

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Глава 1. ИСТОРИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ (Уолт Кестер)</b> .....	11
Предисловие к главе .....	11
1.1. Ранняя история .....	11
Ранние годы: от телеграфа до телефона .....	13
Изобретение импульсно-кодовой модуляции (PCM) .....	15
Математическое обоснование ИКМ .....	16
Патент Алекса Харли Ривза на ИКМ .....	18
ИКМ и Bell System: Вторая мировая война, и до 1948 года .....	20
ОУ и регенеративные импульсные ретрансляторы: от электронно-вакуумных до полупроводниковых устройств .....	23
<i>Список литературы к 1.1. Ранняя история</i> .....	25
1.2. Преобразователи 1950-х и 1960-х годов (Уолт Кестер) .....	27
Коммерческие преобразователи: 1950-е годы .....	27
История развития преобразователей: 1960-е годы .....	29
Архитектуры преобразователей .....	33
<i>Список литературы к 1.2. Преобразователи 1950-х и 1960-х годов</i> .....	36
1.3. Развитие преобразователей в 1970-е годы .....	37
Монолитные преобразователи 1970-х годов .....	38
Модульные преобразователи 1970-х годов .....	48
<i>Список литературы к 1.3. Развитие преобразователей в 1970-е годы</i> .....	50
1.4. Преобразователи данных в 1980-е годы (Уолт Кестер) .....	51
Введение .....	51
Монолитные ЦАП в 1980-е годы .....	52
Монолитные АЦП 1980-х годов .....	53
Монолитные параллельные АЦП в 1980-е годы .....	54
Гибридные и модульные ЦАП и АЦП в 1980-е годы .....	55
1.5. Преобразователи в 1990-е годы (Уолт Кестер) .....	56
Введение .....	56
Монолитные ЦАП в 1990-х годах .....	58
Монолитные АЦП в 1990-е годы .....	60
Гибридные и модульные ЦАП и АЦП в 1990-е годы .....	65
1.6. Преобразователи в 2000-х годах (Уолт Кестер) .....	66
<b>Глава 2. ОСНОВЫ СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ В АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ</b> .....	68
2.1. Кодирование и квантование (Уолт Кестер, Дэн Шайнголд, Джеймс Брайант) .....	68
Однополярные коды .....	71
Код Грея .....	73
Биполярные коды .....	75
Комплементарные коды .....	80
Статические передаточные характеристики ЦАП и АЦП и погрешности постоянного тока .....	80
<i>Список литературы к 2.1. Кодирование и квантование</i> .....	88
2.2. Теория отсчетов (Уолт Кестер) .....	89

Необходимость в наличии функции выборки-хранения .....	90
Критерий Найквиста .....	93
Фильтры для устранения эффекта наложения спектров (антиалайзинговые фильтры) .....	95
Субдискретизация (Undersampling) (гармоническая дискретизация (Harmonic Sampling), дискретизация модулированных сигналов (Bandpass Sampling), дискретизация на промежуточной частоте (ПЧ) (IF Sampling), прямое преобразование ПЧ в цифровую форму (Direct IF-to-Digital)) .....	97
Фильтры для устранения эффектов смещения и наложения спектров в приложениях с субдискретизацией .....	99
<i>Список литературы к 2.2. Теория отсчетов</i> .....	100
2.3. Погрешности переменного тока преобразователей ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант</i> ) .....	101
Теория шума квантования идеального $N$ -разрядного преобразователя .....	101
Шум в реальных АЦП .....	107
Динамические характеристики преобразователей .....	110
Динамические характеристики ЦАП .....	143
<i>Список литературы к 2.3. Погрешности переменного тока преобразователей</i> .....	152
2.4. Общие технические характеристики преобразователей ( <i>Джеймс Брайант</i> ) .....	153
Общие положения .....	153
Логический интерфейс .....	155
Логическая часть преобразователей: тактирование и другие показатели .....	156
2.5. Определение технических характеристик ( <i>Дэн Шайнголд, Уолт Кестер</i> ) .....	157
<i>Общая библиография по преобразованию данных и сопутствующим вопросам</i> .....	180
<b>Глава 3. АРХИТЕКТУРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАННЫХ</b> .....	182
3.1. Архитектуры ЦАП ( <i>Джеймс Брайант, Уолт Кестер</i> ) .....	182
Введение .....	182
Обсуждение выходов ЦАП .....	184
Базовые структуры ЦАП .....	185
Другие архитектуры с малыми искажениями .....	211
Обсуждение логики ЦАП .....	213
<i>Список литературы к 3.1. Архитектуры ЦАП</i> .....	215
3.2. Архитектуры АЦП ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант</i> ) .....	216
Введение .....	216
Компаратор: 1-разрядный АЦП .....	220
Архитектуры высокоскоростных АЦП .....	223
Архитектуры счетных и интегрирующих АЦП .....	262
<i>Список литературы к 3.2. Архитектуры АЦП</i> .....	277
3.3. Сигма-дельта преобразователи ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант</i> ) .....	282
Историческая перспектива .....	282
Основы сигма-дельта АЦП .....	286
Обсуждение систем более высокого порядка .....	294
Измерительные сигма-дельта АЦП высокого разрешения .....	298
Полосовые сигма-дельта преобразователи .....	303
Сигма-дельта ЦАП .....	304
Выводы .....	305
<i>Список литературы к 3.3. Сигма-дельта преобразователи</i> .....	306

<b>Глава 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ</b> .....	310
4.1. Ранние процессы ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	310
Электронно-вакуумные преобразователи .....	310
Полупроводниковые модульные и гибридные преобразователи .....	312
Процесс калибровки .....	317
<i>Список литературы к 4.1. Ранние процессы</i> .....	317
4.2. Современные процессы ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант</i> ) .....	318
Биполярные процессы .....	318
Технология тонкопленочных резисторов .....	319
Комплементарные биполярные технологии .....	320
Технологии КМОП (CMOS) .....	321
Технологии и архитектура преобразователей .....	323
<i>Список литературы к 4.2. Современные процессы</i> .....	327
4.3. Разумное разделение ( <i>Дэйв Робертсон, Мартин Кесслер</i> ) .....	327
Когда полная интеграция не является оптимальным решением .....	327
Для чего необходимо разумное разделение? .....	332
Что меняется? .....	333
<b>Глава 5. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАННЫХ</b> .....	337
5.1. Тестирование ЦАП ( <i>Уолт Кестер, Дэн Шейнголд</i> ) .....	337
Тестирование статических характеристик ЦАП .....	337
Тестирование динамических показателей ЦАП .....	349
<i>Список литературы к 5.1. Тестирование ЦАП</i> .....	361
5.2. Тестирование АЦП ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	362
Краткий исторический обзор спецификаций и методов тестирования преобразователей данных .....	362
Тестирование статических характеристик АЦП .....	364
Тестирование динамических характеристик .....	380
<i>Список литературы к 5.2. Тестирование АЦП</i> .....	421
Дополнительная литература по БПФ и ЦОС .....	423
Программные пакеты для вычисления БПФ и анализа технических данных .....	423
<i>Общая литература по преобразованию данных и смежным вопросам</i> .....	423
<b>Глава 6. ИНТЕРФЕЙСЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАННЫХ</b> .....	425
6.1. Сопряжение аналоговых входов АЦП ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	425
Введение .....	425
Анализ работы усилителя на постоянном и переменном токе .....	427
Сопряжение измерительных $\Sigma$ - $\Delta$ АЦП высокого разрешения .....	439
Сопряжение АЦП последовательного приближения с одним входом и однополярным питанием 1,6–3,6 В .....	440
Сопряжение АЦП с однополярным питанием с масштабируемыми входами .....	442
Сопряжение CMOS АЦП с коммутируемыми конденсаторами и дифференциальным входом .....	443
Схемы подключения по одному входу CMOS АЦП с дифференциальным входом .....	444
Драйверы АЦП с дифференциальным входом .....	447
Сопряжение АЦП с дифференциальными усилителями .....	452
<i>Список литературы к 6.1. Сопряжение аналоговых входов АЦП</i> .....	466
6.2. Цифровые интерфейсы АЦП И ЦАП (и связанные темы) ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	467
Введение .....	467

Инициализация преобразователей данных при включении .....	467
Инициализация внутренних регистров управления преобразователя данных .....	468
Экономичный режим, спящий режим и режим готовности .....	469
Ждущий режим, толчковый режим и режим дискретизации на минимальной частоте .....	469
Цифровые выходные интерфейсы АЦП .....	471
Цифровые входные интерфейсы ЦАП .....	481
<i>Список литературы к 6.2. Цифровые интерфейсы АЦП и ЦАП (и связанные системы) .....</i>	<i>485</i>
<b>6.3. Буферизация аналоговых выходов ЦАП (Уолт Кестер) .....</b>	<b>486</b>
Предисловие .....	486
Техника преобразования дифференциального сигнала к одному выходу .....	487
Преобразование ток-напряжение с одним выходом .....	490
Преобразование дифференциального тока в дифференциальное напряжение .....	491
Активные фильтры НЧ для аудио ЦАП .....	492
<i>Список литературы к 6.3. Буферизация аналоговых выходов ЦАП .....</i>	<i>493</i>
<b>6.4. Опорные напряжения преобразователей данных (Уолт Кестер) .....</b>	<b>493</b>
Введение .....	493
<b>6.5. Формирование синхрои́мпульсов дискретизации (Уолт Кестер) .....</b>	<b>496</b>
Введение .....	496
Фазовый шум и дрожание генератора .....	499
«Гибридные» генераторы частоты .....	506
Подключение дифференциальных входов синхронизации .....	507
Выводы по тактированию выборок .....	509
<i>Список литературы к 6.5. Формирование синхрои́мпульсов дискретизации .....</i>	<i>509</i>
<b>Глава 7. СХЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАННЫХ .....</b>	<b>511</b>
<b>7.1. Источники опорного напряжения (Уолт Джанг, Уолт Кестер, Джеймс Брайант) .....</b>	<b>511</b>
Прецизионные источники опорного напряжения .....	511
Типы источников опорного напряжения .....	512
ИОН с напряжением запрещенной зоны .....	514
ИОН на заглубленных стабилитронах .....	520
ИОН XFET® .....	521
Характеристики ИОН .....	525
<i>Список литературы к 7.1. Источники опорного напряжения .....</i>	<i>536</i>
<b>7.2. Линейные стабилизаторы с малым падением напряжения (Уолт Джанг) .....</b>	<b>537</b>
Введение .....	537
Основы линейных стабилизаторов напряжения .....	538
Проходные элементы, их преимущества и недостатки .....	540
Архитектуры стабилизаторов с малым падением напряжения .....	545
Семейство стабилизаторов с малым падением напряжения ануСАР® .....	549
Контроллеры LDO-стабилизаторов .....	560
<i>Список литературы к 7.2. Линейные стабилизаторы с малым падением напряжения .....</i>	<i>569</i>
<b>7.3. Аналоговые ключи и мультиплексоры (Уолт Кестер) .....</b>	<b>569</b>
Введение .....	569
Основы КМОП-ключей .....	571
Источники ошибок в КМОП-ключаях .....	573
Применение аналоговых ключей .....	580
КМОП-ключи с полосой 1 ГГц .....	584

Видеоключи и мультиплексоры .....	585
Видео кросс-коммутаторы .....	588
Цифровые коммутаторы .....	588
Семейства ключей и мультиплексоров производства Analog Devices .....	589
Паразитное защелкивание в КМОП-ключаях и мультиплексорах .....	590
<b>7.4. Схемы выборки и хранения (Уолт Кестер) .....</b>	<b>594</b>
Введение и исторический обзор .....	594
Основные принципы работы УВХ .....	596
Характеристики режима слежения .....	597
Характеристики режима перехода от выборки к хранению .....	598
Характеристики режима хранения .....	602
Характеристики в режиме перехода от хранения к выборке .....	605
Архитектуры УВХ .....	605
Внутренние УВХ ИС АЦП .....	608
Применение УВХ .....	611
<i>Список литературы к 7.4. Схемы выборки и хранения .....</i>	<i>613</i>
<b>Глава 8. ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАННЫХ .....</b>	<b>615</b>
<b>8.1. Прецизионные измерения и преобразование сигналов датчиков .....</b>	<b>615</b>
Введение .....	615
Применение прецизионных измерительных $\Sigma$ - $\Delta$ АЦП .....	616
Анализ проекта весов на базе AD7730 .....	620
Термопара с AD7793 .....	626
Прямые цифровые измерения температуры .....	628
Датчики температуры микропроцессорных подложек .....	633
Применение АЦП в ваттметрах .....	636
<i>Список литературы к 8.1. Прецизионные измерения и преобразование сигналов датчиков .....</i>	<i>639</i>
<b>8.2. Многоканальные системы сбора данных (Уолт Кестер) .....</b>	<b>639</b>
Конфигурации систем сбора данных .....	639
Мультиплексирование .....	640
Фильтрация в системах сбора данных .....	643
Системы сбора данных на кристалле .....	646
Мультиплексирование входов $\Sigma$ - $\Delta$ АЦП .....	648
Системы с одновременной выборкой .....	651
Системы распределения данных .....	653
Распределение данных при помощи схем с выборкой и бесконечным хранением .....	658
<i>Список литературы к 8.2. Многоканальные системы сбора данных .....</i>	<i>661</i>
<b>8.3. Цифровые потенциометры (Уолт Кестер, Уолт Хайнцер) .....</b>	<b>661</b>
Введение .....	661
Современные цифровые потенциометры в миниатюрных корпусах .....	663
Цифровые потенциометры с энергонезависимой памятью .....	664
Однократно программируемые (ОТР) цифровые потенциометры .....	665
Характеристики цифровых потенциометров по переменному току .....	667
Примеры применения .....	668
Резюме .....	669
<i>Список литературы к 8.3. Цифровые потенциометры .....</i>	<i>670</i>
<b>8.4. Цифровой звук (Уолт Кестер) .....</b>	<b>671</b>
Введение .....	671
Требования к частоте дискретизации и $THD + N$ для цифрового звука .....	673
Общие тенденции в аудио АЦП и ЦАП .....	676
Речевые кодеки .....	678
Высококачественные аудио АЦП и ЦАП в раздельных корпусах .....	679

Высококачественные многоканальные аудиокодеки и аудио ЦАП .....	683
Преобразователи частоты дискретизации .....	684
<i>Список литературы к 8.4. Цифровой звук</i> .....	687
8.5. Цифровое видео и цифровая электроника дисплеев ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	687
Цифровое видео .....	687
Электронные компоненты дисплеев .....	697
Электроника плоских дисплеев .....	703
Электроника ПЗС .....	706
Устройства оцифровки сенсорных экранов .....	712
<i>Список литературы к 8.5. Цифровое видео и цифровая электроника дисплея</i> .....	716
8.6. Программное радио и дискретизация на промежуточной частоте ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	717
Введение .....	717
Развитие беспроводного радио .....	718
АЦП с дискретизацией на ПЧ в режиме разделения во времени с цифровыми пост-процессорами ( <i>Марк Луни</i> ) .....	758
<i>Список литературы к 8.6. Программное радио и дискретизация на промежуточной частоте</i> .....	767
8.7. Прямой цифровой синтез ( <i>Уолт Кестер</i> ) .....	769
Введение в технологию <i>DDS</i> .....	769
Наложение в <i>DDS</i> -системах .....	774
Частотное планирование в <i>DDS</i> -системах .....	775
Современные интегрированные <i>DDS</i> -системы .....	777
<i>Список литературы к 8.7. Прямой цифровой синтез</i> .....	785
8.8. Прецизионные аналоговые микроконтроллеры ( <i>Грэйсон Кинг</i> ) .....	786
Введение .....	786
Характеристики семейства микроконвертеров .....	787
Некоторые примеры применения $\Sigma$ - $\Delta$ -микроконвертеров .....	793
Микроконвертеры ADuC7xxx на базе ядра процессора ARM7 <sup>T</sup> .....	797
<i>Список литературы к 8.8. Прецизионные аналоговые микроконтроллеры</i> .....	800
<b>Глава 9. МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТУРЫ</b> .....	801
9.1. Пассивные компоненты ( <i>Джеймс Брайант, Уолт Джанг, Уолт Кестер</i> ) .....	801
Введение .....	801
Конденсаторы .....	802
Резисторы и потенциометры .....	811
Индуктивность .....	821
<i>Список литературы к 9.1. Пассивные компоненты</i> .....	827
9.2. Вопросы конструирования печатных плат ( <i>Джеймс Брайант, Уолт Кестер, Уолт Джанг</i> ) .....	828
Сопrotивление проводников .....	829
Падение напряжения на сигнальных проводниках — обратная связь Кельвина .....	830
Обратные сигнальные токи .....	831
Заземление в системах со смешанными аналого-цифровыми сигналами ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант, Майк Бирн</i> ) .....	833
Некоторые общие правила разводки ПП для систем со смешанными сигналами .....	849
Скин-эффект .....	851
Линии передачи (длинные линии) .....	852
Будьте внимательны к разрывам в заземляющих поверхностях .....	853
Методы изоляции заземления .....	854

Статические эффекты ПП .....	857
Динамические эффекты ПП .....	862
<i>Список литературы к 9.2. Вопросы конструирования печатных плат</i> .....	867
9.3. Системы «аналогового» питания ( <i>Уолт Джанг, Уолт Кестер</i> ) .....	868
ИС линейных стабилизаторов .....	869
Некоторые основы линейных стабилизаторов напряжения .....	870
Проходные элементы .....	872
$\pm 15$ В стабилизатор на базе ИС с регулируемым напряжением .....	873
Архитектуры стабилизаторов с низким падением напряжения .....	874
Преобразователи напряжения с подкачкой заряда .....	879
Преобразователи напряжения на принципе подкачки зарядов со стабилизированным выходом .....	881
Линейные постстабилизаторы для импульсных источников питания .....	882
Заземление линейных и импульсных стабилизаторов .....	884
Снижение шумов и фильтрация напряжения источника питания .....	887
<i>Список литературы к 9.3. Системы «аналогового» питания</i> .....	898
9.4. Защита от перенапряжения ( <i>Уолт Джанг, Уолт Кестер, Джеймс Брайант, Джо Бакстон, Вес Фримэн</i> ) .....	899
Защита от внутрисхемного перенапряжения .....	899
Защита от внесхемного перенапряжения .....	924
<i>Список литературы к 9.4. Защита от перенапряжения</i> .....	931
9.5. Управление тепловым режимом ( <i>Уолт Джанг</i> ) .....	932
Основные тепловые характеристики .....	933
Отвод тепла .....	934
<i>Список литературы к 9.5. Управление тепловым режимом</i> .....	943
9.6. Вопросы электромагнитных/радиочастотных помех ( <i>Джеймс Брайант, Уолт Джанг, Уолт Кестер</i> ) .....	944
Механизмы электромагнитных/радиочастотных помех .....	945
<i>Список литературы к 9.6. Вопросы электромагнитных/радиочастотных помех</i> .....	982
9.7. Интерфейс с низковольтной логикой ( <i>Уолт Кестер, Этан Бордо, Йоханнес Хорват, Кэтрин Редмонд, Ева Мерфи</i> ) .....	984
Устойчивость к повышенному напряжению и совместимость по напряжению ...	988
Соединение 5-вольтовых и 3,3-вольтовых систем с помощью «шинных переключателей» на <i>n</i> -МОП полевых транзисторах .....	989
Интерфейс между логиками с питанием 3,3 и 2,5 В .....	992
Интерфейсы 3,3 В/2,5 В; 3,3 В/1,8 В; 2,5 В/1,8 В .....	994
Применение шинных переключателей для горячей замены и горячего подключения .....	997
Устойчивость и совместимость по напряжению, обеспечиваемая внутренними средствами схемы .....	998
<i>Список литературы к 9.7. Интерфейс с низковольтной логикой</i> .....	1000
9.8. Макетирование и создание прототипов ( <i>Уолт Кестер, Джеймс Брайант, Уолт Джанг</i> ) .....	1000
Создание прототипов — «мертвых жуков» .....	1001
Макетирование на Solder-Mount .....	1004
Создание прототипов на фрезерованных ПП .....	1005
Остерегайтесь панелек! .....	1007
Некоторые дополнительные вопросы, касающиеся создания прототипов .....	1008
Оценочные платы .....	1008
Оценочные платы общего назначения для операционных усилителей в середине 1990-х годов .....	1009
Резюме .....	1014
<i>Список литературы к 9.8. Макетирование и создание прототипов</i> .....	1015