

Схемотехника современных усилителей

Искусство проектирования аудиоусилителей издавна привлекает внимание и радиолюбителей, и профессионалов. Может показаться, что работа, которую при этом требуется выполнить, довольно проста, но для создания надежного высококачественного усилителя разработчик должен привлечь весь багаж своих знаний в области электроники. К сожалению, информация по вопросам проектирования усилителей мощности звуковых частот разрозненна и зачастую труднодоступна. Данная книга поможет читателю восполнить этот недостаток. В ней рассматриваются вопросы минимизации искажений и повышения линейности усиления, затрагиваются проблемы, связанные с проектированием усилителей, такие как надежность, обеспечение стабильным питанием, защита от перегрузок и т.п. Приведен уникальный материал по режимам работы на реактивную нагрузку, необычным способам компенсации искажений и др. Обсуждаемые вопросы снабжены подробными ссылками на справочные издания, призванные помочь читателю в дальнейшем исследовании в области проектирования УМЗЧ.

Издание предназначено разработчикам аудиоаппаратуры, квалифицированным радиолюбителям, а также может быть полезно студентам старших курсов радиотехнических специальностей вузов и всем читателям, интересующимся современной аудиоэлектроникой.

Internet-магазин: www.aliants-kniga.ru

Книга – почтой:

Россия, 123242, Москва, а/я 20
e-mail: books@aliants-kniga.ru

Оптовая продажа: «Альянс-книга»

Тел./факс: (495) 258-9195
e-mail: books@aliants-kniga.ru

АМК
издательство

ISBN 978-5-94074-701-7



9 785940 747017

АМК
издательство

АМК
издательство

схемотехника современных усилителей

Дуглас Селф

Douglas Self

Audio Power Amplifier Design Handbook

Third Edition



Дуглас Селф

Схемотехника современных усилителей



Москва, 2011

УДК 004.4
ББК 32.844я75
С29

Дуглас Селф

Схемотехника современных усилителей. – М.: ДМК Пресс, 2011.– 536 с.: ил.

С29

ISBN 978-5-94074-702-4

Искусство проектирования аудиоусилителей издавна привлекает внимание и радиолюбителей, и профессионалов. Может показаться, что работа, которую при этом требуется выполнить, довольно проста, но для создания надежного высококачественного усилителя разработчик должен привлечь весь багаж своих знаний в области электроники. К сожалению, информация по вопросам проектирования усилителей мощности звуковых частот разрознена и зачастую труднодоступна. Данная книга поможет читателю восполнить этот недостаток. В ней рассматриваются вопросы минимизации искажений и повышения линейности усиления, затрагиваются проблемы, связанные с проектированием усилителей, такие как надежность, обеспечение стабильным питанием, защита от перегрузок и т.п. Приведен уникальный материал по режимам работы на реактивную нагрузку, необычным способам компенсации искажений и др. Обсуждаемые вопросы снабжены подробными ссылками на справочные издания, призванные помочь читателю в дальнейшем исследовании в этой области.

Издание предназначено разработчикам аудиоаппаратуры, квалифицированным радиолюбителям, а также может быть полезно студентам старших курсов радиотехнических специальностей и всем читателям, интересующимся современной аудиоэлектроникой.

Селф Дуглас

Схемотехника современных усилителей

Главный редактор

dm@dmk-press.ru

Д. А. Мовчан

Перевод

Верстка

Корректор

Обложка

В. А. Гордеев

М. М. Селемев

Л. В. Кикава

А. Г. Мовчан

Подписано в печать 14.02.2011. Формат 70х100 1/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 12. Тираж 500 экз.

Издательство ДМК Пресс www.dmk-press.ru

ISBN 0-7506-5636-0 (англ.)

ISBN 978-5-94074-702-4 (рус.)

© Copyright © Douglas Self

© Перевод на русский язык, оформление,
издание, ДМК Пресс, 2011

Содержание

Предисловие	10
Глава 1. Общие сведения о УМЗЧ	12
1.1. Экономическая важность УМЗЧ	12
1.2. Обращение к читателю	12
1.3. Цели и источники	13
1.4. Исследования в области проектирования УМЗЧ	14
1.5. Распространенные заблуждения	16
1.6. Показатели качества аудиоусилителей	32
1.7. Используемые сокращения	37
1.8. Список использованных источников	38
Глава 2. История, архитектура и отрицательная обратная связь	40
2.1. Краткая историческая справка	40
2.2. Архитектура усилителей	41
2.3. Классы усиления	43
2.4. Варианты класса В	48
2.5. Усилители переменного сигнала и усилители постоянного тока	51
2.6. Отрицательная обратная связь в УМЗЧ	54
2.7. Несколько распространенных заблуждений по поводу ООС	56
2.8. ООС и стабильность усилителя	60
2.9. Максимизация глубины ООС	68
2.10. Максимизация линейности усилителя при разомкнутой ООС	70
2.11. Список использованных источников	70
Глава 3. Общие сведения об усилителях мощности	72
3.1. Как работает усилитель	72
3.2. Преимущества типовой схемы	75
3.3. Восемь типов искажений	75
3.4. КНИ типового УМЗЧ	80

3.5. Линейность УМЗЧ с незамкнутым контуром ОС	80
3.6. Непосредственное измерение коэффициента усиления при разомкнутой ОС	80
3.7. Моделирование УМЗЧ	83
3.8. Концепция «безупречного усилителя»	84
3.9. Список использованных источников	85

Глава 4. Малосигнальные каскады предварительного усиления

4.1. Роль входного каскада УМЗЧ	86
4.2. Искажения сигнала в первом каскаде УМЗЧ	88
4.3. Биполярные или полевые транзисторы во входном каскаде	89
4.4. Сравнение однотранзисторного входного каскада с дифференциальным	90
4.5. Искажения сигнала во входном каскаде	91
4.6. Балансировка входного каскада	93
4.7. Токовое зеркало	95
4.8. Улучшение линейности входного каскада	97
4.9. Радикальные методы улучшения линейности входного каскада	99
4.10. Каскод во входном дифференциальном каскаде УМЗЧ	101
4.11. Снижение уровня шумов входного каскада	103
4.12. Постоянная составляющая выходного сигнала дифференциального усилителя	105
4.13. Максимальная скорость изменения выходного сигнала	107
4.14. Каскод усилителя напряжения	109
4.15. Искажения в каскаде усилителя напряжения	109
4.16. Схема усилителя напряжения	110
4.17. Искажения в каскаде усилителя напряжения	112
4.18. Линеаризация усилителя напряжения: активная нагрузка	113
4.19. Линеаризация усилителя напряжения	114
4.20. Буферирование	116
4.21. Сбалансированный усилитель напряжения	118
4.22. Ширина полосы пропускания при разомкнутой ООС	119
4.23. Управление шириной полосы пропускания при разомкнутой ООС	122
4.24. Заключение	122
4.25. Список использованных источников	123

Глава 5. Оконечный каскод I

5.1. Классы усиления	125
5.2. Искажения в выходном сигнале оконечного каскада	128
5.3. Спектр искажения «ступенька»	128
5.4. Схемотехника оконечных каскадов УМЗЧ	130
5.5. Нелинейные искажения в оконечном каскаде	141
5.6. Заключение	183
5.7. Список использованных источников	184

Глава 6. Выходной каскад II	185
6.1. Искажения номер 4: искажения, вызванные нагрузкой каскада усилителя напряжения	185
6.2. Искажения номер 5: искажения развязывающих (элементов) шин (питания)	188
6.3. Искажения номер 6: наведенные искажения	193
6.4. Искажения номер 7: искажения, связанные с точкой подключения обратной отрицательной обратной связи	195
6.5. Искажения номер 8: емкостные искажения	198
6.6. Пример конструкции: усилитель мощностью 50 Вт Класса В	201
6.7. Список использованных источников	211
Глава 7. Коррекция, скорость нарастания выходного напряжения и устойчивость	212
7.1. Частотная коррекция. Общие положения	212
7.2. Коррекция доминантного полюса	214
7.3. Коррекция на отставание по фазе	215
7.4. Влияние выходного каскада: инклюзивная коррекция Миллера	216
7.5. Вложенные петли обратной связи	217
7.6. Двухполюсная коррекция	219
7.7. Выходные цепи	223
7.8. Перекрестные помехи в выходном дросселе усилителя	239
7.9. Реактивная по характеру нагрузка и моделирование (нагрузки) громкоговорителя	245
7.10. Нагрузки громкоговорителей и выходные каскады	251
7.11. Увеличенные токи громкоговорителя	259
7.12. Неустойчивость усилителя	262
7.13. Быстродействие и скорость нарастания выходного напряжения в усилителе низкой частоты	265
7.14. Список использованных источников	279
Глава 8. Источники питания и коэффициент подавления источника питания (PSRR)	281
8.1. Принципиальные подходы к созданию источников питания	281
8.2. Подавление влияния шин питания в усилителях	290
8.3. Философия разработки проблемы коэффициента подавления шин источника питания, PSRR.	293
8.4. Подавление влияния плюсовой шины питания	294
8.5. Подавление минусовой шины источника питания	298
8.6. Список использованных источников	306
Глава 9. Усилители мощности Класса А	307
9.1. Предварительные замечания	307
9.2. Варианты схем усилителей Класса А и их эффективность	308
9.3. Выходной каскад усилителей Класса А	312

9.4. Схемы управления током в рабочей точке	320
9.5. Оригинальный метод управления током в рабочей точке	320
9.6. Схема усилителя Класса А	322
9.7. Трехмодальный усилитель	325
9.8. Полное комплексное сопротивление нагрузки и рабочий режим	328
9.9. Эффективность работы	328
9.10. О напряжении смещения при трехрежимной работе усилителя	337
9.11. Работа в режиме Класса А/АВ	338
9.12. Режим работы усилителя в классе В	342
9.13. Система переключения усилителя в различные классы работы	343
9.14. Тепловой расчет	344
9.15. Законченная схема Трехрежимного усилителя	346
9.16. Источник питания	349
9.17. Эксплуатационные параметры	351
9.18. Дополнительные возможности	351
9.19. Список использованных источников	353
Глава 10. Усилители мощности Класса G	354
10.1. Основы работы усилителя в классе G	355
10.2. Усилители Класса G с последовательной конфигурацией	356
10.3. Эффективность работы усилителя Класса G	358
10.4. Практические стороны дела	362
10.5. Требования к заданию напряжений смещения	363
10.6. Проблемы линейности последовательного усилителя Класса G	364
10.7. Статическая линейность	367
10.8. Практическая схема усилителя Класса G	370
10.9. Управление мало-сигнальными искажениями	370
10.10. Рабочие характеристики (эффективность)	377
10.11. Установление происхождения нового типа усилителя: Класс А + С	380
10.12. Добавление двухполюсной компенсации	383
10.13. Дальнейшие вариации на тему усилителя Класса G	385
10.14. Список использованных источников	386
ГЛАВА 11. Выходные каскады на полевых транзисторах	387
11.1. Характеристика мощных полевых транзисторов	387
11.2. Сравнение выходных каскадов на полевых и биполярных транзисторах	388
11.3. Биполярные транзисторы с изолированным затвором, IGBT	391
11.4. Выходные каскады на мощных полевых транзисторах	391
11.5. Мощные полевые и биполярные транзисторы: сравнение линейности характеристик	395
11.6. Полевые транзисторы в каскадах Класса А	396
11.7. Список использованных источников	399
Глава 12. Термокомпенсация и динамика передачи тепла	400
12.1. Почему условия, определяющие величину тока в рабочей точке, являются критичными	400

12.2. Точность, требуемая для эффективной тепловой компенсации	402
12.3. Основной метод температурной компенсации	408
12.4. Оценка погрешности напряжения смещения	410
12.5. Моделирование тепловых процессов	411
12.6. Моделирование выходного каскада на эмиттерных повторителях	412
12.7. Моделирование выходного каскада на паре, охваченной комплементарной обратной связью, CFP	424
12.8. Критерий абсолютной общей ошибки	426
12.9. Улучшенная температурная компенсация: каскад с эмиттерными повторителями	427
12.10. Вариант улучшенной компенсации для выходного каскада на паре, охваченной комплементарной обратной связью, CFP	433
12.11. Улучшенное месторасположения термодатчика	434
12.12. Определитель температуры р-п перехода	436
12.13. Контроль температуры р-п перехода, учитывающий динамику процесса	438
12.14. Заключение	440
12.15. Источники напряжения смещения с переменным значением температурного коэффициента	442
12.16. Реальная динамика тепловых процессов	451
12.17. Список использованных источников	457
Глава 13. Защита усилителя и громкоговорителей	458
13.1. Категории защиты усилителя	458
13.2. Защита от перегрузки	462
13.3. Ограничительные диоды	476
13.4. Защита от смещения по постоянной составляющей	477
13.5. Тепловая защита	489
13.6. Питание вспомогательных цепей	492
13.7. Список использованных источников	493
Глава 14. Заземление и некоторые другие практические вопросы	494
14.1. Использование печатных плат в схемах усилителей низкой частоты	494
14.2. Односторонние и двухсторонние печатные платы	498
14.3. Заземление усилителя	506
14.4. Контур заземления: как они действуют и как с ними управляться	508
14.5. Оборудование Классов I и II	515
14.6. Вопросы проектирования и конструкции оборудования	518
Глава 15. Тестирование, требования к безопасности	524
15.1. Тестирование оборудования, поиск неисправностей	524
15.2. Требования к безопасности	526

Предисловие

Искусство проектирования аудиоусилителей издавна привлекает внимание и радиолюбителей, и профессионалов. Может показаться, что работа, которую при этом требуется выполнить, довольно проста, но для создания надежного высококачественного усилителя разработчик должен привлечь весь багаж своих знаний в области электроники. К сожалению, информация по вопросам проектирования усилителей мощности звуковых частот труднодоступна, поэтому я надеюсь, что данная книга восполнит этот недостаток.

Далеко не все вопросы, касающиеся проектирования аудиоусилителей, получили серьезное научное исследование. Большая часть книги – результат моих собственных исследований, которые я был вынужден выполнить из-за недостатка опубликованной по этому вопросу информации.

В результате моей работы по изучению источников возникновения искажений усиленного сигнала – а это традиционно считается одной из самых трудных проблем при проектировании усилителей – были выявлены и отделены друг от друга несколько взаимодействующих механизмов генерации искажений, что позволило оценить и минимизировать вклад каждого из них с целью создания высококачественных усилителей классов А и В с предельно низким коэффициентом нелинейных искажений, что всего два-три года назад казалось еще невозможным. Предложенная методика проектирования аудиоусилителей, которая описана в этой книге, позволяет получать надежные результаты с использованием достаточно малого числа контуров отрицательной обратной связи и не повышает существенно стоимость проектируемых усилителей.

Проведенная работа приближает нас к понятию «безупречного усилителя», который мог бы служить своего рода эталоном качества усиления и к которому должен стремиться любой честный разработчик. Первым шагом на этом пути стал разработанный мною *трехрежимный усилитель* (названный так потому, что он может работать в любом из трех режимов А, В или АВ), подробно рассмотренный в главе 9.

Кроме вопросов минимизации искажений и повышения линейности усиления, в книге также затрагиваются и другие важные проблемы, связанные с проектированием усилителей, такие как надежность, обеспечение стабильным питанием, защита от перегрузок и т.п. Приведен уникальный материал по режимам работы на реактивную нагрузку, необычным способам компенсации искажений и многое другое. Обсуждаемые вопросы снабжены подробными ссылками на справочные издания, призванные помочь читателю в дальнейшем исследовании в этой области.

В аудиотехнике нередко вспыхивают различные споры, точнее было бы сказать, что это стало обычным явлением, и это несмотря на то, что, как правило, редко удается выявить достаточно серьезную основу для таких разногласий. Хотя искусство проектирования аудиоаппаратуры развивалось по многим направлениям, но и ему не удалось избежать внимания тех, кто испытывает склонность скорее к суевериям, чем к науке. При работе над книгой я всегда старался следовать туда, куда вели меня факты, а мой опыт музыканта-любителя и профессионального разработчика аудиоаппаратуры, а также мои исследования в области психологии и психофизиологии слухового восприятия привели меня к твердому заключению, что не существует аспектов, влияющих на качество воспроизведения звука, которые нельзя было бы объяснить, и что любая достаточно серьезная книга на эту тему должна быть основана на этой предпосылке.

Я приложил все усилия, чтобы информация, представленная в этой книге – и теория, и результаты моделирования, и экспериментальные измерения, – не отклонялась от истины, насколько это возможно. Правильность основных положений, приведенных здесь, подтверждается выпуском более чем 20000 высококачественных усилителей, произведенных за последние два года, – вряд ли какая-либо методика проектирования может надеяться получить более серьезную экспериментальную поддержку. Разумеется, автор признает свою ответственность за любые неточности, которые могут еще могут быть выявлены.

Я думаю, что эта книга будет полезна всем разработчикам аудиоаппаратуры, как любителям, так и профессионалам. Но более всего я надеюсь, что она окажет стимулирующее воздействие на других исследователей в этой области и поможет им расширить границы наших познаний в области аудиотехники.

Дуглас Селф