

А. И. Астайкин, А. П. Помазков

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Том 2



**ФГУП  
«Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ»**

***А. И. Астайкин, А. П. Помазков***

# **РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ**

Учебное пособие

**В 2 томах**

Том 2

Под редакцией доктора технических наук, профессора,  
заслуженного деятеля науки РФ А. И. Астайкина

Саров  
2010

ББК 32.841  
А 91  
УДК 621.396.1

**Астайкин А. И., Помазков А. П.** Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие. В 2 томах. Том 2. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010, 360 с.

ISBN 978-5-9515-0147-9

Рассмотрено прохождение детерминированных сигналов через линейные цепи с известными частотно-фазовыми характеристиками: дифференцирующие и интегрирующие, частотно-избирательные цепи, колебательные контуры, резонансные усилители. Приведены методы расчета случайных сигналов при прохождении частотно-избирательных цепей. Проведен анализ преобразования сигналов в нелинейных и параметрических цепях, таких как умножители частоты, модуляторы, детекторы и параметрические усилители. Рассмотрена работа автогенераторов и устойчивость их характеристик. Сформулированы принципы дискретной и цифровой обработки сигналов, законы построения цифровых фильтров. Освещена теория оптимальной линейной фильтрации, проведено сравнение помехоустойчивости систем с амплитудой и частотной модуляцией.

Предназначается для студентов, инженеров и аспирантов радиотехнических специальностей.

#### **Рецензенты:**

доктор физико-математических наук В. А. Терехин, РФЯЦ-ВНИИЭФ;  
доктор физико-математических наук, профессор, декан радиофизического факультета ННГУ им. Н. И. Лобачевского А. В. Якимов

ISBN 978-5-9515-0147-9

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010

# Содержание

Список сокращений, обозначений и символов . . . . .	6
<b>8. Прохождение детерминированных сигналов через линейные стационарные частотно-избирательные цепи . . .</b>	<b>10</b>
8.1. Дифференцирование и интегрирование сигналов . . . . .	10
8.2. Частотно-избирательные цепи . . . . .	20
8.3. Частотные характеристики цепей с одним энергоемким элементом . . . . .	25
8.4. Частотные характеристики колебательных контуров . . .	29
8.5. Частотные характеристики цепей с активными элементами. . . . .	40
8.6. Частотно-избирательные цепи при широкополосных и узкополосных входных воздействиях . . . . .	43
8.7. Прохождение гармонического сигнала через резонансный усилитель . . . . .	53
8.8. Прохождение радиоимпульса через резонансный усилитель . . . . .	60
8.9. Прохождение модулированных сигналов через узкополосные цепи . . . . .	65
8.10. Роль фазовой характеристики . . . . .	82
Контрольные вопросы . . . . .	84
<b>9. Воздействие случайных сигналов на линейные стационарные системы . . . . .</b>	<b>86</b>
9.1. Задачи расчета случайных выходных сигналов . . . . .	86
9.2. Спектральный метод анализа сигналов . . . . .	89
9.3. Метод импульсной характеристики . . . . .	93
9.4. Прохождение широкополосных случайных сигналов через узкополосные линейные цепи . . . . .	96
9.5. Воздействие белого шума на дифференцирующие и интегрирующие цепи . . . . .	101
9.6. Воздействие белого шума на последовательный колебательный контур . . . . .	104
9.7. Нормализация случайного сигнала на выходе линейных систем . . . . .	106

9.8. Источники шумов в радиотехнических устройствах . . .	108
Контрольные вопросы . . . . .	121
<b>10. Преобразование сигналов в нелинейных безынерционных цепях . . . . .</b>	<b>122</b>
10.1. Нелинейные элементы и их характеристики . . . . .	122
10.2. Спектральный состав тока на выходе НЭ при внешнем гармоническом воздействии . . . . .	129
10.3. Нелинейные преобразования суммы двух гармонических сигналов . . . . .	139
10.4. Нелинейные резонансные усилители и умножители частоты . . . . .	143
10.5. Реализация амплитудной модуляции . . . . .	150
10.6. Преобразование частоты . . . . .	152
10.7. Детектирование АМК . . . . .	155
10.8. Детектирование колебаний с угловой модуляцией . . .	167
10.9. Преобразование случайных сигналов в безынерционных нелинейных цепях . . . . .	170
10.10. Преобразование спектра узкополосного случайного процесса в безынерционном НЭ . . . . .	173
Контрольные вопросы . . . . .	176
<b>11. Преобразование сигналов в линейных параметрических цепях . . . . .</b>	<b>177</b>
11.1. Общая характеристика цепей с переменными параметрами . . . . .	177
11.2. Спектр сигнала на выходе резистивного параметрического элемента . . . . .	183
11.3. Преобразование сигналов на резистивных параметрических элементах . . . . .	188
11.4. Параметрическое усиление сигналов . . . . .	199
11.5. Воздействие гармонических сигналов на параметрические системы со случайными характеристиками . . . . .	222
Контрольные вопросы . . . . .	227
<b>12. Цепи с обратной связью и автоколебательные системы . . . . .</b>	<b>228</b>
12.1. Обратные связи в радиотехнических цепях . . . . .	228

12.2. Действие обратной связи на систему . . . . .	232
12.3. Устойчивость систем с обратной связью . . . . .	241
12.4. Автогенераторы гармонических колебаний . . . . .	248
12.5. Автогенераторы в режиме больших сигналов . . . . .	260
12.6. RC-автогенераторы низкочастотных гармонических колебаний . . . . .	274
12.7. Обобщенные схемы АГ с отрицательной активной проводимостью и стабилизацией частоты высокодобротным резонатором . . . . .	278
Контрольные вопросы . . . . .	289
<b>13. Дискретная и цифровая обработка сигналов . . . . .</b>	<b>290</b>
13.1. Принципы дискретной и цифровой обработки . . . . .	290
13.2. Преобразования аналог-цифра и цифра-аналог . . . . .	291
13.3. Действия над дискретными сигналами . . . . .	293
13.4. Цифровые фильтры . . . . .	299
13.5. Реализация алгоритмов цифровой фильтрации . . . . .	302
13.6. Методы синтеза линейных цифровых фильтров . . . . .	306
13.7. Дискретные случайные сигналы и их влияние на работу ЦФ . . . . .	308
Контрольные вопросы . . . . .	309
<b>14. Основы оптимальной фильтрации сигналов . . . . .</b>	<b>311</b>
14.1. Постановка задачи оптимальной линейной фильтрации . . . . .	311
14.2. Отношение сигнал/шум на входе и выходе линейного стационарного фильтра . . . . .	317
14.3. Передаточная функция оптимального фильтра . . . . .	322
14.4. Импульсная характеристика согласованного фильтра . . . . .	327
14.5. Примеры построения согласованных фильтров для сигналов различной формы . . . . .	335
14.6. Фильтрация сигнала при небелом шуме . . . . .	343
14.7. Оптимальная фильтрация случайных сигналов . . . . .	345
14.8. Помехоустойчивость систем с амплитудной и частотной модуляцией . . . . .	350
Контрольные вопросы . . . . .	357
Список литературы . . . . .	359

На выходе ЧД СПМ будет равна:

$$F_{m2}(\omega) = \frac{2\sigma_{n1}^2}{\Pi_{\text{практ}}} \frac{\omega^2}{A_{mc}^2}.$$

Так как на выходе ЧД стоит ФНЧ с частотой среза  $\Omega_{\text{ср}} = \Omega_{\text{в}}$ , то средняя переменная мощность помехи  $2\sigma_{n1}^2$  на выходе ЧД равна:

$$2\sigma_{n2}^2 = \int_0^{\Omega_{\text{в}}} F_{n2}(\omega) d\omega = \frac{2\sigma_{n1}^2 \Omega_{\text{в}}^3}{3\Pi_{\text{практ}} A_{mc}^2}.$$

Так как  $Q_1 = A_{mc}^2 / 2\sigma_{n1}$ , то

$$Q_2 = Q_1 \frac{3}{2} \frac{(\Delta\omega_{\text{max}})^2}{\Omega_{\text{в}}^3} \Pi_{\text{практ}} = \frac{3}{2} Q_1 \frac{(\Delta\omega)^2}{\Omega_{\text{в}}^3} 2(m+1)\Omega_{\text{в}},$$

так как  $\Pi_{\text{практ}} = 2(m+1)\Omega$ .

Коэффициент выигрыша ЧД  $M_{\text{чм}}$  равен:

$$M_{\text{чм}} = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{3}{2} \frac{(\Delta\omega_{\text{max}})^2}{\Omega_{\text{в}}^3} \Pi_{\text{практ}} = \frac{3}{2} \frac{2(m+1)\Omega_{\text{в}}}{\Omega_{\text{в}}^3} (m\Omega_{\text{в}}) = 3m^2(m+1);$$

$$M_{\text{чм}} \approx 3m^2(m+1),$$

т. е. выигрыш  $M_{\text{чм}}$  зависит от индекса угловой модуляции. Если

$$\Delta\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{д}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}, \quad \Omega = 10^4 \text{ с}^{-1}, \quad m = 15, \quad m = \frac{\omega_{\text{д}}}{\Omega} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{10^4} = 15,$$

тогда  $M_{\text{чм}} = 3m^2(m+1) = 3 \cdot 15^2 \cdot 16 = 10800$ .

Таким образом, если амплитуда полезного сигнала значительно превышает эффективное напряжение шума, то помехоустойчивость ЧМ значительно лучше, чем АМ.

## Контрольные вопросы

1. В чем заключается проблема помехоустойчивости канала связи?
2. Каковы общие характеристики сигналов и помех?

3. Сформулируйте основные положения теории оптимального приема.
4. В чем состоят задачи оптимальной фильтрации сигналов?
5. Что такое отношение сигнал/шум на входе и выходе приемника?
6. Как отличается отношение сигнал/шум на входе и выходе приемника?
7. Чем определяется отношение сигнал/шум на входе и выходе приемника?
8. Как определяется оптимальный (согласованный) фильтр?
9. Как определяется передаточная функция оптимального (согласованного) фильтра?
10. Как определяется импульсная характеристика оптимального фильтра?
11. Сформулируйте условия физической реализуемости оптимального (согласованного) фильтра.
12. Как осуществляется согласованная фильтрация при небелом шуме?
13. Определите помехоустойчивость сигналов с АМ.
14. Определите помехоустойчивость сигналов с ЧМ.
15. В чем причина высокой помехоустойчивости сигналов с ЧМ?



## Список литературы

1. Астайкин А. И. Основы теории цепей: Учебник в двух томах/ А. И. Астайкин, А. П. Помазков – М.: ОИЦ Академия, 2009.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2000.
3. Башарин С. А. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля: Учебное пособие. М.: ОИЦ Академия, 2004.
4. Васильев В. П. Основы теории и расчета цифровых фильтров/ Под ред. С. М. Смольского: Учебное пособие. – М.: ОИЦ Академия, 2007.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учебник. 10-е изд. М.: ОИЦ Академия, 2005.
6. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: Учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ОИЦ Академия, 2003.
7. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебное пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп./И. С. Гоноровский, М. П. Демин. М.: Радио и связь, 1994.
8. Каганов В. И. Радиотехника: Учебное пособие. М.: ОИЦ Академия, 2006.
9. Каганов В. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. М.: ОИЦ Академия, 2003.
10. Румянцев К. Е. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. М.: ОИЦ Академия, 2005.

**Анатолий Иванович Астайкин,  
Алексей Петрович Помазков**

**Радиотехнические цепи и сигналы**

Учебное пособие

В 2 томах

Том 2

Редактор *Н. П. Мишкина*

Корректор *Н. Ю. Костюничева*

Компьютерная подготовка оригинала-макета

*Н. В. Мишкина*

---

Подписано в печать 11.06.2010. Формат 60×90/16  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,5 Уч. -изд. л. 19,8  
Тираж 300 экз. Зак. тип. 734-2010.

---

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл.