

Д. А. Улахович

**ВВЕДЕНИЕ
В ЦИФРОВУЮ ОБРАБОТКУ
СИГНАЛОВ**



«Инфра-Инженерия»

Д. А. Улахович

ВВЕДЕНИЕ В ЦИФРОВУЮ ОБРАБОТКУ СИГНАЛОВ

Учебник

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2023

УДК 004.383.3

ББК 32.811.3

У47

Рецензенты:

зав. кафедрой теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»

д-р техн. наук, проф. *Е. Б. Соловьёва*;

профессор кафедры автоматизированных систем управления и связи Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого

д-р техн. наук, проф. *А. М. Чуднов*

Улахович, Д. А.

У47 Введение в цифровую обработку сигналов : учебник / Д. А. Улахович. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 436 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1128-8

Рассматривается обобщённая схема цифровой обработки аналогового сигнала, понятие режима реального времени, понятие нормированного времени, изучаются типовые дискретные сигналы. Дано описание линейных дискретных систем (ЛДС) во временной области: свойства, условия физической реализуемости, разностные уравнения, рекурсивные и нерекурсивные ЛДС. Приводится пример экспресс-анализа частотных характеристик, устанавливается взаимосвязь между временными, операторными и частотными характеристиками ЛДС. Изучается арифметика и квантование чисел в цифровых системах. Даются основы цифрового спектрального анализа. Исследуется дискретизация относительно узкополосных сигналов, преобразования спектра, изучается дискретное преобразование Фурье. Изложен принцип организации многоскоростной обработки сигналов: однократных и многократных систем децимации и интерполяции, а также способы реализации интерполяторов и дециматоров. Изучаются методы компандирования речевых сигналов.

Для студентов, аспирантов, преподавателей вузов связи. Учебник может быть полезен инженерам, занимающимся разработкой цифровых систем связи.

УДК 004.383.3

ББК 32.811.3

ISBN 978-5-9729-1128-8

© Улахович Д. А., 2023

© Захарова М. А., обложка, 2023

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые сокращения	9
Предисловие	11
Глава 1. Основные понятия цифровой обработки сигналов	14
1.1. Введение	14
1.1.1. Предмет дисциплины ЦОС	16
1.1.2. Достоинства и недостатки ЦОС	20
1.2. Классификация сигналов	22
1.2.1. Основные типы сигналов	22
1.2.2. Цифровой сигнал	24
1.2.3. Типовые дискретные (цифровые) сигналы	25
1.2.4. Свойство селективности цифрового единичного импульса	29
1.3. Обобщённая схема цифровой обработки аналогового сигнала	29
1.3.1. Режим реального времени	32
1.3.2. Принцип построения структурной схемы передачи речевых сообщений с использованием ЦОС	35
Глава 2. Линейные дискретные системы (ЛДС)	36
2.1. Определение и свойства линейных дискретных систем (ЛДС).	36
2.2. Описание ЛДС во временной области	40
2.2.1. Понятия о разностных уравнениях	40
2.2.2. Рекурсивные и нерекурсивные ЛДС	43
2.2.3. Временные характеристики линейных дискретных систем	44
2.3. Устойчивость ЛДС, критерий устойчивости во временной области	53
Глава 3. Описание ЛДС в Z-области	55
3.1. Определение и основные свойства Z-преобразования	56
3.1.1. Определение Z-преобразования	56
3.1.2. Основные свойства Z-преобразования	57
3.1.3. Z-изображения функций типовых дискретных сигналов	59
3.1.4. Обратное Z-преобразование	65
3.2. Передаточные функции линейных дискретных систем	68
3.2.1. Определение передаточной функции	68
3.2.2. Нули и полюсы передаточной функции	71
3.2.3. Виды передаточных функций	74

3.2.4. Оценка устойчивости рекурсивной ЛДС по передаточной функции	77
3.2.5. Карта нулей и полюсов	78
3.3. Структурные схемы линейных дискретных систем	79
3.3.1. Структуры нерекурсивных (КИХ) ЛДС	81
3.3.2. Структуры рекурсивных (БИХ) ЛДС	83
Глава 4. Частотные характеристики линейных дискретных систем	92
4.1. Нормирование частоты. Основная полоса частот	92
4.2. Определение частотных характеристик ЛДС	94
4.3. Свойства частотных характеристик ЛДС	97
4.4. Расчёт частотных характеристик ЛДС	99
4.5. Экспресс-анализ частотных характеристик	104
4.5.1. Экспресс-анализ частотных характеристик звена 1-го порядка . .	105
4.5.2. Экспресс-анализ частотных характеристик звена 2-го порядка . .	107
4.6. Взаимосвязь между характеристиками ЛДС	110
Глава 5. Арифметика и квантование чисел в цифровых системах	112
5.1. Способы квантования чисел	113
5.1.1. Источники шума (ошибок) квантования	113
5.1.2. Формы представления данных	114
5.1.3. Квантование чисел с фиксированной точкой	119
5.1.4. Кодирование чисел с фиксированной точкой	122
5.2. Шум аналого-цифрового преобразования	124
5.2.1. Собственный шум АЦП	124
5.2.2. Шум АЦП, приведённый к выходу цифровой системы	126
5.3. Собственный шум цифровой системы	130
5.3.1. Собственный шум умножителя	131
5.3.2. Полный собственный шум цифровой системы	132
5.3.3. Полный выходной шум цифровой системы	135
5.4. Эффекты квантования коэффициентов	135
5.4.1. Влияние квантования коэффициентов на характеристики ЛДС. . .	135
5.4.2. Понятия о предельных циклах	137
5.4.3. Переполнение в сумматорах и коэффициенты масштабирования	139
Глава 6. Цифровые фильтры	142
6.1. Основные определения и классификации цифровых фильтров	142

6.1.1.	Задание требований к цифровым фильтрам	144
6.1.2.	Условия безыскажённой передачи сигналов	149
6.2.	КИХ-фильтры с линейной фазочастотной характеристикой	154
6.2.1.	Утверждение о КИХ-фильтрах с линейной ФЧХ	154
6.2.2.	Свойства КИХ-фильтров с линейной ФЧХ	159
6.3.	Однородный фильтр	172
6.3.1.	Определение и структурные схемы однородного фильтра	172
6.3.2.	Частотные характеристики однородного фильтра	174
6.3.3.	Свойства однородных фильтров	179
6.4.	Синтез КИХ-фильтров методом окон	180
6.4.1.	Постановка задачи. Определение метода	180
6.4.2.	Явление Гиббса	183
6.4.3.	Примеры окон	183
6.4.4.	Методика синтеза КИХ-фильтров на основе окон	190
6.5.	Синтез оптимальных (по Чебышёву) КИХ-фильтров	194
6.5.1.	Постановка задачи оптимального синтеза	195
6.5.2.	Процедура решения задачи. Понятие о критерии Чебышёва	198
6.5.3.	Полиномиальный обменный алгоритм Ремеза	207
6.6.	Блочные КИХ-фильтры с целочисленными коэффициентами	214
6.7.	Синтез БИХ-фильтров	219
6.7.1.	Синтез БИХ-фильтров методом инвариантности импульсной характеристики аналогового прототипа	220
6.7.1.1.	Постановка задачи синтеза и её решение	220
6.7.1.2.	Свойства БИХ-фильтров, синтезируемых методом инвариантности импульсной характеристики	224
6.7.2.	Синтез БИХ-фильтров методом билинейного Z-преобразования	226
6.7.2.1.	Определение билинейного Z-преобразования	226
6.7.2.2.	Свойства билинейного Z-преобразования	228
6.7.2.3.	Методика синтеза цифровых фильтров при билинейном Z-преобразовании	232
6.7.2.4.	Расстановка и структура звеньев	235
Глава 7. Основы цифрового спектрального анализа		243
7.1.	Преобразование Фурье цифровых (дискретных) сигналов и его свойства	243
7.1.1.	Свойства спектров дискретных сигналов	246
7.1.2.	Связь между спектрами аналогового и дискретного сигналов	248
7.1.3.	Дискретизация относительно узкополосных сигналов	253
7.1.4.	Сдвиг (перенос) спектра	258

7.1.5. Инверсия спектра вещественного сигнала	262
7.1.6. Формирование сигнала с одной боковой полосой	265
7.1.7. Выбор частоты дискретизации при переносе спектра узко-полосного ВЧ сигнала в область нижних частот	269
7.2. Дискретное преобразование Фурье	274
7.2.1. Определение дискретного преобразования Фурье (ДПФ)	275
7.2.2. Свойства ДПФ	278
7.2.3. Пример вычисления ДПФ	282
7.3. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	283
7.3.1. Алгоритм БПФ с прореживанием по времени	286
7.3.2. Эффективность алгоритма БПФ	290
7.3.3. Организация вычислений БПФ	292
7.4. Применение алгоритма БПФ	297
7.4.1. Вычисление обратного ДПФ (ОДПФ)	297
7.4.2. Вычисление свёрток	298
7.4.3. Вычисление реакции ЛДС с использованием БПФ	300
7.4.4. Пример решения задачи вычисления 4-точечного ДПФ	301
7.4.5. Процедура формирования бит-реверсивного адреса	304
7.5. Дискретное преобразование Хартли (ДПХ)	306
Глава 8. Специальные фильтры	308
8.1. Цифровой преобразователь Гильберта	308
8.1.1. Понятие о преобразовании Гильберта	309
8.1.2. Дискретное преобразование Гильберта	313
8.1.3. Частотные характеристики цифровых преобразователей Гильберта	316
8.1.4. Импульсная характеристика ЦПГ	318
8.1.5. Задание требований к цифровым преобразователям Гильберта	320
8.2. Цифровые согласованные КИХ-фильтры	323
8.2.1. Определение и основные характеристики согласованного фильтра	323
8.2.2. Импульсная характеристика СФ	328
8.2.3. Решающая схема обнаружителя сигналов	332
8.3. Амплитудные корректоры	335
8.4. Фазовые корректоры	338
8.4.1. Понятия о фазовом корректировании	338
8.4.2. Фазовые звенья	339
8.5. Адаптивные фильтры	345
8.5.1. Назначение и место адаптивных фильтров	345

8.5.2. Принцип работы адаптивных фильтров	348
8.5.3. Основное свойство адаптивного шумоподавителя	350
8.5.4. Выбор критерия оценивания	352
8.5.5. Оптимальное нерекурсивное винеровское оценивание	353
8.6. Медианная фильтрация	363
Глава 9. Многоскоростная обработка сигналов	366
9.1. Система децимации	368
9.1.1. Однократные системы децимации	368
9.1.2. Спектральное представление децимации	370
9.1.3. Многократные системы децимации	373
9.2. Системы интерполяции	377
9.3. Преобразование частоты дискретизации с рациональным коэффициентом	380
9.4. Способы реализации интерполяторов и дециматоров	382
9.4.1. Реализация интерполяторов	382
9.4.2. Реализация дециматоров	385
Глава 10. Цифровая обработка речевых сигналов	387
10.1. Методы компандирования речевых сигналов	388
10.1.1. Постановка задачи	388
10.1.2. Компрессия сигнала	389
10.2. Введение в линейное предсказание	395
10.2.1. Постановка задачи линейного предсказания	396
10.2.2. Вычисление коэффициентов линейного предсказания	400
10.3. Понятия о линейных спектральных корнях (ЛСК)	405
10.4. Принцип построения вокодеров с линейным предсказанием	411
10.4.1. Основные параметры и характеристики речевого сигнала	412
10.4.2. Структурная схема вокодера с линейным предсказанием	416
10.5. Векторное квантование	419
Список литературы	425
Предметный указатель	428