Morgan Jones

Valve Amplifiers

Third Edition

Морган Джонс

Ламповые усилители

Перевод с английского
под общей научной редакцией к.т.н. доц. Иванюшкина Р. Ю.

ДМК
ПРЕСС

УДК 621.375.132
ББК 32.846.6
М79

Джонс Морган
М79 Ламповые усилители / пер. с англ.; под общ. научной ред. к.т.н. доц. Иванюшкина Р. Ю. – М.: Издательский дом «ДМК-пресс». – 760 с., ил.

В книге известного английского автора поставлена задача научить читателя теории и практике построения высококачественных ламповых усилителей звуковой частоты класса качества High-End. Поскольку на сегодняшний день «ламповый звук» становится все более популярным, причем не только среди меломанов и аудиофилов, но и среди рядовых слушателей музыки, интерес к подобной технике в последние годы сильно возрос. В книге популярным языком изложены, как теория работы ламповых схем (начиная с простейших электрических цепей и заканчивая сложными схемами различных узлов реальной звукоусилительной аппаратуры), так и практические рекомендации по разработке высококачественных аудиоусилителей в любительских условиях, что позволяет существенно снизить затраты на высококачественную бытовую технику. Книга предназначена в первую очередь для радиолюбителей, но она, безусловно будет полезна также инженерам – разработчикам звукоусилительной техники, а также студентам, изучающим аналоговую схемотехнику и усилительные устройства.

УДК621.375.132
ББК32.846.6

Морган Джонс

Ламповые усилители

Главный редактор *Мовчан Д. А.*
dm@dmkpress.ru
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Страмоусова О. И.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 0-7506-5694-8 (англ.)

ISBN 978-5-519-67714-1 (рус.)

Copyright © 1995, 1999, 2003 Morgan Jones. All rights reserved.
© Оформление Издательский дом ДМК-пресс, 2007

Содержание

Предисловие научного редактора 22

Предисловие автора 24

Посвящение 26

Благодарности 27

1. Основы электрических цепей и сигналов 28

1.1. Общие замечания 28
1.2. Применяемые математические обозначения 29
1.3. Электроны и заряженные частицы. Электрический заряд 30
1.4. Электрический ток. Электродвижущая сила. Работа электрического тока 31
1.5. Электрическая цепь. Электрическое сопротивление. Закон Ома. Напряжение 33
1.6. Электрическая мощность. Закон Джоуля-Ленца 36
1.7. Законы Кирхгофа 37
1.8. Единицы и множители физических величин. Децибелы 39
Кратные и дольные приставки 39
Децибелы 41
1.9. Последовательное и параллельное соединение электрических сопротивлений 42
1.10. Делители напряжения 47
1.11. Эквивалентные схемы. Источники напряжения и тока. Метод эквивалентного источника 47
Эквивалентная схема с источником напряжения 48
Эквивалентная схема с источником тока 53
1.12. Переменный ток 54
Синусоидальное колебание 54
1.13. Действующее значение и мощность переменного тока 57
1.14. Прямоугольное колебание (меандр) 58

1.15. Случайные колебания. Шумы 59
1.16. Трансформаторы 61
1.17. Конденсаторы и катушки индуктивности 63
1.18. Реактивные сопротивления 64
1.19. Полное комплексное сопротивление (импеданс) цепи ... 66
1.20. RC и RL фильтры. Амплитудно-частотная характеристика .. 68
1.21. Постоянные времени RC и RL цепей 71
1.22. Резонанс. Колебательные контуры 72
1.23. Переходные процессы 74
1.24. Полупроводниковые диоды 80
1.25. Стабилитроны. Диоды с запрещенной зоной. Светодиоды 83
Список используемой литературы 84
Литература для углубленного изучения 84

2. Основы действия усилительных приборов 85
2.1. Общие замечания 85
2.2. Краткая историческая справка об электронных лампах .. 85
2.3. Термоэлектронная эмиссия 87
2.4. Принцип действия и статические характеристики вакуумного диода 88
2.5. Скорость движения электронов 93
2.6. Принцип действия и статические характеристики вакуумного триода 95
2.7. Принцип действия и статические характеристики многосеточных ламп 103
2.8. Эквивалентные параметры электронных ламп и их определение 113
2.9. Особенности применения тетродов и пентодов в усилителях звуковой частоты 119
2.10. Некоторые вопросы конструкции и эксплуатации приемо-усилительных ламп 122
2.10.1. Катод 122
2.10.2. Проблемы, связанные с накалом ламп 117
2.10.2.1. Общие замечания 117
2.10.2.2. Проблемы электростатики 117
2.10.2.3. Электромагнитные проблемы и катоды косвенного накала 128

2.10.2.4. Изоляция катод-подогреватель 130
2.10.2.5. Тепловой режим катода 131
2.10.2.6. Подогреватели катодов и их источники питания .. 132
2.10.2.7. Напряжение и ток подогревателя катода 134
2.10.3. Управляющая сетка 137
2.10.3.1. Общие замечания 137
2.10.3.2. Сеточный ток 138
2.10.3.3. Температурный дрейф, вызываемый сеточным током 138
2.10.3.4. Сеточная эмиссия и борьба с ней 139
2.10.3.5. Лампы с рамочными сетками 140
2.10.3.6. Сетки, определяющие переменное значение усиления μ, и связь с искажениями 140
2.10.4. Другие виды сеток в лампах 142
2.10.5. Анод 142
2.10.6. Вакуум и ионизационные шумы 146
2.10.7. Геттеры 148
2.10.8. Держатели из слюды и температура баллона 149
2.10.9. Измерение температуры баллона и охлаждение ламп 151
2.10.10. Ламповые цоколи серий OCTAL и LOCTAL – влияние на потери и шумы 152
2.10.11. Стеклянный баллон и выводы лампы 154
2.11. Полупроводниковые активные приборы (транзисторы) 155
2.11.1. Общие замечания 155
2.11.2. Биполярные плоскостные транзисторы (БПТ) и принцип их работы 156
2.11.3. Простейший усилитель с общим эмиттером на биполярном тарнзисторе 157
2.11.4. Входное и выходное сопротивления и статические характеристики биполярного транзистора 160
2.11.5. Эмиттерный повторитель 162
2.11.6. Составной транзистор 163
2.11.7. Общие замечания о свойствах биполярных транзиторов 164
2.11.8. Краткие сведения о полевых транзисторах 164
2.12. Обратная связь в активных устройствах.

Уравнение обратной связи 165
2.12.1. Общие замечания. Определение обратной связи 165
2.12.2. Уравнение обратной связи 166
2.12.3. Практические ограничения уравнения обратной связи 167
2.12.4. Терминология обратной связи, полные входное и выходное сопротивления 167
2.13. Операционные усилители 169
2.13.1. Общие сведения 169
2.13.2. Инвертор и «виртуальная» земля 170
2.13.3. Неинвертирующий усилитель и повторитель напряжения 171
2.13.4. Интегратор 173
2.13.5. Смещение постоянного тока в операционном усилителе 174
Список используемой литературы 175
Литература для углубленного изучения 175

3. Основы схемотехники ламповых усилителей 176
3.1. Общие замечания 176
3.2. Усилитель на триоде с общим катодом 176
3.3. Ограничения по выбору рабочей точки. Принципиальная схема простейшего резисторного каскада 179
3.4. Режим в рабочей точке 182
3.5. Катодное смещение 185
3.6. Выбор величины сопротивления резистора в цепи сетки 191
3.7. Выбор выходного разделительного конденсатора 194
3.8. Вредное влияние проходной емкости лампы и пути его уменьшения. Эффект Миллера 195
3.9. Применение экранированных ламп 197
3.10. Каскод (каскодная схема) 205
3.11. Катодный повторитель 212
3.12. Источники и потребители (приемники) энергии: определения 217

3.13. Каскад с общим катодом как приемник неизменяющегося тока 218
3.14. Пентоды в качестве приемников неизменяющегося тока 220
3.15. Катодный повторитель с активной нагрузкой 223
3.16. Катодный повторитель Уайта 224
3.17. Катодный повторитель Уайта в качестве выходного каскада 227
3.18. μ-повторитель 229
3.19. Учет эквивалентных сопротивлений предшествующего и последующего каскадов 232
3.20. Выбор верхней лампы для μ-повторителя 233
3.21. Ограничения μ-повторителя 234
3.22. Параллельно управляемый двухламповый усилитель (SRPP) 236
3.23. β-повторитель 240
3.24. Дифференциальная пара (дифференциальный каскад) ... 243
3.25. Коэффициент усиления дифференциальной пары 244
3.26. Выходное сопротивление дифференциальной пары ... 244
3.27. Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR) в дифференциальной паре 246
3.28. Коэффициент реакции питающего напряжения (PSRR) дифференциальной пары 247
3.29. Полупроводниковые приемники неизменяющегося тока для дифференциальной пары 249
3.30. Использование транзисторов в качестве активной нагрузки для электронных ламп 251
3.31. Приемник неизменяющегося тока на интегральной схеме 257
Список используемой литературы 257
Литература для углубленного изучения 257

4. Искажения в усилителях, их измерение, меры по снижению искажений 259

4.1. Общие замечания 259
4.2. Классификация искажений. Принципы оценки линейных искажений 259

4.3. Принципы измерения нелинейных искажений 261
4.4. Измерение и интерпретация искажений 263
4.5. Выбор измерений 264
4.6. Совершенствование измерений нелинейных гармонических искажений 265
4.6.1. Общие замечания 265
4.6.2. Весовая оценка гармоник 265
4.6.3. Особенности детектирования гармоник 266
4.6.4. Учет шумовой составляющей при измерении нелинейных искажений 268
4.7. Спектральные анализаторы 269
4.8. Цифровая обработка сигналов 270
4.8.1. Общие сведения о цифровом представлении сигналов и аналого-цифровом преобразовании 270
4.8.2. Дискретизация. Теорема Котельникова – Найквиста ... 270
4.8.3. Масштабирование, квантование, кодирование 271
4.8.4. Системы счисления и кодовые слова 272
4.8.5. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) 274
4.9. Как автор проводит измерения искажений 276
4.10. Особенности проектирования усилителей с малыми искажениями 276
4.10.1. Классификация способов снижения нелинейных искажений 276
4.10.2. Влияние рабочей точки по переменному току 277
4.10.3. Влияние рабочей точки по постоянному току 280
4.10.4. Искажения из-за сеточного тока 280
4.10.5. Искажения из-за сеточного тока и регулировки громкости 282
4.10.6. Работа с сеточным током и нелинейные искажения 283
4.10.7. Уменьшение искажений ограничением эквивалентной нагрузки 286
4.10.8. Уменьшение искажений подавлением (компенсацией) 289
4.10.9. Подавление искажений в двухтактном каскаде 290
4.10.10. Подавление искажений в дифференциальной паре 291
4.11. Проблемы смещения по постоянному току 291

4.11.1. Общие замечания 291
4.11.2. Автосмещение катодным резистором 293
4.11.3. Сеточное смещение 295
4.11.4. Катодное смещение с помощью перезаряжаемого аккумулятора 296
4.11.5. Диодно-катодное смещение 297
4.11.6. Смещение с помощью приемника неизменяющегося тока 300
4.12. Выбор электронной лампы по критерию низких искажений 301
4.12.1. Общие замечания 301
4.12.2. Специальные разработки ламп с малыми искажениями 301
4.12.3. Проблема карбонирования баллонов ламп 303
4.12.4. Проблема размагничивания ламп 304
4.12.5. Необходимость тестирования для отбора электронных ламп с малыми искажениями 304
4.12.6. Схема проверки 305
4.12.7. Уровни и частоты проверочной схемы 306
4.12.8. Результаты испытаний 307
4.12.9. Интерпретация измерений 307
4.12.10. Альтернативные электронные лампы со средним μ 310
4.12.11. Взвешенные результаты искажений 311
4.12.12. Общие выводы 312
4.13. Проблема сопряжения одного каскада со следующим ... 312
4.13.1. Общие замечания 312
4.13.2. Проблема блокировки разделительным конденсатором 312
4.13.3. Трансформаторная связь между каскадами 314
4.13.3. Смещение уровня и связи по постоянному току 315
4.13.4. Усилитель класса А для электромагнитных головных телефонов с непосредственной междукаскадной связью 317
4.13.5. Использование схемы сдвига уровня с источником тока 321
Список используемой литературы 324
Литература для углубленного изучения 325

5. Основные сведения о радиокомпонентах 326
5.1. Общие сведения 326
5.2. Резисторы 327
5.2.1. Ряды стандартизованных значений сопротивлений ... 327
5.2.2. Тепловые параметры резисторов 328
5.2.3. Металлизированные пленочные резисторы 330
5.2.4. Проволочные резисторы 333
5.2.5. Процесс старения проволочных резисторов 334
5.2.6. Шумы и индуктивность проволочных резисторов 335
5.2.7. Основные критерии подбора резисторов для схемы ... 337
Точность изготовления 337
Температурный режим 338
Рабочее напряжение 338
Мощность рассеяния резистора 338
5.3. Конденсаторы 338
5.3.1. Общие сведения 338
5.3.2. Плоский конденсатор 339
5.3.3. Уменьшение зазора между пластинами и увеличение количества пластин 340
5.3.4. Свойства диэлектрика. Эквивалентная схема конденсатора 341
5.3.5. Типы конденсаторов 342
5.3.6. Металлические конденсаторы с воздушным диэлектриком 343
5.3.7. Пленочные пластиковые фольговые конденсаторы 344
5.3.8. Пленочные конденсаторы, изготовленные металлизацией диэлектрика 348
5.3.9. Металлизированные бумажные конденсаторы 348
5.3.10. Слюдяные посеребренные конденсаторы 349
5.3.11. Керамические конденсаторы 349
5.3.12. Алюминиевые электролитические конденсаторы 350
5.3.13. Танталовые электролитические конденсаторы 355
5.3.14. Основные вопросы, возникающие при выборе конденсатора 355
Рабочее напряжение 355
Требуемая точность изготовления 356
Температурный режим 356
Значение номинальной емкости конденсатора 356
Токи утечки и величина tgδ 356