

А. И. Астайкин, А. П. Помазков

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Том 1



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

А. И. Астайкин, А. П. Помазков

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Учебное пособие

В 2 томах

Том 1

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 1. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2010, 344 с.

ISBN 978-5-9515-0142-4

Изложены основы общей теории детерминированных сигналов с помощью динамического и геометрического методов представления сигналов. Показаны принципы использования ортогональных систем базисных функций. Обоснованы математические методы анализа сигналов – спектральный, корреляционный, операторный, суперпозиционный, классический. Рассмотрены свойства модулированных и случайных сигналов. Даны методы анализа детерминированных сигналов, преобразованных линейными стационарными системами.

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

Содержание

Список сокращений, обозначений и символов	5
Введение	9
1. Основы общей теории детерминированных сигналов	12
1.1. Радиотехнические сигналы	12
1.2. Принципы динамического представления сигналов	17
1.3. Геометрические методы в теории сигналов	26
1.4. Представление сигналов с помощью ортogonalных систем базисных функций	30
Контрольные вопросы	34
2. Спектральный анализ детерминированных сигналов	35
2.1. Спектральное представление сигналов	35
2.2. Спектральное представление непериодических сигналов	45
2.3. Основные свойства преобразований Фурье	48
2.4. Связь между спектрами одиночных сигналов, их пачек и периодических последовательностей	54
2.5. Спектры неинтегрируемых сигналов	64
2.6. Представление сигналов на комплексной плоскости. Преобразование Лапласа	80
2.7. Вейвлет-преобразование сигналов	87
Контрольные вопросы	89
3. Корреляционный анализ детерминированных сигналов	90
3.1. Автокорреляционная функция	91
3.2. Взаимная корреляционная функция	102
3.3. Связь корреляционных функций с энергетическими спектрами	106
3.4. Корреляционная функция дискретного сигнала. Коды Баркера	115
Контрольные вопросы	117
4. Модулированные сигналы	118
4.1. Понятие несущей частоты и модуляции	118
4.2. Виды модуляции	120

4.3. Амплитудно-модулированные сигналы	122
4.4. Сигналы с угловой модуляцией	136
4.5. Сигналы с внутриимпульсной модуляцией	149
4.6. Сигналы с полярной модуляцией	156
Контрольные вопросы	158
5. Сигналы с ограниченным спектром	159
5.1. Дискретизация непрерывных сигналов	159
5.2. Теорема Котельникова	163
5.3. Узкополосные сигналы	172
5.4. Аналитический сигнал	184
5.5. Теорема Котельникова для узкополосного сигнала . .	191
Контрольные вопросы	195
6. Основы теории случайных сигналов	196
6.1. Случайные величины и их характеристики	196
6.2. Случайные процессы	227
6.3. Основы корреляционной теории стационарных случайных процессов	238
6.4. Узкополосные стационарные случайные процессы . .	255
Контрольные вопросы	272
7. Преобразование детерминированных сигналов в линейных стационарных системах. Методы расчета	
7.1. Радиотехническая система и ее математическая модель	273
7.2. Системные операторы	276
7.3. Классический метод	279
7.4. Временные суперпозиционные методы	292
7.5. Спектральный метод	311
7.6. Операторный метод	331
Контрольные вопросы	342
Список литературы	343

тур, образованный добавлением дуги $AB_1C_1D_1N$ бесконечно большого радиуса $R \rightarrow \infty$ рис. 7.32,б к прямой NA $\sigma = \sigma_1$ (к прямой $[C - j\infty, C + j\infty]$), можно произвольно деформировать при соблюдении только одного условия, что все полюсы, расположенные левее прямой NA $\sigma = \sigma_1$, остаются внутри деформированного контура, и вычисление интегралов сводится к вычислению вычетов в полюсах подынтегральной функции и к их суммированию. Если же подынтегральная функция не имеет полюсов внутри замкнутого контура интегрирования, как $F_2(p)$ правее прямой NA $\sigma = \sigma_1$ на рис. 7.32,б, то интеграл вида по этому контуру равен нулю.

Для вычисления вычетов в полюсах подынтегральную функцию $F_2(p)$ представляют в виде дробно-рациональной функции

$$F_2(p) = \frac{N(p)}{M(p)},$$

где $N(p)$ и $M(p)$ – полиномы по степеням p .

Затем $M(p)$ разбивают на простейшие множители, в которых легко просматриваются корни p_1, p_2, \dots, p_m . Пусть $F_2(p)$ имеет в точке p_1 простой полюс (полюс первой кратности). Тогда вычет $\text{res } p_1$ в этой точке равен

$$\text{res } p_1 = \frac{N(p)_{p=p_1}}{\left. \frac{dM(p)}{dp} \right|_{p=p_1}} = \frac{N(p_1)}{\left. \frac{dM(p)}{dp} \right|_{p=p_1}}.$$

Для полюса в точке p_2 с кратностью m , p – целое, $m > 0$:

$$\text{res } p_2 = \frac{1}{(m-1)!} \frac{d^{m-1}}{dp^{m-1}} \left[\frac{N(p)}{M(p)} (p-p_2)^m \right]_{p=p_2}.$$

Связь между элементарными сигналами. Во временной области

$$\delta(t) = \frac{d\sigma(t)}{dt} \quad \text{и} \quad \delta(t-t_0) = \frac{d\sigma(t-t_0)}{dt},$$

т. е. во временной области связь между $\delta(t)$ и $\sigma(t)$ дифференциальная.

Обратное преобразование Фурье для δ -функции

$$\delta(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega;$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_{\sigma}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \right| = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega t}}{\omega} d\omega;$$

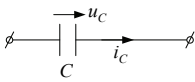
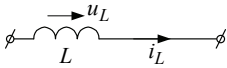
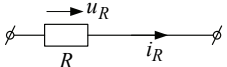
$$\sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}; \quad \cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2};$$

$$e^{\pm j\omega t} = \cos \omega t \pm j \sin \omega t;$$

$$\text{chpt} = \frac{e^{pt} - e^{-pt}}{2}; \quad \text{shpt} = \frac{e^{pt} - e^{-pt}}{2}.$$

Операторные соотношения для пассивных элементов

Таблица 7.1

Элемент цепи	Интегро-дифференциальные соотношения	Операторные соотношения
	$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt};$ $u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt$	$I_C(p) = pCU_C(p) - CU(0);$ $U_C(p) = \frac{U_C(0)}{p} + \frac{I_C(p)}{pC}$
	$i_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt};$ $i_L(t) = i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t i_L(t) dt$	$U_L(p) = pLI(p) - LI(0);$ $I_L(p) = \frac{I_L(0)}{p} + \frac{U_L(p)}{pL}$
	$u_R(t) = Ri_R(t);$ $i_R(t) = \frac{u_R(t)}{R}$	$u_R(p) = RI(p);$ $I(p) = \frac{U_R(p)}{R}$

Сопоставление четырех методов. В табл. 7.2 приведено сопоставление четырех методов – переходной $g(t)$ и импульсной $h(t)$ характеристик, спектрального и операторного. Во всех методах

надлежащая характеристика цепи (ПХ $g(t)$, ИХ $h(t)$, ЧКП $K(j\omega)$ и $K(p)$) численно выражает реакцию цепи на воздействие элементарного входного сигнала (столбец 1 табл. 7.2), а точнее – отношение выходного отклика $s_2(t)$ к этому входному элементарному сигналу. Отклик цепи $s_2(t)$ в 3-м столбце есть результат математического суммирования всех откликов на воздействие всех элементарных сигналов столбца 1; каждая подынтегральная функция в 3-м столбце – это отклик на элементарный сигнал воздействия 1-го столбца.

Таблица 7.2

Стандартный входной сигнал	Характеристика цепи (системный оператор)	Отклик цепи $s_2(t)$
Единичная функция включения $\sigma(t)$	Переходная характеристика (ПХ) $g(t)$	Интеграл Дюамеля $s_2(t) = g(0)s_1(t) + \int_0^t \frac{ds_1(\tau)}{d\tau} g(t-\tau) d\tau$
δ -функция $\delta(t)$	Импульсная переходная характеристика (ИХ) $h(t)$	Интеграл Дюамеля $s_2(t) = \int_0^t s_1(\tau) h(t-\tau) d\tau$
Единичный гармонический сигнал $e^{j\omega t}$	Комплексный ЧКП $K(j\omega)$	Обратное преобразование Фурье $s_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_1(j\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$
Единичный экспоненциальный сигнал $e^{pt} \sigma(t)$	Передаточная функция $K(p) = K(j\omega) _{p=j\omega}$	Обратное преобразование Лапласа $s_2(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} F_1(p) K(p) e^{pt} dp$

Связь между различными характеристиками цепи. Каждая характеристика цепи выражает численно реакцию цепи на воздействие единичного элементарного сигнала. В этом отношении характеристика цепи, как отклик на элементарное воздействие единичной амплитуды, представляет собой «следствие» явления воздействия, «причиной» этого следствия и является входной элементарный сигнал. Можно поэтому ожидать, что «следствия» на воздействие различных элементарных сигналов, т.е. различные характеристики цепи, находятся между собой в таких же отношениях, как и их причины – элементарные сигналы.

$$K(j\omega) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-j\omega t} dt; \quad h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

$$K(p) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-pt} dt; \quad h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{C-j\infty}^{C+j\infty} K(p) e^{pt} dp.$$

Контрольные вопросы

1. Как определяют радиотехническую систему и ее математическую модель?
2. Для чего нужна математическая модель системы?
3. Как классифицируют системы?
4. Что представляет собой динамическая система?
5. Что представляет собой системный оператор? Перечислите их виды?
6. Как определяются временные характеристики системы?
7. Как определяются частотные характеристики системы?
8. Как определяются операторные характеристики системы?
9. Перечислите методы расчета отклика цепи на входное воздействие?
10. В чем заключается сущность классического метода?
11. Проведите решение дифференциального уравнения.
12. Что понимают под устойчивостью систем?
13. Перечислите недостатки классического метода.
14. В чем состоит сущность временных суперпозиционных методов?
15. Что такое импульсная характеристика (ИХ) цепи?
16. Что такое переходная характеристика (ПХ) цепи?
17. Как определяют отклик цепи с помощью ИХ и ПХ?
18. В чем состоит сущность спектрального метода?
19. Как определяется частотный коэффициент передачи (ЧКП)?
20. Сформулируйте условия реализуемости ЧКП.
21. Что представляют собой частотные характеристики цепи?
22. Что такое нуль-полосное представление ЧКП?
23. Сформулируйте порядок расчета цепей спектральным методом.
24. В чем заключается сущность спектрального метода?
25. Как определяют операторный коэффициент передачи?
26. Что представляют собой формулы обращения?
27. Сделайте сравнение четырех методов расчета.

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. Смольского С. М.: 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 1

Редактор *Н. П. Мишкина*

Компьютерная подготовка оригинала-макета

Н. В. Мишкина

Подписано в печать 14.04.2010. Формат 60×90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,1 Уч. -изд. л. 19,5
Тираж 300 экз. Зак. тип. 600-2010.

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