

# ЭЛЕКТРОНИКИ

Т. С. ПАТХОР

Цифровые  
измерения.  
Методы и  
схемотехника



ТЕХНОСФЕРА



# **МИР** **электроники**

**Т. С. РАТХОР**

## **Цифровые измерения. Методы и схемотехника**

Перевод с английского  
Ю. А. Заболотной

**ТЕХНОСФЕРА**  
Москва  
2004

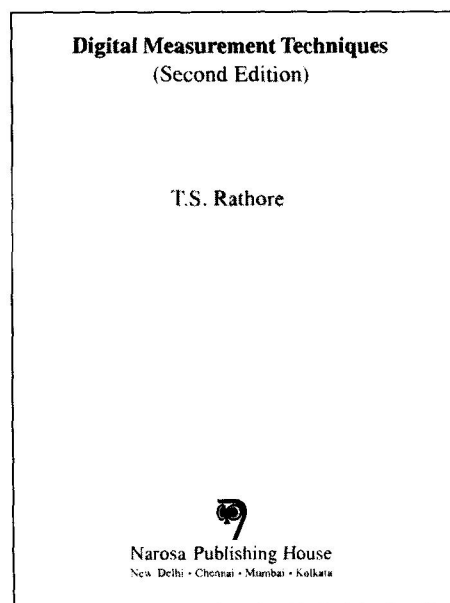
**Т. С. Ратхор**

**Цифровые измерения. Методы и схемотехника.**

**Москва:**

**Техносфера, 2004. – 376 с. ISBN 5-94836-012-1**

Учебник-монография посвящен описанию современных методов и приборов цифровой измерительной техники. Подробно рассмотрены теоретические и практические способы измерения частоты, временных интервалов, отношений сигналов, которые являются основополагающими для всех остальных цифровых методов. Дается уникальное по полноте описание АЦП, ЦАП и цифровых схем, работающих под управлением микроконтроллеров, таких как программируемые резисторы, усилители, фильтры, что делает книгу ценным пособием для профессионалов-разработчиков и инженеров-практиков.



Originally published in English as  
**DIGITAL MEASUREMENT TECHNIQUES,  
SECOND EDITION**

© 2003 by Narosa Publishing House,  
New Delhi - 110 002.

All Rights Reserved.

© 2003, ЗАО «РИЦ «Техносфера»  
перевод на русский язык,  
оригинал-макет, оформление

**ISBN 5-94836-012-1**

**ISBN 81-7319-388-6 (англ.)**

## Оглавление

Предисловие редактора перевода .....	14
Предисловие ко второму изданию .....	15
<b>Глава 1</b>	
<b>Введение .....</b>	<b>17</b>
1.1. Почему эта книга посвящена цифровым измерениям? .....	17
1.2. Философия цифровых измерений .....	17
1.3. Программно-управляемые измерительные системы .....	20
1.4. Немного информации об остальных главах .....	20
Задачи .....	21
<b>Глава 2</b>	
<b>Методы цифрового измерения интервалов времени .....</b>	<b>22</b>
2.1. Введение .....	22
2.2. Измерение интервала времени между двумя событиями .....	22
2.2.1. Погрешность измерения временного интервала .....	23
2.3. Нониусный метод измерения малых интервалов времени .....	24
2.3.1. Измерение интервалов времени, меньших длительности периода тактового генератора .....	28
2.3.2. Разрешающая способность .....	28
2.3.3. Моменты, на которые необходимо обращать внимание при измерении временных интервалов .....	31
2.4. Измерение интервала времени при наличии ограничений .....	31
2.4.1. Произвольный порядок появления событий .....	31
2.4.2. Измерение временного интервала предельной длительности .....	33
2.5. Измерение длительности периода .....	34
2.5.1. Измерение емкости .....	36
2.6. Измерение фазы .....	36
2.6.1. Требования к идеальному измерителю фазы .....	36
2.6.2. Измерение фазы через измерение времени .....	36
2.6.3. Прямое измерение фазы .....	37
2.6.4. Автоматический метод измерения фазы .....	38
2.6.5. Измерение фазы низкочастотного сигнала .....	41
2.6.6. Исключение частотной погрешности при измерении фазы .....	45
2.6.7. Измерение фазы при помощи микроконтроллера .....	45
2.7. Индикатор чередования фаз в многофазных цепях .....	46
2.8. Измерение интервала времени между двумя событиями, определяемыми уровнями напряжения .....	47
2.8.1. Измерение постоянной времени .....	48



2.8.2. Точные измерения малых значений постоянной времени .....	49
2.9. Измерение емкости конденсатора .....	50
2.10. Измерение добротности RLC-контура .....	55
2.11. Измерение относительного уровня напряжения в децибелах .....	56
Задачи .....	61
Литература .....	67
<b>Глава 3</b>	
<b>Цифровые методы измерения частоты .....</b>	<b>69</b>
3.1. Введение .....	69
3.2. Измерение частоты .....	69
3.3. Измерение отношения двух частот .....	70
3.4. Измерение произведения двух частот .....	71
3.5. Способы повышения точности при измерении частоты .....	71
3.5.1. Метод увеличения разности частот .....	72
3.6. Измерение разности частот .....	72
3.6.1. Практическое применение схем измерения разности частот .....	73
3.7. Измерение девиации частоты в энергосистемах .....	74
3.8. Быстродействующие системы измерения низких значений частоты .....	76
3.9. Измерение низкой частоты в узком диапазоне частот .....	79
3.9.1. Метод прямого счета .....	79
3.9.2. Метод дополняющих импульсов .....	79
3.9.3. Метод обратного счета .....	81
3.10. Использование обратной зависимости от времени для измерения частоты .....	82
3.10.1. Частотный диапазон и точность .....	86
3.11. Быстродействующий метод измерения низкой частоты синусоидальных сигналов .....	86
3.12. Измерение пиковой частоты .....	
3.12.1. Упрощенная схема индикатора максимального/минимального значения .....	88
Задачи .....	90
Литература .....	92
<b>Глава 4</b>	
<b>Программируемые цифровые схемы .....</b>	<b>94</b>
4.1. Введение .....	94
4.2. Программируемые сопротивления .....	94
4.3. Программируемые делители .....	103
4.4. Программируемые усилители .....	104
4.4.1. Комментарии .....	113



4.5. Программируемый триггер Шмитта .....	116
4.6. Усилители с программируемой полярностью коэффициента усиления .....	118
4.7. Программируемый усилитель с двуполярным выходным сигналом .....	122
4.8. Двухстадийные программируемые усилители .....	123
4.9. Применение программируемых усилителей .....	123
4.10. Схемы с программируемым коэффициентом усиления .....	127
4.11. Программируемые режекторные фильтры .....	128
4.12. Программируемые биквадратные фильтры .....	133
4.13. Программируемые аналоговые ключи и мультиплексоры .....	142
Задачи .....	145
Литература .....	152
<b>Глава 5</b>	
<b>Цифроаналоговые преобразователи .....</b>	<b>155</b>
5.1. Введение .....	155
5.2. Отношение между входными и выходными сигналами ЦАП .....	155
5.3. ЦАП на основе программируемого усилителя .....	156
5.4. ЦАП с поразрядно взвешенными резисторами .....	159
5.4.1. Двухкаскадные ЦАП с поразрядно взвешенными резисторами .....	161
5.4.2. Многокаскадные ЦАП с поразрядно взвешенными резисторами .....	172
5.5. ЦАП с поразрядно взвешенными токами .....	177
5.6. ЦАП с поразрядно взвешенными эталонными напряжениями .....	178
5.7. Многозвенные ЦАП лестничного типа .....	178
5.7.1. Построение многозвенных $\{\bar{N} \times R\}$ ЦАП .....	179
5.7.2. Построение многозвенных $\{\bar{N} \times L\}$ ЦАП с минимальным диапазоном значений резисторов .....	183
5.7.3. Построение ЦАП с минимальным количеством резисторов .....	186
5.7.4. Построение ЦАП с минимальным полным сопротивлением .....	187
5.7.5. Построение ЦАП с одинаковыми номиналами резисторов .....	188
5.8. Электронные ключи .....	190
5.9. ЦАП, управляемые током .....	192
5.10. Инвертирующий многозвенный ЦАП .....	196
5.11. ЦАП с двоично-взвешенными зарядами .....	197
5.12. Форматы входных сигналов ЦАП .....	199
5.13. Гибридные схемы умножителя и делителя .....	201
5.14. Параметры ЦАП .....	202
5.14.1. Статические параметры ЦАП .....	202
5.14.2. Динамические параметры ЦАП .....	207

5.14.3. Измерение статических и динамических параметров ЦАП .....	208
Задачи .....	210
Литература .....	214
<b>Глава 6</b>	
<b>АЦП и способы сопряжения цифровых устройств с микропроцессорными системами .....</b>	<b>215</b>
6.1. Введение .....	217
6.2. Аналого-цифровые преобразователи косвенного типа .....	217
6.2.1. Преобразователи напряжение–время .....	218
6.2.2. Преобразователи напряжение–частота .....	227
6.3. Процесс преобразования аналогового сигнала в цифровой при помощи АЦП прямого действия .....	230
6.3.1. Теорема о дискретизации .....	230
6.3.2. Мультиплексирование с разделением времени .....	231
6.3.3. Квантование .....	232
6.4. Аналогоцифровые преобразователи прямого действия .....	237
6.4.1. Интегрирующий АЦП .....	237
6.4.2. Следящий АЦП .....	238
6.4.3. АЦП последовательного приближения .....	239
6.4.4. Параллельные АЦП .....	243
6.4.5. Сравнение АЦП .....	250
6.5. Параметры АЦП .....	251
6.5.1. Статические параметры АЦП .....	251
6.5.2. Динамические параметры АЦП .....	252
6.5.3. Определение статических параметров АЦП .....	253
6.5.4. Определение динамических параметров АЦП .....	256
6.6. Входной интерфейс измерительных систем .....	257
6.6.1. Особенности некоторых типов датчиков .....	258
6.6.2. Гальваническая развязка и заземление .....	259
6.6.3. Защита входов АЦП .....	261
6.6.4. Фильтрация входных сигналов .....	263
6.6.5. Предварительное усиление входных сигналов .....	264
6.6.6. Работа с биполярными сигналами .....	266
6.6.7. Управление работой цифрового вольтметра .....	267
6.6.8. Автоматический выбор диапазона измерений .....	268
6.6.9. Схема выборки и хранения .....	276
6.6.10. Защита от шумов цифровых схем .....	278
6.6.11. Стандартные модули входных интерфейсов .....	278
6.7. Способы сопряжения измерительных плат с процессорными системами .....	279
6.7.1. Аппаратные средства сопряжения .....	279
6.7.2. Программные средства сопряжения .....	281
6.8. Стандартные интерфейсы .....	282

6.8.1. Системные шины для подключения интерфейсных плат периферийных устройств .....	283
6.8.2. Стандартный интерфейс параллельной передачи данных (GPIB) .....	288
6.8.3. Стандартный интерфейс последовательной передачи данных (RS-232, RS-422, RS-423, RS-449) .....	292
6.8.4. Приборная шина USB .....	296
6.8.5. Интерфейсная шина MXI .....	297
6.9. Универсальные платы АЦП .....	298
6.10. Многоканальные системы сбора данных .....	299
6.10.1. Стандарт построения магистрально-модульных систем сбора данных VXI .....	300
6.10.2. Стандарт PXI для построения мини измерительных систем .....	315
6.10.3. Мезонинные измерительные системы .....	316
Задачи .....	317
Литература .....	322
<b>Глава 7</b>	
<b>Цифровые методы измерения отношения напряжений .....</b>	<b>325</b>
7.1. Введение .....	325
7.2. Методы измерения отношения напряжений .....	325
7.2.1. Измерители отношения напряжений .....	325
7.3. Практическое применение .....	327
7.3.1. Измерение частоты синусоидальных сигналов .....	327
7.3.2. Измерение коэффициента модуляции .....	328
7.3.3. Измерение добротности .....	329
7.3.4. Измерение тангенса угла потерь в эквивалентной последовательной RC цепи .....	340
7.3.5. Измерение тангенса угла потерь в эквивалентной параллельной RC цепи .....	341
7.3.6. Измерение импеданса в комплексном виде .....	344
7.3.7. Цифровой омметр .....	347
7.3.8. Цифровой измеритель емкости .....	347
Задачи .....	348
Литература .....	349
<b>Глава 8</b>	
<b>Дальнейшее развитие теории дискретизации .....</b>	<b>351</b>
8.1. Введение .....	351
8.2. Две основные теоремы .....	351
8.2.1. Условия, при которых число является нецелым .....	351
8.2.2. Условия, при которых сумма ряда равна нулю .....	352
8.2.3. Дискретизация .....	352



8.3. Теорема о несовпадении моментов дискретизации .....	355
8.4. Теорема об совпадающих множествах выборок .....	356
8.5. Соответствие между отсчетами .....	358
8.6. Теорема о среднем и среднеквадратичном значении .....	359
8.7. Теорема об определении мощности .....	360
8.7.1. Частный случай .....	361
8.8. Практическое применение .....	362
8.8.1. Измерение мощности переменного тока .....	363
8.8.2. Измерение энергии .....	366
8.8.3. Измерение напряжения .....	366
8.8.4. Измерение тока .....	367
8.8.5. Другие измерения .....	367
Задачи .....	367
Литература .....	369
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>371</b>