

681.3.01

Г59

В. С. Годлевский, В. В. Годлевский

**Вопросы точности  
при обработке  
сигналов**

---

---

В. С. Годлевский,  
В. В. Годлевский

# **ВОПРОСЫ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ**

*Монография*

Киев  
*АЛЬФА РЕКЛАМА*  
2020

УДК 621.37:517]:004.383.3  
Г59

**Годлевский В. С., Годлевский В. В.**

Г59 Вопросы точности при обработке сигналов : монография / В. С. Годлевский, В. В. Годлевский. — К.: Альфа Реклама, 2020. — 408 с.

ISBN 978-966-288-256-8

В книге рассмотрены методы анализа точностных характеристик цифровых и аналоговых средств обработки сигналов. Основное внимание уделено вычислению детерминированных и вероятностных показателей методических и обусловленных неточным заданием исходных данных погрешностей решения типовых задач обработки сигналов.

Книга рассчитана на специалистов в области разработки и применения численных методов, аппаратных цифровых и аналоговых средств обработки сигналов. Может быть полезной преподавателям, аспирантам и студентам вузов соответствующих специальностей.

УДК 621,37:517]:004.383.3

ISBN 978-966-288-256-8

© Годлевский В. С., 2020

© Годлевский В. В., 2020

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Основные показатели и задачи теории точности</b> .....	9
1.1. Показатели и виды погрешностей .....	9
1.1.1. Показатели погрешности .....	10
1.1.2. Трансформированные, методические, приборные погрешности .....	13
1.1.3. Динамические и статические погрешности .....	14
1.1.4. Систематические и случайные погрешности .....	15
1.2. Типовые задачи анализа точности и методы их решения .....	16
1.2.1. Линеаризация функций по погрешностям аргументов, линейная теория точности .....	18
1.2.2. Погрешности численного дифференцирования при линеаризации .....	25
1.2.3. Линеаризация скалярных неявных функций по погрешностям аргументов .....	29
1.2.4. Линеаризация векторных явных функций по погрешностям аргументов .....	34
1.2.5. Детерминированные и вероятностные оценки погрешностей .....	37
1.2.6. Законы распределения вероятности погрешностей .....	40
1.3. Обратные задачи теории точности .....	50
1.4. Точностной параметрический синтез .....	53
<b>Глава 2. Оценки погрешностей решений систем алгебраических уравнений</b> .....	54
2.1. Погрешности решений систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) .....	54
2.1.1. Трансформированные погрешности решения СЛАУ .....	56
2.1.1.1. Системы уравнений и зависимости для погрешностей решений .....	57
2.1.1.2. Оценки норм погрешностей решения СЛАУ .....	60
2.1.1.3. Вероятностные оценки погрешностей решения СЛАУ .....	67
2.1.1.4. Коэффициенты влияния параметров на решение СЛАУ .....	71
2.1.1.5. Оценки и вычисление норм обратных матриц .....	74
2.1.2. Погрешности округления при решении СЛАУ .....	77
2.1.3. Об оценках погрешностей решения СЛАУ при регуляризации .....	81
2.1.4. Погрешности решения СЛАУ из-за неточности модели .....	89
2.2. Погрешности решений систем нелинейных конечных уравнений (СНКУ) .....	90
2.2.1. Трансформированные погрешности решения СНКУ .....	91
2.2.2. Методические погрешности решения СНКУ .....	95
2.3. Анализ погрешностей решений СНКУ блочным методом .....	98
2.4. Выбор длины шага в модифицированном методе Ньютона .....	100
2.5. Блочный вариант метода Ньютона решения СНКУ .....	105

<b>Глава 3. Оценки вероятностей для векторных функций погрешностей</b> .....	109
3.1. Вычисление вероятности при многомерном нормальном распределении .....	109
3.2. Вычисление вероятностей методами статистических испытаний .....	120
3.2.1. Вычисление вероятности для погрешностей методом Монте-Карло .....	121
3.2.2. Вычисление вероятностей для погрешностей по непараметрическим оценкам плотностей распределения .....	125
3.3. Вероятностные характеристики оценок норм погрешностей .....	130
<b>Глава 4. Погрешности решения систем обыкновенных дифференциальных уравнение (СОДУ)</b> .....	135
4.1. Трансформированные погрешности решения СОДУ .....	135
4.1.1. Системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений .....	135
4.1.2. Оценки трансформированных погрешностей решения СОДУ .....	140
4.2. Методические погрешности решения СОДУ .....	144
4.2.1. Точность решения СОДУ явным методом Эйлера .....	144
4.2.2. Правило Рунге оценки методических погрешностей на шаге .....	150
4.2.3. Точность и устойчивость решения неявным методом Эйлера СОДУ в нормальной форме .....	151
4.2.4. Точность и устойчивость неявного метода трапеции .....	156
4.2.5. Точность и устойчивость решения неявными методами СОДУ, заданных в неявной форме .....	160
4.2.6. Точность и устойчивость явно-неявных методов .....	166
4.3. Экспоненциальные методы решения линейных СОДУ .....	170
<b>Глава 5. О точности обработки сигналов с применением дискретного преобразования Фурье</b> .....	175
5.1. Ряд Фурье в тригонометрической и показательной форме .....	175
5.2. Методические погрешности непрерывного преобразования Фурье .....	179
5.2.1. Размытость спектра сигнала из-за ограниченного интервала наблюдения .....	180
5.2.2. Эффект Гибса при аппроксимации рядом Фурье разрывных функций .....	184
5.3. Методические погрешности дискретного преобразования Фурье .....	185
5.3.1. Неравномерность АЧХ блока ДПФ .....	186
5.3.2. Искажение спектра составляющими из высокочастотной области .....	192
5.4. Способы уменьшения методических погрешностей ДПФ .....	194
5.4.1. Дополнение выборки нулями .....	195
5.4.2. Применение временных оконных функций .....	197
5.4.2.1. Общие свойства и параметры оконных функций .....	199
5.4.2.2. Вычисление параметров оконных функций .....	205
5.4.2.3. Выбор параметров оконных функций .....	206
5.5. О точности фильтрации и корреляционной обработки аналоговых сигналов методами ДПФ и ОДПФ .....	209

5.5.1. Фильтрация аналоговых сигналов методами ДПФ и ОДПФ .....	211
5.5.2. О методических погрешностях вычисления корреляционных функций сигналов .....	217
5.5.3. Методические погрешности поиска утечек на трубопроводах корреляционными течеискателями .....	221
<b>Глава 6. Точность воспроизведения сигналов фильтрами и системами .....</b>	<b>232</b>
6.1. Частотные и мгновенные погрешности фильтров при гармонических сигналах .....	233
6.1.1. Погрешности фильтров нижних частот .....	235
6.1.2. Погрешности фильтров верхних частот .....	241
6.1.3. Погрешности полосовых фильтров .....	244
6.1.4. Погрешности фильтров при допустимых запаздываниях .....	247
6.2. Методические погрешности воспроизведения фильтрами произвольных дифференцируемых сигналов .....	253
6.2.1. Погрешности воспроизведения ФНЧ гладких сигналов .....	253
6.2.2. Погрешности воспроизведения ФВЧ гладких сигналов .....	259
6.3. Аппаратные погрешности аналоговых фильтров .....	262
6.4. Оценка погрешностей многосвязных воспроизводящих систем .....	271
6.5. Методические погрешности цифровых фильтров аналоговых сигналов .....	277
6.5.1. Модели цифровых фильтров для анализа методических погрешностей .....	281
6.5.2. Фильтры на основе численных решений СОДУ первого порядка ....	289
<b>Глава 7. Точность аналоговых операционных блоков и процессоров .....</b>	<b>293</b>
7.1. Источники первичных погрешностей операционных блоков .....	294
7.2. Точность типовых линейных операционных блоков .....	299
7.2.1. Точность инвертирующего масштабного блока .....	300
7.2.2. Точность инвертирующего сумматора .....	301
7.2.3. Точность сумматора-вычитателя .....	307
7.2.4. Влияние потенциалов и шумов земляных шин .....	311
7.3. Точность типовых нелинейных блоков .....	312
7.3.1. Детекторы однополярных и абсолютных значений сигналов .....	312
7.3.2. Детекторы средневывпрямленных значений сигналов .....	324
7.3.3. Функциональные преобразователи на детекторах с «идеальными» диодами .....	328
7.4. Погрешности первичных преобразователей сигналов датчиков .....	336
7.4.1. Нормированный коэффициент преобразования шума .....	337
7.4.2. Анализ точности схем предварительных усилителей сигналов датчиков .....	341
7.5. Погрешности решения систем алгебраических уравнений на аналоговых процессорах .....	351

7.6. Погрешности анализа устойчивости аналоговых процессоров .....	356
7.7. Сравнение показателей быстродействия аналоговых и цифровых процессоров .....	358
<b>Глава 8. О повышении точности входных данных</b> .....	363
8.1. Предварительная обработка входных данных.....	363
8.1.1. Усреднение измерений параметров и сигналов .....	363
8.1.2. Идентификация параметров одномерных датчиков .....	364
8.1.3. Идентификация параметров многосвязных систем .....	366
8.1.4. Вычислительные вопросы при идентификации систем .....	372
8.1.5. Восстановление входных сигналов инерционных датчиков .....	387
8.2. Идентификация состояния объектов с применением непараметрических оценок функций регрессии .....	382
Заключение .....	389
Список литературы .....	390