическая, периодическая, диадная) может быть применена теорема о свертке? Дать аргументированный ответ.

55. При каком виде свертки (апериодическая, периодическая, диадная) может быть применена теорема о корреляции? Дать аргументированный ответ.

56. Даны дискретные последовательности:  $\{s(n)\} = \{1, 2, 3, 4\}$  и  $\{u(n)\} = \{5, 6, 7, 8\}$ . Найти их свертки и корреляционные функции (периодические и непериодические). Привести расчетные данные и графики.

57. Можно ли получить коэффициенты Фурье одномерного массива, пользуясь двумерным преобразованием Фурье? Пояснить на примерах.

58. Сравните многомерное преобразование Фурье с БПФ с произвольным основанием. Укажите возможные сходства и различия.

59. Известны быстрые методы вычисления ДПФ с прореживанием по времени и по частоте. Могут ли быть предложены другие методы? Дать аргументированный ответ.

60. В. В. Лосев в книге «Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки» (Минск : Высш. шк., 1990) на с. 44 и 46 приводит формулы:  $F = VS = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 PS$  (3.30) и  $F = VS = P' \Phi'_1 \Phi'_2 \Phi'_3 S$

(3.31). В чем отличие этих формул? Дать аргументированный ответ. Привести примеры.

61. Преобразование Фурье ориентировано на получение комплексных коэффициентов от последовательностей, представленных в комплексной форме. Таким образом, и для действительных последовательностей спектр получается комплексным. А можно ли для действительных последовательностей обойтись действительным спектром? Дать аргументированный ответ.

62. Преобразование Уолша значительно проще преобразования Фурье. Почему же до сих пор применяется преобразование Фурье, а не преобразование Уолша?

63. Можно ли с помощью преобразования Уолша–Адамара получать периодические и аperiodические свертки сигналов? Дать аргументированный ответ.

64. Пояснить на примере, как отличаются спектральные составляющие по Уолшу–Адамару исходной и диадно-сдвинутой последовательностей.

65. В теории радиотехнических систем широко используются корреляционные функции и свертки аperiodических и периодических сигналов. Могут ли быть распространены выводы этой теории на случаи использования диадных сверток и корреляционных функций? Дать аргументированный ответ.

66. Приведите запись аperiodической свертки двух сигналов одинаковой длины в матричной форме. Приведите примеры вычислений и постройте графики.

67. Приведите запись аperiodической корреляционной функции двух сигналов одинаковой длины в матричной форме, приведите примеры вычислений и постройте графики.

68. Приведите запись периодической свертки двух сигналов одинаковой длины в матричной форме, приведите примеры вычислений и постройте графики.

69. Приведите запись периодической корреляционной функции двух сигналов одинаковой длины в матричной форме, приведите примеры вычислений и постройте графики.

70. Приведите запись в матричной форме диадной свертки двух дискретных последовательностей одинаковой длины, приведите примеры вычислений и постройте графики.

71. Приведите запись в матричной форме диадной корреляционной функции двух дискретных последовательностей одинаковой длины. Приведите примеры вычислений и постройте графики.

72. Исходные сигналы представлены в виде полиномов от переменной  $z$ :

$$s(z) = \sum_{l=0}^{L-1} s(l)z^l; \quad u(z) = \sum_{m=0}^{M-1} s(m)z^m. \quad \text{Запишите выражение для}$$

аperiodической свертки, приведите примеры вычислений и постройте графики.



73. Исходные сигналы представлены в виде полиномов от переменной  $z$ :

$$s(z) = \sum_{l=0}^{L-1} s(l)z^l; \quad u(z) = \sum_{m=0}^{M-1} s(m)z^m. \text{ Запишите выражение для}$$

апериодической корреляционной функции. Приведите примеры вычислений и постройте графики.

74. Исходные сигналы представлены в виде полиномов от переменной  $z$ :

$$s(z) = \sum_{l=0}^{L-1} s(l)z^l; \quad u(z) = \sum_{m=0}^{M-1} s(m)z^m. \text{ Запишите выражение для периодической}$$

(циклической) корреляционной функции, приведите примеры вычислений и постройте графики.

75. Исходные сигналы представлены в виде полиномов от переменной  $z$ :

$$s(z) = \sum_{l=0}^{L-1} s(l)z^l; \quad u(z) = \sum_{m=0}^{M-1} s(m)z^m. \text{ Запишите выражение для периодической}$$

(циклической) свертки, приведите примеры вычислений и постройте графики.

76. Используя двумерное преобразование Уолша–Адамара, понизить степень преобразования при  $N=16$ . Привести блок-схему преобразования, оценить сложность алгоритма.

77. Вычислить циклическую свертку дискретных последовательностей, заданных векторами  $S=[2, -2, 1, 0]$  и  $H=[1, 2, 3, 4]$ , используя теоретико-числовое преобразование Ферма. Представить графики последовательностей и свертки.

78. Вычислить циклическую свертку дискретных последовательностей, заданных векторами  $S=[2, -2, 1, 0, 0]$  и  $H=[1, 2, 3, 4, 0]$ , используя теоретико-числовое преобразование Мерсенна; представить графики последовательностей и свертки.

79. Покажите, как можно вывести формулу для оценки сложности алгоритма быстрого преобразования Хаара.

80. Найти число, удовлетворяющее следующей системе сравнений:  $\langle x \rangle_2=1$ ,  $\langle x \rangle_3=2$ ,  $\langle x \rangle_5=4$  (здесь  $\langle \cdot \rangle$  – операция вычисления модуля).

81. Используя алгоритм Евклида, найти мультипликативно обратный элемент  $N=\langle 4^{-1} \rangle_{17}$  для элемента поля  $N=4$ .

82. Используя алгоритм Евклида, найти мультипликативно обратный элемент  $N=\langle 13^{-1} \rangle_{17}$  для элемента поля  $N=13$ .

Основная литература. Лосев, В. В. Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки / В. В. Лосев. – Минск : Вышш. шк., 1990.

## 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА ИХ СПЕКТРОВ И СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В радиотехнике под случайным (стохастическим) процессом обычно понимается электрическая величина (ток, напряжение, напряженность поля и др.), изменяющаяся случайно во времени.

Для описания случайных процессов используются различные функции и характеристики. Теоретически для описания случайных процессов необходимо располагать бесконечным числом реализаций. Для стационарных эргодических процессов при определении любых статистических характеристик усреднение по множеству реализаций эквивалентно усреднению по времени одной бесконечно длинной реализации.

Непериодический сигнал, заданный на интервале  $(-\infty, \infty)$ , описывается парой преобразований Фурье, задаваемых формулами (1) и (2):

$$\dot{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(t) e^{-j\omega t} dt; \quad (1)$$

$$\dot{s}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

Спектральная плотность  $f_T(\omega)$  дискретизированного сигнала имеет вид спектра  $f(\omega)$  исходного сигнала  $s(t)$  и повторяется с периодом  $\Omega = 2\omega_{max}$ , т.е. через каждые  $N$  отсчетов по частоте.

Разложение реализаций случайного процесса общего типа в ряд Фурье недопустимо из-за непериодического характера случайной функции. В то же время интегральное преобразование Фурье к стационарному случайному процессу также неприменимо, так как подлежащие вычислению интегралы расходятся из-за невыполнения условий Дирихле.

Чтобы обойти эти трудности, вводят в рассмотрение «усеченные» реализации  $s(t)_T$ , представляющие собой конечные отрезки длиной  $T$  неограниченных во времени реализаций  $s(t)$ , после чего находят так называемый энергетический спектр

$$f(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\langle | \dot{f}(\omega) |^2 \rangle}{T}, \quad (3)$$

который получается усреднением спектра по всем реализациям.

Различие между спектром Фурье детерминированного сигнала и энергетическим спектром случайного процесса заключается в том, что последний представляет собой не точный частотный образ какого-либо колебания, а усредненную характеристику частотных свойств целого ансамбля различающихся между собой возможных реализаций случайного процесса. Этот факт, а также отсутствие в энергетическом спектре информации о фазах

спектральных компонент не позволяет восстанавливать по нему форму исходного колебания.

При моделировании временных процессов во время выполнения лабораторных работ мы будем иметь дело с детерминированными сигналами и детерминированными реализациями помех. Поэтому все характеристики будем рассматривать как характеристики детерминированных сигналов.

Для анализа прохождения сигналов через линейные цепи наряду с другими методами (дифференциальных уравнений, интеграла наложения и др.) получил распространение спектральный (операторный) метод. Данный метод основан на спектральном представлении сигнала и использовании передаточной функции цепи  $\dot{K}(w)$ .

Согласно спектральному методу анализа спектральная плотность  $f(\omega)$  сигнала  $y(t)$  на выходе четырехполюсника равна произведению спектральной плотности  $\dot{f}_s(w)$  входного сигнала  $s(t)$  на передаточную функцию  $\dot{K}(w)$ , т.е.  $\dot{f}_y(w) = \dot{f}_s(w) \dot{K}(w)$ .

Применяя обратное преобразование Фурье, определяем выходной сигнал как функцию времени:

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}_s(w) \dot{K}(w) e^{jw \cdot t} dw. \quad (5)$$

Отметим, что в методе интеграла наложения для нахождения реакции цепи  $y(\tau)$  в момент  $\tau$  при заданной импульсной характеристике цепи  $g(t)$  используется формула

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t-t) g(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) g(t-t) dt. \quad (6)$$

Импульсная характеристика  $g(t)$  и передаточная функция  $\dot{K}(w)$  связаны преобразованиями Фурье:

$$\dot{K}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{g}(t) e^{-jw \cdot t} dt; \quad (7)$$

$$\dot{g}(t) = \frac{1}{2p} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{K}(w) e^{jw \cdot t} dw, \quad (8)$$

т.е. спектральной плотностью импульсной характеристики  $g(t)$  является передаточная функция  $\dot{K}(w)$  цепи.

Переход от непрерывных времени  $t$  и частоты  $\omega$  к безразмерным дискретным  $n$  и  $k$  изложен (раздел 7.1 книги В. В. Лосева «Микропроцессорные устройства обработки информации. Алгоритмы цифровой обработки». – Минск : Высш. шк., 1990) и не представляет затруднений.

Энергию полученных реализаций будем оценивать по формуле

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |s(n)|^2 = N^{-1} \sum_{k=0}^{N-1} |f(k)|^2, \quad (9)$$

а мощность сигнала рассматривать как

$$P = E/N. \quad (10)$$

Аналогичным образом будем оценивать энергию и мощность (дисперсию) помехи (шума), что позволит находить отношение сигнал/помеха и другие характеристики.

Однако следует помнить, что полученные при выполнении лабораторной работы характеристики будут лишь грубыми оценками соответствующих статистических характеристик, для получения которых необходимо усреднение результатов, полученных при большом (достаточном для статистической оценки) количестве опытов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В кратком методическом издании нет возможности привести все необходимые сведения, которые позволили бы студенту-заочнику выполнить поставленные перед ним задания, не обращаясь к другим источникам. И в то же время, вооружившись только книгой В. В. Лосева, можно ответить на любой из поставленных в контрольных заданиях вопросов.

Старайтесь делать ответы краткими, лаконичными и по существу. Помните, что ответы должны быть аргументированными. Поэтому приводите в доказательство формулы, простейшие примеры, рисунки и др.

Не теряйте уверенности. Вы можете справиться с заданиями самостоятельно!

Учебное издание

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

по дисциплине

**ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ**  
(раздел «Цифровая обработка сигналов»)

для студентов специальностей I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций»  
и I-45 01 05 «Системы распределения мультимедийной информации»  
заочной формы обучения

Составитель  
Астровский Иван Иванович

Редактор С. Б. Саченко  
Корректор Е. Н. Батурчик

---

Подписано в печать 05.05.2007.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,0.	Тираж 100 экз.	Заказ 96.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровки, 6