

В.И. Лачин, Н.С. Савелов

ЭЛЕКТРОНИКА

ВЫСШЕЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



Высшее образование

В. И. Лачин, Н. С. Савёлов

ЭЛЕКТРОНИКА

*Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебного пособия
для студентов высших технических учебных заведений*

Издание пятое, переработанное и дополненное

Ростов-на-Дону
«Феникс»
2005

УДК 621.38 (075.8)

ББК 32.85

Л 31

Рецензенты:

кафедра автоматике и компьютерных систем Томского политехнического университета (зав. кафедрой д.т.н., проф. Г. П. Цапко);

зав. кафедрой автоматике и управления в технических системах Самарского государственного технического университета д.т.н., проф. Э. Я. Рапопорт

Лачин В. И., Савёлов Н. С.

Л 31 **Электроника: Учеб. пособие / В. И. Лачин, Н. С. Савёлов. — 5-е изд., перераб. и доп. — Ростов н/Д: Феникс, 2005. — 704 с. — (Высшее образование).**

ISBN 5-222-07025-5

В учебном пособии рассмотрены все основные, включая силовые, полупроводниковые приборы и наиболее широко используемые устройства аналоговой, цифровой и силовой электроники. Описаниям характеристик и параметров приборов предшествуют необходимые сведения по физическим явлениям, учитываемые при математическом моделировании. Изучаемый материал ориентирован на практическое применение.

Предназначено для студентов высших технических учебных заведений.

УДК 621.38 (075.8)

ББК 32.85

ISBN 5-222-07025-5

© Лачин В. И., Савёлов Н. С., 2005

© Оформление, изд-во «Феникс», 2005

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
Введение	6
1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ	11
1.1. Полупроводниковые диоды	11
1.1.1. Краткое описание полупроводниковых материалов ...	11
1.1.2. Устройство и основные физические процессы	13
1.1.3. Характеристики и параметры полупроводникового диода	29
1.1.4. Использование вольт-амперной характеристики диода для определения его режима работы	36
1.1.5. Математические модели диодов и их использование для анализа электронных схем	38
1.1.6. Разновидности полупроводниковых диодов	41
1.1.7. Классификация и система обозначений	49
1.2. Биполярные транзисторы	54
1.2.1. Устройство и основные физические процессы	55
1.2.2. Характеристики и параметры	59
1.2.3. Математические модели биполярного транзистора ...	70
1.2.4. Анализ схем с транзисторами	76
1.2.5. Три схемы включения транзистора с ненулевым сопротивлением нагрузки	79
1.2.6. h -параметры транзистора	82
1.2.7. Временные диаграммы токов транзистора при его вхождении в активный режим работы и частотные (динамические) свойства	84
1.2.8. Классификация и система обозначений	87
1.3. Полевые транзисторы	90
1.3.1. Устройство и основные физические процессы	91
1.3.2. Характеристики и параметры	94
1.3.3. Математические модели полевого транзистора	101
1.3.4. Разновидности полевых транзисторов	104
1.3.5. Применение принципа полевого транзистора	110
1.4. Тиристоры	113
1.4.1. Устройство и основные физические процессы	113
1.4.2. Характеристики	119
1.4.3. Графический анализ схем с тиристорами	121
1.4.4. Классификация и система обозначений	122
1.5. Оптоэлектронные приборы	125



1.5.1. Общая характеристика оптоэлектронных приборов	125
1.5.2. Излучающий диод (светодиод)	126
1.5.3. Фоторезистор	131
1.5.4. Фотодиод	133
1.5.5. Фототранзистор и фототиристор	136
1.5.6. Оптрон (оптопара)	137
1.5.7. Разновидности индикаторов	138
1.6. Операционные усилители	140
1.6.1. Краткое описание операционного усилителя	141
1.6.2. Передаточная характеристика	144
1.6.3. Влияние различных факторов на выходное напряжение операционного усилителя	148
1.6.4. Амплитудно-частотная, фазочастотная характеристики операционного усилителя и его эквивалентная схема	151
1.7. Интегральные микросхемы	154
1.8. Силовые (мощные) полупроводниковые приборы	157
1.8.1. Силовые (мощные) биполярные транзисторы	157
1.8.2. Силовые (мощные) полевые транзисторы	172
1.8.3. IGBT – биполярный транзистор с изолированным затвором	181
1.8.4. SIT – транзистор со статической индукцией	189
1.8.5. Сравнительная характеристика силовых полупроводниковых приборов	193
2. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА	196
2.1. Классификация, основные параметры и характеристики усилителей	196
2.2. Обратная связь в усилителях	204
2.2.1. Классификация обратных связей в усилителях	205
2.2.2. Анализ влияния отрицательной обратной связи на примере последовательной обратной связи по напряжению	206
2.2.3. Разновидности отрицательных обратных связей и анализ их влияния	215
2.3. Усилители на биполярных транзисторах	217
2.3.1. Режимы работы транзистора в усилителе	217
2.3.2. Усилитель с эмиттерной стабилизацией	222
2.4. Усилители на полевых транзисторах	232
2.5. Линейные схемы на основе операционных усилителей (ОУ)	233



2.5.1. Инвертирующий усилитель на основе ОУ	235
2.5.2. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ	237
2.5.3. Повторитель напряжения на основе ОУ	240
2.5.4. Сумматор напряжений (инвертирующий сумматор)	241
2.5.5. Вычитающий усилитель (усилитель с дифференциальным входом)	242
2.5.6. Схемы с диодами и стабилитронами на основе ОУ	244
2.6. Усилители постоянного тока	246
2.6.1. Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах	249
2.6.2. Усилитель постоянного тока с модуляцией и демодуляцией (усилитель типа МДМ)	254
2.7. Усилители мощности (мощные выходные усилители)	256
2.7.1. Трансформаторные усилители мощности	260
2.7.2. Бестрансформаторные усилители мощности	264
2.8. Активные фильтры	267
2.8.1. Общее математическое описание фильтров	269
2.8.2. Классификация фильтров по виду их амплитудно-частотных характеристик	276
2.8.3. Классификация фильтров по особенностям полиномов, входящих в передаточные функции	281
2.8.4. Особенности проектирования активных фильтров	283
2.8.5. Схемы активных фильтров	284
2.9. Генераторы гармонических колебаний	287
2.9.1. RC-генераторы с мостом Вина	289
2.9.2. Кварцевые генераторы	293
2.10. Вторичные источники питания	295
2.10.1. Выпрямители	298
2.10.2. Сглаживающие фильтры	307
2.10.3. Стабилизаторы напряжения	313
2.10.4. Инверторы, умножители напряжения и управляемые выпрямители	322
3. ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	327
3.1. Импульсный режим работы и цифровое представление преобразуемой информации	327
3.1.1. Описание импульсных сигналов	328
3.1.2. Анализ переходных процессов (динамических режимов) в импульсных схемах	331



3.1.3. Цифровое представление преобразуемой информации и логические состояния. Аналоговые и цифровые ключи	335
3.1.4. Цифровые ключи на биполярных транзисторах	338
3.1.5. Ненасыщенные цифровые ключи на биполярных транзисторах	345
3.1.6. Аналоговые коммутаторы (аналоговые ключи) на биполярных транзисторах	347
3.1.7. Ключи на полевых транзисторах	353
3.2. Логические функции и алгебра логики (булева алгебра)	361
3.2.1. Логические функции и способы их записи	361
3.2.2. Основы алгебры логики	366
3.2.3. Минимизация логических функций	367
3.2.4. Реализация логических функций	375
3.2.5. Особенности построения логических устройств	380
3.3. Логические элементы	384
3.3.1. Классификация и основные параметры	384
3.3.2. Особенности выходных каскадов цифровых микросхем	387
3.3.3. Преобразователи уровня сигналов и шинные формирователи	390
3.3.4. Схемотехника логических элементов различных логик	394
3.3.5. Сравнительные характеристики логических элементов и их особенности	404
3.4. Комбинационные цифровые устройства	407
3.4.1. Шифраторы, дешифраторы и преобразователи кодов	407
3.4.2. Мультиплексоры и демультиплексоры	419
3.4.3. Сумматоры	429
3.4.4. Цифровые компараторы	435
3.5. Последовательностные цифровые устройства	437
3.5.1. Триггеры	437
3.5.2. Счетчики импульсов	450
3.5.3. Регистры	458
3.6. Цифровые запоминающие устройства	464
3.6.1. Общая характеристика устройств	464
3.6.2. Структуры запоминающих устройств	465
3.6.3. Оперативные запоминающие устройства	469
3.6.4. Постоянные запоминающие устройства	472

3.6.5. Флэш-память	480
3.6.6. Использование ПЗУ для реализации цифровых устройств	481
3.7. Программируемые логические интегральные схемы	484
3.7.1. Основные сведения, классификация и области применения	484
3.7.2. Программируемые логические матрицы	487
3.7.3. Программируемая матричная логика	492
3.7.4. Базовые матричные кристаллы	493
3.7.5. Программируемые вентиляемые матрицы	495
3.7.6. Программируемые коммутируемые матричные блоки	498
3.7.7. ПЛИС комбинированной архитектуры и типа «система на кристалле»	501
3.8. Арифметические устройства	504
3.8.1. Последовательный сумматор	504
3.8.2. Накапливающий сумматор	506
3.8.3. Двоичные умножители	508
3.8.4. Двоичное деление	514
3.8.5. Арифметико-логическое устройство	514
3.9. Устройства для ограничения и аналого-цифрового преобразования сигналов	520
3.9.1. Амплитудные ограничители	520
3.9.2. Цифроаналоговые преобразователи	530
3.9.3. Аналого-цифровые преобразователи	540
3.9.4. Устройства выборки и хранения аналоговых сигналов	560
3.10. Генераторы импульсных сигналов	565
3.10.1. Генераторы прямоугольных импульсов	565
3.10.2. Генераторы линейно изменяющегося напряжения	576
3.11. Формирователи импульсов	588
3.11.1. Триггер Шмитта	588
3.11.2. Устройства задержки импульсов	593
3.11.3. Формирователи импульсов по длительности	595
4. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	599
4.1. Силовая электроника в современном мире	599
4.2. Общие подходы к построению силовых электронных устройств	604



4.3. Бесконтактные переключающие устройства (прерыватели)	616
4.3.1. Прерыватели переменного тока	616
4.3.2. Прерыватели постоянного тока	629
4.4. Управляемые выпрямители	633
4.4.1. Управляемый однофазный мостовой выпрямитель ...	634
4.4.2. Управляемый трехфазный мостовой выпрямитель	641
4.5. Инверторы	649
4.5.1. Однофазный мостовой автономный параллельный инвертор тока	651
4.5.2. Зависимые инверторы	656
4.5.3. Автономные инверторы напряжения на IGBT	658
4.6. Преобразователи частоты	664
4.6.1. Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока	665
4.6.2. Преобразователи частоты с непосредственной связью	667
4.7. Преобразователи постоянного напряжения (импульсные преобразователи напряжения)	669
4.7.1. Общее описание преобразователей постоянного напряжения	669
4.7.2. Основные схемотехнические решения, использующиеся в преобразователях постоянного напряжения	671
4.8. Системы управления и защиты устройств силовой электроники	676
5. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ	680
5.1. Вводные сведения по математическому моделированию электронных устройств	680
5.2. Особенности математического моделирования различных режимов работы электронных устройств	683
5.3. Уровень современных систем математического моделирования электронных устройств	690
5.4. Влияние развития математического моделирования на характер труда разработчика электронных устройств	693
Литература	697