

УДК 621.372(075.8)+621.391(078.8)

ББК 32.84я73+32.811я73

Ф338

*Печатается по решению кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета (протокол №7 от 13 февраля 2017 г.)*

# **Рецензенты:**

зав. кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор *Н. Н. Прокопенко*

декан факультета радиотехники и телекоммуникаций Рязанского государственного радиотехнического университета, доктор техн. наук, доцент *Б. И. Филимонов*

зав. кафедрой радиотехнических систем Рязанского государственного радиотехнического университета, доктор техн. наук, профессор *Ю. Н. Паршин*

## **Федосов, В. П.**

Ф338 Радиотехнические цепи и сигналы : учебное пособие / В. П. Федосов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 282 с.

ISBN 978-5-9275-2481-5

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения курса «Радиотехнические цепи и сигналы» (РТЦиС), который является базовым для радиотехнических специальностей и направлений, содержит избранные разделы и снабжено решениями многочисленных примеров и задач, позволяющих получить практические навыки их решения при изучении курса. Основные понятия и определения представлены конспективно. Приведены многочисленные рисунки и результаты моделирования в LabVIEW и Multisim.

УДК 621.372(075.8)+621.391(078.8)

ББК 32.84я73+32.811я73

ISBN 978-5-9275-2481-5

© Южный федеральный университет, 2017

© Федосов В. П., 2017

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2017

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СИГНАЛОВ .....	3
1.1. Основные радиотехнические процессы .....	3
1.2. Классификация сигналов .....	4
1.3. Классификация сигналов по их области определения .....	6
1.4. Классификация сигналов по множеству значений .....	6
1.5. Математическое описание континуальных сигналов .....	7
1.6. Основные понятия о пространствах сигналов .....	8
1.7. Линейное пространство .....	8
1.8. Метрическое пространство .....	9
1.9. Нормированное пространство .....	11
1.10. Представление произвольного сигнала из пространства $L_2(a, b)$ в виде разложения по заданной базисной системе функций .....	12
1.11. Определение коэффициентов $C_n$ .....	12
1.12. Применение обобщенных рядов Фурье к задачам, связанным с анализом и синтезом сигналов .....	14
1.13. Синтез сигналов на основе обобщенных рядов Фурье .....	17
1.14. Ряд Фурье. Гармонический анализ сигналов из пространства $L_2(a, b)$ .....	17
1.15. Синтез сигналов на основе рядов Фурье .....	21
1.16. Гармонический анализ периодических сигналов .....	24
1.17. Расчет спектра .....	27
1.18. Общая формулировка задачи анализа прохождения сигнала через линейные цепи .....	30
1.19. Краткая характеристика методов .....	30
1.20. Применение ортогональных разложений сигналов к анализу их прохождения через линейные цепи .....	33
1.21. Прохождение периодических сигналов через линейные электрические цепи .....	35
1.22. Гармонический анализ непериодических сигналов .....	38
1.23. Спектральная плотность непериодического сигнала ...	40

1.24. Распространение преобразования Фурье на пространство $L_2(-\infty, \infty)$ .....	44
1.25. Основные свойства преобразования Фурье (теоремы о спектрах) .....	45
1.26. Замечания о неоднозначности преобразования Фурье .....	49
1.27. Применение преобразования Фурье к анализу прохождения сигналов с ограниченной энергией через линейные цепи с постоянными параметрами (спектральный метод анализа).....	50
1.28. Применение символического метода к описанию сигналов в комплексной форме .....	51
1.29. Обобщение символического метода на случай негармонических сигналов.....	52
1.30. Геометрическая интерпретация комплексного сигнала .....	52
1.31. Аналитический сигнал (комплексный гильбертовский сигнал).....	53
1.32. Основные свойства аналитического сигнала .....	54
1.33. Введение преобразования Гильберта во временной области .....	55
1.34. Распространение преобразования Гильберта на периодические и почти периодические сигналы .....	57
1.35. Узкополосные сигналы.....	59
Вопросы для самоконтроля .....	61
2. РАДИОСИГНАЛЫ (МОДУЛИРОВАННЫЕ КОЛЕБАНИЯ) .....	65
2.1. Амплитудно-модулированные колебания .....	67
Вопросы для самоконтроля .....	72
3. КОЛЕБАНИЯ С УГЛОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ .....	74
3.1. Общий подход к вычислению спектра колебания с угловой модуляцией.....	74
3.2. Спектр колебания с угловой модуляцией при тональном модулирующем сигнале .....	74
3.3. Спектр колебания с угловой модуляцией при $m \ll 1$ ....	76

3.4. Спектр колебания с тональной угловой модуляцией при произвольной величине индекса модуляции.....	77
3.5. Практическая ширина спектра колебания с угловой модуляцией .....	77
3.6. Сравнение спектров ЧМК и ФМК при тональной модуляции .....	79
Вопросы для самоконтроля .....	81
4. ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ЛИНЕЙНЫЕ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ .....	84
4.1. О построении приближенных методов анализа прохождения сигналов через избирательные цепи .....	85
4.2. Приближенный метод интеграла свертки (метод огибающих).....	85
4.3. Приближенный спектральный метод анализа прохождения радиосигналов через избирательные цепи .....	87
4.4. Прохождение АМК через колебательный контур .....	92
4.5. Прохождение ЧМК через колебательные цепи.....	96
Вопросы для самоконтроля .....	98
5. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ С КОНЕЧНОЙ ЭНЕРГИЕЙ .....	99
5.1. Энергия сигнала .....	99
5.2. Спектральная плотность энергии сигнала .....	101
5.3. Взаимная корреляционная функция сигналов с конечной энергией .....	103
5.4. Взаимная спектральная плотность энергии.....	103
Вопросы для самоконтроля .....	105
6. АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ	106
6.1. Параметрический метод получения АМК .....	106
6.2. Нелинейный способ получения АМК .....	107
6.3. Расчет статической модуляционной характеристики при амплитудной модуляции смещением.....	111
Вопросы для самоконтроля .....	115
7. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АМК .....	116
7.1. Амплитудное детектирование в параметрической цепи (синхронный детектор).....	117

7.2. Амплитудное детектирование в нелинейной цепи .....	118
7.3. Последовательный диодный детектор .....	119
7.4. Характеристика детектирования и коэффициент передачи последовательного диодного детектора.....	121
7.5. Искажения при амплитудном детектировании .....	123
Вопросы для самоконтроля .....	123
8. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧМК .....	125
8.1. Частотное детектирование на основе преобразования ЧМК в АМК и в амплитудном детектировании.....	125
8.2. Частотный детектор с настроенными контурами .....	128
8.3. Частотный детектор, основанный на преобразовании ЧМК в ФМК и фазовом детектировании .....	131
Вопросы для самоконтроля .....	133
9. ПОЛУЧЕНИЕ ЧМК.....	134
9.1. Два метода получения ЧМК.....	134
9.2. Непосредственный метод получения ЧМК .....	135
9.3. Связь между относительными изменениями емкости контура и относительными изменениями его резонансной частоты.....	136
Вопросы для самоконтроля .....	138
10. LC-ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ...	140
10.1. LC-автогенераторы с внешней обратной связью .....	140
10.2. LC-автогенератор с контуром в цепи коллектора.....	142
10.3. Установившийся режим LC-автогенератора с контуром в цепи коллектора .....	145
10.4. Мягкий и жесткий режимы генерации автогенератора.....	146
10.5. Определение границы между мягким и жестким режимами самовозбуждения .....	149
10.6. Автогенератор с контуром в цепи коллектора и автоматическим смещением за счет тока базы .....	151
10.7. Прерывистая генерация в автогенераторе с контуром в цепи коллектора и с автосмещением .....	152
10.8. Схемы автогенераторов .....	153
10.9. Автогенератор с внутренней обратной связью .....	155

10.10. Схема LC-автогенератора на туннельном диоде.....	156
10.11. Установившийся режим автогенератора на туннельном диоде.....	157
Вопросы для самоконтроля.....	159
11. RC-АВТОГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ .....	160
11.1. Схемы RC-автогенераторов .....	160
11.2. Способы улучшения формы колебаний в RC- автогенераторе.....	162
Вопросы для самоконтроля .....	163
12. СЛУЧАЙНЫЕ СИГНАЛЫ.....	165
12.1. Наиболее употребимые в радиотехнике плотности вероятности и их числовые характеристики .....	168
12.2. Двумерная плотность вероятности и связанные с ней числовые характеристики случайного сигнала .....	170
12.3. Классификация случайных процессов .....	172
12.4. Корреляционная функция и спектральная плотность мощности стационарного случайного процесса .....	174
12.5. Мощность источника стационарного СП и ее связь с корреляционной функцией и спектральной плотностью мощности .....	176
12.6. Энергетическая ширина спектра случайного сигнала и интервал корреляции .....	177
12.7. Взаимная корреляционная функция и взаимная спектральная плотность мощности .....	179
12.8. Узкополосные случайные сигналы.....	180
12.9. Белый шум .....	181
12.10. Прохождение случайных процессов через линейные электрические цепи .....	182
12.11. Расчет плотности вероятности стационарного случайного сигнала на выходе линейной цепи .....	188
12.12. Прохождение нормального стационарного СП через линейную электрическую цепь .....	189

12.13. Нормализация случайных сигналов в узкополосных электрических цепях.....	196
12.14. Нелинейные безынерционные преобразования случайных сигналов.....	199
12.15. Корреляционная функция и спектральная плотность мощности сигнала на выходе нелинейного безынерционного элемента цепи .....	205
12.16. Прохождение узкополосного случайного нормального сигнала через амплитудный детектор с линейной характеристикой детектирования .....	211
12.17. Прохождение узкополосного нормального случайного сигнала через амплитудный детектор с квадратичной характеристикой детектирования .....	212
12.18. Совместное воздействие гармонического сигнала и нормального (Гауссова) шума на амплитудный детектор.....	213
Вопросы для самоконтроля.....	215
13. ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ.....	219
13.1. Обобщенная структура цифрового фильтра.....	219
13.2. Трансверсальный фильтр .....	220
13.3. Рекурсивный фильтр.....	221
13.4. Передаточные функции цифровых фильтров .....	222
13.5. Алгоритм работы рекурсивного фильтра .....	223
13.6. Каноническая схема рекурсивного фильтра.....	224
13.7. Z-преобразование передаточной функции .....	224
13.8. Свойства z-преобразования.....	225
13.9. Область сходимости для z-преобразования.....	227
13.10. Обратное z-преобразование .....	228
13.11. Синтез цифровых фильтров .....	231
13.12. Способ синтеза на основе использования z-преобразования комплексной передаточной функции.....	231
Вопросы для самоконтроля.....	236
14. ОПТИМАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ.....	237
14.1. Постановка задачи оптимальной фильтрации.....	237

## Оглавление

---

14.2. Оптимальный фильтр, согласованный с заданным сигналом при белом шуме на входе цепи .....	240
14.3. Импульсная характеристика согласованного фильтра.....	241
14.4. Выходной сигнал согласованного фильтра .....	242
14.5. Помеха на выходе согласованного фильтра .....	243
14.6. Примеры синтеза согласованных фильтров .....	244
Вопросы для самоконтроля .....	258
15. ЭЛЕМЕНТЫ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ .....	260
15.1. Преобразование формы сигнала .....	261
15.2. Оптимальная фильтрация сигнала при небелом шуме .....	262
15.3. Задача фильтрации с максимальным сохранением формы сигнала .....	265
15.4. Цифровой согласованный фильтр .....	272
Вопросы для самоконтроля .....	273
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	274
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	274