

В. Б. Топильский

# МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

4-е издание, электронное

Допущено

Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию  
в качестве учебного пособия для студентов,  
обучающихся по направлению 2301000  
«Информатика и вычислительная техника»



Москва  
Лаборатория знаний  
2020

УДК 681.518+621.38  
ББК 32.965  
Т58

**Топильский В. Б.**

**Т58** Микроэлектронные измерительные преобразователи : учебное пособие / В. Б. Топильский. — 4-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 496 с. — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-720-2

В учебном пособии рассмотрен комплекс вопросов, связанных с аналоговой и аналого-цифровой схемотехникой информационно-измерительных систем (ИИС) и систем управления. Подробно описаны компоненты таких систем (микроэлектронные сенсоры, усилители сигналов, аналого-цифровые преобразователи и устройства отображения информации). Приведены схемы включения элементов ИИС и систем сбора данных (ССД), анализ их погрешностей, программы схемотехнического моделирования элементов ССД в пакете Multisim фирмы National Instruments.

Студентам и аспирантам, обучающимся по направлению «Информатика и вычислительная техника», преподавателям соответствующих дисциплин, практическим специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией ИИС различного назначения.

УДК 681.518+621.38  
ББК 32.965

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Микроэлектронные измерительные преобразователи : учебное пособие / В. Б. Топильский. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. — 493 с. : ил. — ISBN 978-5-9963-0635-0.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-00101-720-2

© Лаборатория знаний, 2015

# Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>7</b>
<b>Введение</b> .....	<b>9</b>
<b>Список основных сокращений</b> .....	<b>13</b>
<b>Глава 1. Общие сведения о датчиках физических величин и измерительных схемах</b> .....	<b>17</b>
1.1. Классификация датчиков .....	17
1.2. Генераторные датчики сигналов .....	18
1.2.1. Датчики напряжения .....	19
1.2.2. Датчики тока .....	22
1.2.3. Датчики заряда .....	24
1.3. Параметрические датчики сигналов .....	28
1.3.1. Последовательные цепи и делители напряжения .....	29
1.3.2. Мостовые измерительные схемы .....	32
1.3.3. Мосты переменного тока .....	43
1.3.4. Подключение датчиков к измерительным схемам .....	47
1.3.5. Термокомпенсация резистивного моста .....	52
1.3.6. Аналоговый интерфейс «токовая петля» .....	56
1.4. Датчики с импульсным выходом .....	61
<b>Глава 2. Усилители сигналов сенсоров</b> .....	<b>65</b>
2.1. Параметры интегральных операционных усилителей . . .	65
2.2. Классификация интегральных операционных усилителей .....	76
2.3. Анализ погрешностей усилителей .....	80
2.3.1. Методы анализа усилителей .....	80
2.3.2. Структура погрешностей усилителей .....	87

2.4. Разновидности специализированных ОУ	92
2.4.1. Измерительные усилители	92
2.4.2. Усилители с модуляцией и демодуляцией сигнала	100
2.4.3. Двухканальные ОУ	104
2.4.4. Усилители с периодической компенсацией дрейфа нуля (ПКД-усилители)	107
2.4.5. Программируемые ОУ	114
2.4.6. Токоразностные ОУ (усилители Нортонa)	117
2.4.7. Изолирующие ОУ	125
2.5. Однополярное питание ОУ	129
2.6. Шумы усилительных схем	138
<b>Глава 3. Датчики физических величин</b>	<b>148</b>
3.1. Оптоэлектронные датчики	148
3.1.1. Фоторезисторы	151
3.1.2. Фотодиоды	159
3.1.3. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью	169
3.1.4. Аналоговые координатно-чувствительные фотоприемники	182
3.1.5. Пирозлектрические фотоприемники	186
3.1.6. Полупроводниковые ИК-излучатели	191
3.1.7. Полупроводниковые лазеры	200
3.2. Датчики температуры	204
3.2.1. Металлические термометры сопротивлений	206
3.2.2. Терморезисторы	210
3.2.3. Термопары	218
3.2.4. Полупроводниковые датчики температуры	226
3.3. Датчики деформации и смещения	232
3.3.1. Металлические тензодатчики	232
3.3.2. Полупроводниковые тензодатчики	236
3.3.3. Пьезоэлектрические датчики	244
3.3.4. Емкостные датчики	254
3.4. Датчики магнитного поля	266
3.4.1. Датчики на эффекте Холла	266
3.4.2. Магниторезисторы	272
3.5. Ультразвуковые датчики	279

<b>Глава 4. Устройства отображения информации (УОИ)</b>	<b>293</b>
4.1. Классификация и характеристики УОИ	293
4.2. Светоиндикаторные диоды (СИД)	298
4.3. Жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ)	309
4.4. Газоразрядные индикаторы	314
4.5. Электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ)	319
<b>Глава 5. Системы сбора данных (ССД) измерительных преобразователей</b>	<b>323</b>
5.1. Общие сведения об интегральных ССД	323
5.1.1. Архитектура ССД	323
5.1.2. Процессы дискретизации функций	325
5.1.2.1. Квантование во времени	325
5.1.2.2. Квантование по уровню	333
5.1.2.3. Влияние погрешности квантования на полную погрешность преобразования	337
5.1.3. Основные характеристики ЦАП/АЦП	340
5.1.3.1. Статические параметры ЦАП/АЦП	340
5.1.3.2. Динамические параметры ЦАП/АЦП	343
5.1.4. Подключение датчиков к ССД	344
5.2. Цифро-аналоговые преобразователи	357
5.2.1. Параллельный ЦАП с весовыми резисторами	357
5.2.2. Параллельный ЦАП на матрице $R-2R$	359
5.2.3. Параллельные ЦАП с токовыми ключами	363
5.2.4. Сегментированные резистивные ЦАП	366
5.2.5. ЦАП на коммутируемых конденсаторах	370
5.2.6. Биполярные ЦАП	373
5.3. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)	377
5.3.1. Классификация АЦП	377
5.3.2. Быстродействующие АЦП	378
5.3.2.1. Параллельные АЦП	378
5.3.2.2. Конвейерные АЦП	382
5.3.3. Неинтегрирующие АЦП уравнивания	387
5.3.3.1. АЦП развертывающего уравнивания	388
5.3.3.2. АЦП следящего уравнивания	390
5.3.3.3. АЦП поразрядного уравнивания	392
5.3.3.4. Оценка характеристик АЦП уравнивания	395
5.3.4. Интегрирующие АЦП	398
5.3.4.1. АЦП двухтактного интегрирования	398

5.3.4.2. АЦП с промежуточным преобразованием в частоту (АЦП-ППЧ) . . . . .	403
5.3.4.3. Сигма-дельта АЦП . . . . .	411
5.4. Функциональные устройства ЦАП-АЦП . . . . .	422
5.4.1. Источники опорных напряжений . . . . .	422
5.4.1.1. Стабилитронные ИОН . . . . .	422
5.4.1.2. ИОН на биполярных транзисторах (bandgap) . . . . .	428
5.4.1.3. Источники опорного напряжения на униполярных транзисторах (XFET) . . . . .	432
5.4.2. Аналоговые устройства выборки и хранения . . . . .	435
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>443</b>
Приложение 1. Моделирование измерительных усилителей. . . . .	443
П1.1. Моделирование ИОУ на одном ОУ . . . . .	443
П1.2. Моделирование ИОУ на двух ОУ . . . . .	449
П1.3. Моделирование ИОУ на трех ОУ . . . . .	452
Приложение 2. Моделирование МДМ-усилителей . . . . .	454
Приложение 3. Моделирование усилителей с периодической компенсацией дрейфа нуля . . . . .	460
П3.1. Исследование работы схемы одноканального ПҚД-усилителя. . . . .	460
П3.2. Исследование работы схемы двухканального ПҚД-усилителя . . . . .	463
Приложение 4. Моделирование интегрального тензомоста . . . . .	466
П4.1. Моделирование температурной чувствительности тензомоста . . . . .	467
П4.2. Методика и пример расчета параметров модели. . . . .	470
Приложение 5. Моделирование интегральных емкостных датчиков . . . . .	473
П5.1. Однополярный емкостной датчик . . . . .	474
П5.2. Дифференциальный емкостной датчик . . . . .	476
Приложение 6. Краткое руководство пользователя Multisim . . . . .	484
П6.1. Основы работы с программой Multisim . . . . .	484
П6.2. Использование измерительных инструментов . . . . .	487
<b>Список литературы. . . . .</b>	<b>492</b>