

УДК 621.375

ББК 32.846

П27

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент кафедры «Систем автоматизированного проектирования» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана *В. А. Мартынюк*; доктор техн. наук, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» Рязанского государственного университета им. С. А. Есенина *В. Н. Ручкин*

Перепелкин Д. А.

П27 Схемотехника усилительных устройств. Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 240 с: ил.

ISBN 978-5-9912-0456-9.

Рассмотрены теоретические и практические аспекты разработки и проектирования современных усилительных устройств. Приведены способы математического описания их работы, а также основы анализа и синтеза устройств с заданными техническими характеристиками и параметрами.

Для студентов, обучающихся по направлению 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника», а также специалистов в области разработки и проектирования радиоэлектронных устройств.

ББК 32.846

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

ISBN 978-5-9912-0456-9

© Д. А. Перепелкин, 2020

© Издательство «Горячая линия – Телеком», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
ГЛАВА 1. Биполярные транзисторы	5
1.1. Принцип работы биполярного транзистора	6
1.2. Условное обозначение биполярного транзистора	9
1.3. Режимы работы биполярных транзисторов	11
1.4. Схемы включения биполярных транзисторов	12
1.5. Характеристики и параметры биполярных транзисторов	13
1.5.1. Схема транзистора с ОБ	13
1.5.2. Схема транзистора с ОЭ	15
1.5.3. Схема транзистора с ОК	17
1.6. Статические характеристики биполярных транзисторов	18
1.6.1. ВАХ транзистора с ОБ	18
1.6.2. ВАХ транзистора с ОЭ	21
1.7. Усилительные свойства и эквивалентные схемы БТ	25
1.7.1. Схема включения транзистора с ОБ	25
1.7.2. Схема включения транзистора с ОЭ	27
1.7.3. Схема включения транзистора с ОК	29
1.8. h -параметры биполярных транзисторов	32
1.8.1. h -параметры биполярного транзистора с ОБ	33
1.8.2. h -параметры биполярного транзистора с ОЭ	35
ГЛАВА 2. Полевые транзисторы	37
2.1. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом	37
2.1.1. Принцип работы ПТУП	38
2.1.2. ВАХ ПТУП	40
2.1.3. Эквивалентная схема ПТУП	44
2.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором	45
2.2.1. Конструкция МОП-транзистора с встроенным n -каналом	46
2.2.2. Конструкция МОП-транзистора с встроенным p -каналом	46
2.2.3. Принцип работы МОП-транзистора с встроенным каналом	47
2.2.4. ВАХ n -канального МОП-транзистора с встроенным каналом	48
2.2.5. ВАХ p -канального МОП-транзистора с встроенным каналом	49
2.2.6. Конструкция МОП-транзистора с индуцированным n -каналом	50

2.2.7. Конструкция МОП-транзистора с индуцированным p -каналом	51
2.2.8. Принцип работы МОП-транзистора с индуцированным каналом	52
2.2.9. ВАХ n -канального МОП-транзистора с индуцированным каналом	52
2.2.10. ВАХ p -канального МОП-транзистора с индуцированным каналом	53
ГЛАВА 3. Усилители	55
3.1. Классификация усилителей	55
3.2. Основные параметры и характеристики усилителей	57
3.2.1. Коэффициент усиления	57
3.2.2. Входное и выходное сопротивление усилителя	58
3.2.3. Частотные характеристики усилителей	58
3.2.4. Нелинейные искажения усилителя	60
3.2.5. Динамический диапазон сигнала	62
3.2.6. Искажение импульсных сигналов	62
3.3. Усилительные каскады на транзисторах	63
3.3.1. Режимы работы усилительных каскадов	65
3.3.2. Классы усилительных каскадов	66
3.4. Расчет усилительного каскада класса A по постоянному току	75
3.5. Динамический режим работы усилительного каскада	78
3.6. Стабильность рабочей точки усилительного каскада	83
3.7. Практические схемы термостабилизации рабочей точки усилительного каскада	84
3.7.1. Термостабилизация с помощью терморезистора	84
3.7.2. Термостабилизация с помощью диода	85
3.7.3. Эмиттерная термостабилизация	87
ГЛАВА 4. Обратная связь в усилителях	91
4.1. Классификация ОС	91
4.2. Свойства усилителей, охваченных цепью ОС	93
4.2.1. Коэффициент усиления усилителя, охваченного цепью ОС	93
4.2.2. Стабильность коэффициента усиления усилителя с ООС	95
4.2.3. Входное сопротивление усилителя с ООС	96
4.2.4. Влияние ООС на полосу пропускания усилителя	97
4.2.5. Устойчивость усилителей с ОС	98

ГЛАВА 5. Частотные характеристики усилительных каскадов	101
5.1. Частотные характеристики усилительного каскада с ОЭ	101
5.1.1. Частотные характеристики усилительного каскада с ОЭ в области средних частот	102
5.1.2. Частотные характеристики усилительного каскада с ОЭ в области низких частот	106
5.1.3. Частотные характеристики усилительного каскада с ОЭ в области высоких частот	109
5.1.4. Обобщенная АЧХ и ФЧХ каскада с ОЭ	110
5.2. Частотные характеристики усилительного каскада с ОБ	116
5.2.1. Частотные характеристики усилительного каскада с ОБ в области средних частот	117
5.2.2. Частотные характеристики усилительного каскада с ОБ в области низких частот	120
5.2.3. Частотные характеристики усилительного каскада с ОБ в области высоких частот	120
5.3. Частотные характеристики усилительного каскада с ОК	122
5.3.1. Частотные характеристики усилительного каскада с ОК в области средних частот	123
5.3.2. Частотные характеристики усилительного каскада с ОК в области низких частот	127
5.3.3. Частотные характеристики усилительного каскада с ОК в области высоких частот	127
ГЛАВА 6. Дифференциальный каскад	130
6.1. Назначение и основные особенности ДК	130
6.2. Анализ параметров ДК	133
6.3. ДК с ГСТ на полевом транзисторе	139
6.4. Входное сопротивление ДК	140
6.5. Схемотехнические меры повышения входного сопротивления ДК	142
ГЛАВА 7. Операционный усилитель	146
7.1. Назначение и обозначение ОУ на схемах	146
7.2. Принципиальная схема ОУ	147
7.3. Выходной каскад ОУ	151
7.4. Основные параметры ОУ	154
7.5. Применение ОУ в линейном режиме с обратными связями (решающие усилители)	155
7.6. Идеальный ОУ	155

7.7. Инвертирующий усилитель напряжения	158
7.8. Схема дифференцирования входного сигнала.....	158
7.9. Схема интегрирования входного сигнала	160
7.10. Сумматор напряжений на ОУ	164
7.11. Неинвертирующий усилитель напряжения.....	166
7.12. Схема вычитания напряжений.....	168
ГЛАВА 8. Фильтры	172
8.1. Классификация и основные параметры фильтров.....	172
8.2. Пассивные фильтры	172
8.2.1. Фильтры нижних частот	172
8.2.2. Фильтры верхних частот	174
8.2.3. Режекторный фильтр на основе 2Т-образного моста	175
8.3. Активные фильтры первого порядка.....	176
8.3.1. Активный ФНЧ первого порядка на основе неинвертирующего ОУ	176
8.3.2. Активный ФНЧ первого порядка на основе инвертирующего ОУ	177
8.3.3. Активный ФВЧ первого порядка на основе инвертирующего ОУ	177
8.4. Активные фильтры второго порядка.....	178
8.4.1. Обобщенное описание ФНЧ	178
8.4.2. Обобщенное описание ФВЧ.....	179
8.4.3. ФНЧ второго порядка с ООС (структура Рауха).....	179
8.4.4. ФНЧ второго порядка с ПОС (структура Саллен–Ки)	180
8.4.5. ФВЧ второго порядка с ООС (структура Рауха).....	181
8.4.6. ФВЧ второго порядка с ПОС (структура Саллен–Ки)	182
8.4.7. Активный резонансный (узкополосный) фильтр на основе 2Т-образного моста	182
8.4.8. Активный режекторный фильтр на основе 2Т-образного моста	184
8.4.9. Активный полосовой фильтр	184
8.5. Активные фильтры третьего порядка.....	186
ГЛАВА 9. Проектирование усилительных устройств.....	187
9.1. Цели и тематика курсового проектирования	187
9.1.1. Тематика курсового проектирования	187
9.2. Методические указания по выполнению курсового проектирования.....	190

9.2.1. Расчет коэффициента усиления по напряжению усилителя.....	190
9.2.2. Статический и динамический режимы работы усилительных каскадов	193
9.2.3. Расчет промежуточного (входного) каскада усилителя	210
9.2.4. Расчет емкостных элементов усилителя.....	213
9.2.5. Расчет коэффициента усиления многокаскадного усилителя	213
9.2.6. Расчет цепи обратной связи	214
9.3. Моделирование усилителя переменного сигнала.....	215
9.3.1. Моделирование выходного каскада.....	215
9.3.2. Моделирование усилителя без ООС.....	218
9.3.3. Моделирование усилителя с ООС	219
9.4. Построение характеристики $M_{OC}(\omega)$	220
9.5. Построение ВАХ транзистора в пакете Micro-Cap.....	221
9.6. Пример моделирования в пакете Micro-Cap	222
Заключение.....	231
Список литературы	233