

УДК 621.37/.39 (075)

ББК 32.841

Б89

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. В. Витязев* (Рязанский государственный радиотехнический университет); доктор техн. наук, доцент *В. И. Джиган* (Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»)

Брюханов Ю.А.

Б89 Цифровые цепи и сигналы. Учебное пособие для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 160 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0572-6.

Приведен математический аппарат для анализа сигналов и цепей дискретного времени. Изложены спектральная теория периодических и непериодических цифровых сигналов, теория цепей дискретного времени. Подробно рассмотрены частотные свойства и временные характеристики базовых нерекурсивных и рекурсивных линейных цепей (цифровых фильтров) первого и второго порядков. Изложены методы изменения частоты дискретизации цифровых сигналов: децимация и интерполяция, а также способы их реализации. Уделено внимание теории случайных сигналов и процессов дискретного времени, протекающих в цифровых цепях. Рассмотрены эффекты квантования в цифровых сигналах и цепях.

Для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки «Радиофизика», «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Адрес издательства в Интернет www.techbook.ru

Учебное издание

Брюханов Юрий Александрович

ЦИФРОВЫЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

Учебное пособие для вузов

Тиражирование книги начато в 2017 г.

Все права защищены.

Любая часть этого издания не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения правообладателя

© ООО «Научно-техническое издательство «Горячая линия – Телеком»

www.techbook.ru

© Брюханов Ю.А.

Оглавление

Введение	3
1. Математический аппарат	6
1.1. Последовательности	6
1.2. Разложение последовательностей в дискретный ряд Фурье	7
1.3. z -преобразование	8
1.3.1. Последовательности конечной длины	8
1.3.2. Физически реализуемые последовательности	8
1.3.3. Нереализуемые последовательности	9
1.3.4. z -преобразование некоторых последовательностей ...	9
1.4. Соотношение между z -преобразованием и Фурье-пре- образованием последовательности	10
1.5. Обратное z -преобразование	12
1.6. Свойства z -преобразования	13
1.6.1. Линейность	13
1.6.2. Задержка	13
1.6.3. Свертка последовательностей	13
1.6.4. Перемножение последовательностей	14
1.6.5. Одностороннее z -преобразование. Задержка физичес- ки реализуемых последовательностей	14
1.7. Дискретное преобразование Фурье	16
1.7.1. Связь между дискретным преобразованием Фурье и z -преобразованием	17
1.7.2. Дискретное преобразование Фурье последовательнос- тей конечной длины	19
1.7.3. Эффекты наложения	21
1.8. Свойства дискретного преобразования Фурье	22
1.8.1. Линейность	22
1.8.2. Сдвиг	22
1.8.3. Свойства симметрии	23
1.9. Свертка периодических последовательностей (круго- вая свертка)	25
1.10. Линейная свертка конечных последовательностей....	26
1.11. Разностные уравнения	28
1.12. Решение разностных уравнений с применением однос- тороннего z -преобразования	30

Контрольные вопросы	32
2. Цифровые сигналы и их спектры	34
2.1. Типовые периодические сигналы	34
2.1.1. Последовательность показательных импульсов	34
2.1.2. Косинусоидальное колебание	35
2.1.3. Последовательность прямоугольных импульсов	36
2.1.4. Последовательность прямоугольных радиоимпульсов	37
2.2. Типовые непериодические сигналы	38
2.2.1. Показательный импульс	38
2.2.2. Прямоугольный импульс	39
2.2.3. Прямоугольный радиоимпульс	40
2.2.4. Цифровой единичный импульс	41
2.2.5. Единичный скачок	41
2.3. Соотношения между спектрами непрерывных и цифровых сигналов	42
Контрольные вопросы	44
3. Цифровые цепи	45
3.1. Линейные цифровые цепи с постоянными параметрами	45
3.2. Физическая реализуемость. Устойчивость	48
3.3. Частотная характеристика. Геометрическая интерпретация	49
3.4. Способы построения цифровых цепей	51
3.4.1. Прямая форма I	52
3.4.2. Прямая форма II	54
3.4.3. Каскадная форма	56
3.4.4. Параллельная форма	57
3.5. Структурные схемы цепей без полюсов	58
3.6. Нерекурсивная цепь первого порядка	59
3.6.1. Частотные свойства	60
3.6.2. Временные характеристики	61
3.7. Рекурсивная цепь первого порядка	63
3.7.1. Частотные свойства	64
3.7.2. Временные характеристики	65
3.8. Нерекурсивная цепь второго порядка	67
3.8.1. Частотные свойства	68
3.8.2. Временные характеристики	73
3.9. Рекурсивная цепь второго порядка	76
3.9.1. Частотные свойства	77
3.9.2. Временные характеристики 12	83
Контрольные вопросы	87

4. Изменение частоты дискретизации цифровых сигналов	90
4.1. Децимация цифровых сигналов	91
4.1.1. Соотношение вход-выход всей системы децимации	93
4.1.2. Реализация системы децимации	94
4.2. Интерполяция цифровых сигналов	95
4.2.1. Соотношение вход-выход всей системы интерполяции	99
4.2.2. Реализация системы интерполяции	100
Контрольные вопросы	102
5. Случайные сигналы и процессы дискретного времени	104
5.1. Виды случайных последовательностей	104
5.2. Характеристики случайных последовательностей	105
5.2.1. Функция распределения вероятностей случайной последовательности	105
5.2.2. Плотность распределения вероятностей непрерывной случайной последовательности. Распределение вероятностей дискретной случайной последовательности	106
5.2.3. Среднее значение (математическое ожидание) случайной последовательности	108
5.2.4. Дисперсия случайной последовательности	109
5.2.5. Корреляционная функция случайной последовательности	109
5.2.6. Ковариационная функция случайной последовательности	110
5.3. Стационарные случайные последовательности	110
5.4. Энергетический спектр стационарной случайной последовательности. Теорема Винера–Хинчина	112
5.5. Примеры случайных последовательностей	113
5.5.1. Гауссовская стационарная случайная последовательность	113
5.5.2. Белый шум дискретного времени	114
5.6. Воздействие случайных последовательностей на линейные цифровые цепи	115
5.7. Связь между характеристиками случайных последовательностей на входе и выходе цифровой цепи	117
Контрольные вопросы	120
6. Эффекты квантования цифровых сигналов	122
6.1. Представление чисел в двоичной системе счисления	122
6.2. Усечение и округление чисел	126
6.3. Квантование сигнала	129
6.4. Аналого-цифровое преобразование сигналов	131
6.5. Цифро-аналоговое преобразование сигналов	132
Контрольные вопросы	135

7. Эффекты квантования в цифровых цепях	136
7.1. Реакция идеальной цифровой цепи на шум квантования	137
7.2. Квантование арифметических операций в БИХ-цепях	139
7.3. Ограничения, вызванные переполнением, и отношение сигнал/шум	142
7.4. Квантование арифметических операций в КИХ-цепях	143
7.5. Нелинейные колебания, вызванные квантованием и переполнением	144
7.6. Квантование коэффициентов цепей	145
7.7. Техническая реализация цифровых цепей	148
Контрольные вопросы	151
Приложения	153
Принятые сокращения	155
Литература	156