

1542974

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В. И. Нефедов, А. С. Сигов

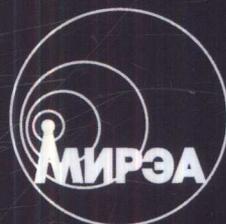
# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

Под редакцией В. И. Нефедова

УЧЕБНИК



УМО ВО рекомендует  
МО рекомендует



МОСКОВСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**Юрайт**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

**В. И. Нефедов, А. С. Сигов**

# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

**УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ**  
Под редакцией **В. И. Нефедова**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям*

*Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации в качестве учебника для магистрантов и бакалавров высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02 (210700) —  
Инфокоммуникационные технологии и системы связи*

**Книга доступна на образовательной платформе «Юрайт» [urait.ru](http://urait.ru),  
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

**Москва • Юрайт • 2021**

УДК 621.37(075.8)  
ББК 32.842я73  
Н58



Авторы:

**Нефедов Виктор Иванович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета (МИРЭА). Лауреат премии Правительства Российской Федерации, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации;

**Сигов Александр Сергеевич** — доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния Института электроники Московского технологического университета (МИРЭА). Лауреат Государственной премии и премий Правительства Российской Федерации.

**Рецензенты:**

**Бугаев А. С.** — доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заместитель директора Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, заведующий кафедрой вакуумной электроники Московского физико-технического института (государственного университета);

**Шелухин О. И.** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности и автоматизации Московского технического университета связи и информатики, заслуженный деятель науки Российской Федерации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

**Нефедов, В. И.**

Н58      Общая теория связи: учебник для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов ; под редакцией В. И. Нефедова. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 495 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-01326-9

Курс «Общая теория связи» является основной дисциплиной из плана подготовки бакалавров в области исследования и разработки телекоммуникаций. Основной целью курса является обучение студентов теории, методам и основам построения устройств модуляции, кодирования, передачи, помехоустойчивого приема и обработки сигналов, развитие навыков системного подхода к разработке и проектированию радиоаппаратуры в используемых диапазонах волн. В курсе компактно объединено огромное количество информации. Здесь кратко рассмотрены практически все аспекты теории и практики современной радиосвязи — от распространения электромагнитных волн до радиотехнического оборудования. Изложение теоретического материала сопровождается практическими расчетами и примерами построения отдельных узлов.

УДК 621.37(075.8)

ББК 32.842я73

*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.*

ISBN 978-5-534-01326-9

© Нефедов В. И., Сигов А. С., 2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2021

# Оглавление

Предисловие .....	8
Введение .....	11

## Раздел I

### ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, СЕТИ И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

<b>Глава 1. Общие сведения о сетях и системах связи .....</b>	<b>15</b>
1.1. Информация, сообщения и сигналы в системах связи .....	15
1.2. Способы построения систем и сетей связи. Эффективность систем связи.....	30
1.2.1. Понятие системы связи .....	30
1.2.2. Общие понятия о государственных сетях и системах связи .....	33
1.2.3. Эталонная модель взаимодействия открытых систем .....	36
1.2.4. Системы связи .....	39
1.2.5. Основные характеристики и параметры систем связи .....	53
1.2.6. Линии связи.....	56
1.2.7. Системы радиовещания .....	59
1.2.8. Телевизионные (телевещательные) системы.....	59
1.2.9. Мультимедийные системы .....	70
1.3. Современные системы подвижной связи.....	71
1.3.1. Системы сотовой подвижной (мобильной) связи.....	73
1.3.2. Сотовые системы подвижной связи стандарта <i>GSM</i> .....	78
1.3.3. Подвижная связь в городах.....	85
1.3.4. Системы подвижной спутниковой связи.....	90
1.3.5. Системы беспроводных телефонов.....	92
1.3.6. Системы воздушной подвижной связи .....	95
1.3.7. Глобальная информационно-компьютерная сеть Интернет.....	95
1.3.8. Технология <i>LTE</i> .....	96
1.3.9. Беспроводные сети четвертого поколения.....	98
1.3.10. Технологии <i>NGN</i> .....	102
1.3.11. Интернет-телефония.....	104
1.3.12. Волоконно-оптические линии (системы) связи .....	106
1.4. Антенные устройства систем радиосвязи.....	108
1.5. Глобальные системы связи будущего .....	112
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	117
<b>Глава 2. Детерминированные сигналы .....</b>	<b>118</b>
2.1. Общие сведения о сигналах.....	118
2.1.1. Математические модели сигналов .....	119
2.1.2. Классификация сигналов .....	119
2.1.3. Шумы и помехи в системах связи.....	124
2.1.4. Способы аналитического описания сигналов.....	127
2.1.5. Энергетические характеристики сигналов.....	131

2.2. Спектральное представление детерминированных сигналов .....	132
2.2.1. Спектральное представление периодических сигналов рядами Фурье .....	132
2.2.2. Спектральное представление непериодических сигналов с помощью преобразований Фурье .....	145
2.2.3. Спектры некоторых неинтегрируемых сигналов .....	153
2.2.4. Преобразования Хартли в спектральном анализе сигналов.....	158
2.3. Корреляционный анализ детерминированных сигналов.....	159
2.4. Методы аналоговой модуляции сигналов .....	163
2.4.1. Сигналы с аналоговой модуляцией .....	164
2.4.2. Сигналы с угловой модуляцией.....	177
2.4.3. Сигналы с линейной частотной модуляцией .....	185
2.5. Сигналы с импульсной и цифровой модуляцией.....	189
2.5.1. Импульсная модуляция .....	189
2.5.2. Квадратурная модуляция .....	196
2.5.3. Цифровая модуляция .....	199
2.5.4. Представление модулированных сигналов амплитудно-фазовыми диаграммами.....	210
2.6. Узкополосные сигналы .....	213
2.6.1. Аналитическое представление узкополосных сигналов .....	213
2.6.2. Физическая огибающая, полная фаза и мгновенная частота узкополосного сигнала .....	216
2.6.3. Аналитический сигнал и преобразования Гильберта .....	218
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	226

### **Глава 3. Случайные и шумоподобные сигналы в теории связи .....**

3.1. Общие сведения о случайных сигналах .....	228
3.1.1. Вероятностное представление случайных величин и процессов.....	230
3.1.2. Числовые характеристики (моменты) случайных процессов.....	233
3.2. Законы распределения случайных процессов .....	236
3.2.1. Нормальный закон распределения .....	236
3.2.2. Равномерный закон распределения плотности вероятности.....	238
3.2.3. Закон распределения Пуассона .....	239
3.3. Характеристическая функция случайного процесса.....	241
3.4. Стационарные случайные процессы .....	244
3.5. Спектральный и корреляционный анализ случайных процессов .....	248
3.5.1. Теорема Винера – Хинчина .....	250
3.5.2. Односторонний спектр мощности .....	251
3.5.3. Сравнение детерминированных и случайных сигналов .....	252
3.5.4. Белый шум.....	253
3.6. Узкополосные случайные процессы.....	255
3.7. Шумоподобные сигналы.....	264
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	271

## **Раздел II**

### **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И УСТРОЙСТВА**

#### **Глава 4. Линейные и параметрические цепи .....**

4.1. Методы анализа линейных цепей.....	275
4.1.1. Представление сигналов динамическими моделями .....	278
4.1.2. Методы анализа процессов в линейных цепях (системах).....	278
4.1.3. Условие физической реализуемости линейной цепи .....	287

4.1.4. Многомерные сигналы .....	288
4.2. Дифференцирование и интегрирование сигналов .....	288
4.2.1. Дифференцирующие цепи .....	288
4.2.2. Интегрирующие цепи .....	290
4.3. Резонансные цепи.....	292
4.3.1. Последовательный колебательный контур.....	292
4.3.2. Параллельный колебательный контур .....	294
4.4. Основы теории усилительной техники .....	296
4.4.1. Классификация и параметры усилителей.....	297
4.4.2. Усилители на биполярных транзисторах.....	298
4.4.3. Усилители на полевых транзисторах.....	302
4.5. Элементы теории обратной связи .....	303
4.5.1. Общие сведения об обратной связи .....	303
4.5.2. Устойчивость линейных систем (усилителей) с обратной связью.....	307
4.6. Интегральные усилители в технике связи .....	312
4.7. Электрические фильтры.....	315
4.7.1. Общие сведения об электрических фильтрах.....	315
4.7.2. Фильтры на поверхностных акустических волнах .....	321
4.7.3. Синтез электрических фильтров .....	323
4.7.4. Активные фильтры .....	325
4.8. Преобразования сигналов в параметрических цепях.....	328
4.8.1. Особенности линейно-параметрических цепей .....	328
4.8.2. Преобразование сигналов в цепи с параметрическим сопротивлением .....	329
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	333

## **Глава 5. Нелинейные цепи .....**

5.1. Аппроксимация характеристик нелинейных элементов.....	335
5.1.1. Метод аналитической аппроксимации .....	336
5.1.2. Численные (компьютерные) методы решения системы нелинейных уравнений .....	336
5.1.3. Аппроксимация степенным полиномом .....	338
5.1.4. Кусочно-линейная аппроксимация .....	340
5.2. Отклик нелинейной цепи на гармонический входной сигнал.....	341
5.2.1. Спектр тока в цепи с нелинейным элементом при степенной аппроксимации .....	342
5.2.2. Спектр тока в цепи с нелинейным элементом при кусочно-линейной аппроксимации .....	342
5.3. Спектральные методы анализа нелинейных динамических систем с групповыми сигналами .....	344
5.3.1. Интермодуляционные искажения .....	344
5.3.2. Метод гармонического баланса.....	346
5.3.3. Метод многомерных функциональных рядов Вольтерра.....	347
5.4. Нелинейные усилители мощности .....	349
5.5. Модуляция сигналов.....	350
5.5.1. Аналоговые амплитудные модуляторы.....	350
5.5.2. Угловая модуляция .....	352
5.6. Демодуляторы сигналов.....	355
5.6.1. Амплитудные детекторы.....	355
5.6.2. Детектирование сигналов с угловой модуляцией .....	359
5.6.3. Импульсные и цифровые демодуляторы .....	363
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	366

**Раздел III**  
**ЦИФРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ, ПЕРЕДАЧА,**  
**ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ**

<b>Глава 6. Дискретные и цифровые сигналы и их обработка .....</b>	<b>371</b>
6.1. Цифровое представление сигналов.....	372
6.1.1. Теорема Котельникова (теорема отсчетов) .....	374
6.1.2. Восстановление непрерывного сигнала по дискретным значениям ...	379
6.2. Дискретные сигналы и их спектры .....	382
6.3. Алгоритмы дискретного и быстрого преобразований Фурье .....	386
6.3.1. Дискретное преобразование Фурье .....	386
6.3.2. Обратное дискретное преобразование Фурье.....	388
6.3.3. Быстрое преобразование Фурье .....	389
6.4. Дискретная свертка сигналов и теория $z$ -преобразования .....	392
6.4.1. Дискретная свертка .....	392
6.4.2. Представление дискретных сигналов с помощью $z$ -преобразования .....	395
6.5. Основы теории цифровой фильтрации.....	397
6.5.1. Цифровая фильтрация сигналов .....	397
6.5.2. Цифровые фильтры.....	399
6.5.3. Структурные схемы линейных цифровых фильтров.....	401
6.5.4. Устойчивость цифровых фильтров .....	405
6.5.5. Канонические схемы рекурсивных фильтров.....	407
6.5.6. Транспонированная форма цифровых фильтров.....	409
6.5.7. Частотные характеристики цифровых фильтров.....	411
6.6. Синтез цифровых фильтров.....	415
6.7. Квантование сигналов .....	420
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>422</i>
<b>Глава 7. Устройства передачи и помехоустойчивого приема сообщений .....</b>	<b>424</b>
7.1. Радиопередающие устройства .....	424
7.1.1. Общие сведения о радиопередающих устройствах.....	424
7.1.2. Передатчик с амплитудной модуляцией .....	429
7.1.3. Передатчик с частотной модуляцией.....	429
7.1.4. Синтезаторы частоты.....	430
7.1.5. Тенденции развития радиопередающих устройств .....	431
7.2. Радиоприемные устройства.....	433
7.2.1. Общие сведения о радиоприемных устройствах .....	433
7.2.2. Приемник прямого усиления.....	437
7.2.3. Супергетеродинный приемник.....	438
7.2.4. Автоматические устройства управления и регулировки приемника .....	441
7.2.5. Тенденции развития радиоприемных устройств.....	445
7.3. Оптимальная линейная фильтрация сигналов.....	446
7.3.1. Оптимальный (согласованный) линейный фильтр.....	446
7.3.2. Реализация согласованных фильтров.....	454
7.3.3. Скрытая передача сигналов при оптимальной фильтрации .....	456
7.4. Элементы теории помехоустойчивого приема .....	456
7.4.1. Информационные параметры системы связи.....	458
7.4.2. Оценка количества информации, содержащейся в сообщении.....	459
7.4.3. Оценка пропускной способности канала связи с шумами.....	466
7.5. Кодирование сообщений в системах связи .....	468
7.5.1. Системы счислений .....	469

7.5.2. Коды .....	469
7.5.3. Классификация основных методов кодирования и кодов .....	471
7.5.4. Параметры помехоустойчивых кодов .....	476
7.5.5. Линейный и нелинейный коды .....	479
7.5.6. Классы помехоустойчивых кодов .....	480
7.6. Модемные устройства систем связи .....	486
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	492

<b>Заключение</b> .....	<b>494</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>495</b>

# ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

УЧЕБНИК

## **НЕФЕДОВ Виктор Иванович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета (МИРЭА). Лауреат премии Правительства Российской Федерации, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации.

## **СИГОВ Александр Сергеевич**

доктор физико-математических наук, профессор, академик Российской академии наук, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния Института электроники Московского технологического университета (МИРЭА). Лауреат Государственной премии и премий Правительства Российской Федерации.

Курс «Общая теория связи» является основной дисциплиной из плана подготовки бакалавров в области исследования и разработки телекоммуникаций. Основной целью курса является обучение студентов теории, методам и основам построения устройств модуляции, кодирования, передачи, помехоустойчивого приема и обработки сигналов, развитие навыков системного подхода к разработке и проектированию радиоаппаратуры в используемых диапазонах волн.

В учебнике компактно объединено огромное количество информации. Здесь кратко рассмотрены практически все аспекты теории и практики современной радиосвязи – от распространения электромагнитных волн до радиотехнического оборудования. Изложение теоретического материала сопровождается практическими расчетами и примерами построения отдельных узлов. Книга иллюстрирована большим числом рисунков и схем.



urait.ru

ISBN 978-5-534-01326-9



9 785534 013269