

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.: Издательство ДМК Пресс, 2016. — 624 с., ил.

ISBN 978-5-97060-366-6

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.*
dmkpress@gmail.com
Корректор *Синяева Г. И.*
Верстка *Страмоусова О. И.*
Дизайн обложки *Мовчан А. Г.*

Формат 70×100¹/₁₆.
Гарнитура «Петербург». Печать офсетная.
Усл. печ. л. 58,5. Тираж 100 экз.

Издательство ДМК Пресс
Web-сайт Издательства: www.dmkpress.com

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 978-0-7506-5694-8 (англ.)

ISBN 978-5-97060-366-6 (рус.)

Copyright © 1995, 1999, 2003
Morgan Jones. All rights reserved.
© Оформление ДМК Пресс, 2016

Содержание

Предисловие научного редактора	19
Предисловие автора	21
Посвящение	23
Благодарности	24
1. Основы действия усилительных приборов	25
1.1. Общие замечания	25
1.2. Краткая историческая справка об электронных лампах ..	25
1.3. Термоэлектронная эмиссия	27
1.4. Принцип действия и статические характеристики вакуумного диода	28
1.5. Скорость движения электронов	33
1.6. Принцип действия и статические характеристики вакуумного триода	35
1.7. Принцип действия и статические характеристики многосеточных ламп	43
1.8. Эквивалентные параметры электронных ламп и их определение	53
1.9. Особенности применения тетродов и пентодов в усилителях звуковой частоты	59
1.10. Некоторые вопросы конструкции и эксплуатации приемо-усилительных ламп	62
1.10.1. Катод	62
1.10.2. Проблемы, связанные с накалом ламп	67
1.10.2.1. Общие замечания	67
1.10.2.2. Проблемы электростатики	67
1.10.2.3. Электромагнитные проблемы и катоды косвенного накала	68
1.10.2.4. Изоляция катод-подогреватель	70
1.10.2.5. Тепловой режим катода	71
1.10.2.6. Подогреватели катодов и их источники питания	72
1.10.2.7. Напряжение и ток подогревателя катода	74

1.10.3. Управляющая сетка	77
1.10.3.1. Общие замечания	77
1.10.3.2. Сеточный ток	78
1.10.3.3. Температурный дрейф, вызываемый сеточным током	78
1.10.3.4. Сеточная эмиссия и борьба с ней	79
1.10.3.5. Лампы с рамочными сетками	80
1.10.3.6. Сетки, определяющие переменное значение усиления μ , и связь с искажениями	80
1.10.4. Другие виды сеток в лампах	82
1.10.5. Анод.....	82
1.10.6. Вакуум и ионизационные шумы	86
1.10.7. Геттеры	88
1.10.8. Держатели из слюды и температура баллона	89
1.10.9. Измерение температуры баллона и охлаждение ламп	91
1.10.10. Ламповые цоколи серий OCTAL и LOCTAL – влияние на потери и шумы	92
1.10.11. Стекланный баллон и выводы лампы	94
1.11. Полупроводниковые активные приборы (транзисторы)	95
1.11.1. Общие замечания	95
1.11.2. Биполярные плоскостные транзисторы (БПТ) и принцип их работы	96
1.11.3. Простейший усилитель с общим эмиттером на биполярном транзисторе	97
1.11.4. Входное и выходное сопротивления и статические характеристики биполярного транзистора	100
1.11.5. Эмиттерный повторитель	102
1.11.6. Составной транзистор	103
1.11.7. Общие замечания о свойствах биполярных транзисторов	104
1.11.8. Краткие сведения о полевых транзисторах	104
1.12. Обратная связь в активных устройствах. Уравнение обратной связи	105
1.12.1. Общие замечания. Определение обратной связи	105
1.12.2. Уравнение обратной связи	106
1.12.3. Практические ограничения уравнения обратной связи	107
1.12.4. Терминология обратной связи, полное входное и выходное сопротивления	107

1.13. Операционные усилители	109
1.13.1. Общие сведения	109
1.13.2. Инвертор и «виртуальная» земля	110
1.13.3. Неинвертирующий усилитель и повторитель напряжения	111
1.13.4. Интегратор	113
1.13.5. Смещение постоянного тока в операционном усилителе	114
Список используемой литературы	115
Литература для углубленного изучения	115

2. Основы схемотехники ламповых

усилителей	116
2.1. Общие замечания	116
2.2. Усилитель на триоде с общим катодом	116
2.3. Ограничения по выбору рабочей точки. Принципиальная схема простейшего резисторного каскада	119
2.4. Режим в рабочей точке	122
2.5. Катодное смещение	125
2.6. Выбор величины сопротивления резистора в цепи сетки	131
2.7. Выбор выходного разделительного конденсатора	134
2.8. Вредное влияние проходной емкости лампы и пути его уменьшения. Эффект Миллера	135
2.9. Применение экранированных ламп	137
2.10. Каскод (каскадная схема)	145
2.11. Катодный повторитель	152
2.12. Источники и потребители (приемники) энергии: определения	157
2.13. Каскад с общим катодом как приемник неизменяющегося тока	158
2.14. Пентоды в качестве приемников неизменяющегося тока	160
2.15. Катодный повторитель с активной нагрузкой	163
2.16. Катодный повторитель Уайта	164
2.17. Катодный повторитель Уайта в качестве выходного каскада	167
2.18. μ -повторитель	169
2.19. Учет эквивалентных сопротивлений предшествующего и последующего каскадов	172

2.20. Выбор верхней лампы для μ -повторителя	173
2.21. Ограничения μ -повторителя	174
2.22. Параллельно управляемый двухламповый усилитель (SRPP)	176
2.23. β -повторитель	180
2.24. Дифференциальная пара (дифференциальный каскад) ...	183
2.25. Коэффициент усиления дифференциальной пары	184
2.26. Выходное сопротивление дифференциальной пары ...	184
2.27. Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR) в дифференциальной паре	186
2.28. Коэффициент реакции питающего напряжения (PSRR) дифференциальной пары	187
2.29. Полупроводниковые приемники неизменяющегося тока для дифференциальной пары	189
2.30. Использование транзисторов в качестве активной нагрузки для электронных ламп	191
2.31. Приемник неизменяющегося тока на интегральной схеме	197
Список используемой литературы	197
Литература для углубленного изучения	197

3. Искажения в усилителях, их измерение, меры по снижению искажений	199
3.1. Общие замечания	199
3.2. Классификация искажений. Принципы оценки линейных искажений	199
3.3. Принципы измерения нелинейных искажений	201
3.4. Измерение и интерпретация искажений	203
3.5. Выбор измерений	204
3.6. Совершенствование измерений нелинейных гармонических искажений	205
3.6.1. Общие замечания	205
3.6.2. Весовая оценка гармоник	205
3.6.3. Особенности детектирования гармоник	206
3.6.4. Учет шумовой составляющей при измерении нелинейных искажений	208
3.7. Спектральные анализаторы	209
3.8. Цифровая обработка сигналов	210
3.8.1. Общие сведения о цифровом представлении сигналов и аналого-цифровом преобразовании	210

3.8.2. Дискретизация. Теорема Котельникова – Найквиста ..	210
3.8.3. Масштабирование, квантование, кодирование	211
3.8.4. Системы счисления и кодовые слова	212
3.8.5. Быстрое преобразование Фурье (БПФ)	214
3.9. Как автор проводит измерения искажений	216
3.10. Особенности проектирования усилителей	
с малыми искажениями	216
3.10.1. Классификация способов снижения нелинейных	
искажений	216
3.10.2. Влияние рабочей точки по переменному току	217
3.10.3. Влияние рабочей точки по постоянному току	220
3.10.4. Искажения из-за сеточного тока	220
3.10.5. Искажения из-за сеточного тока и регулировки	
громкости	222
3.10.6. Работа с сеточным током и нелинейные	
искажения	223
3.10.7. Уменьшение искажений ограничением	
эквивалентной нагрузки	226
3.10.8. Уменьшение искажений подавлением	
(компенсацией)	229
3.10.9. Подавление искажений в двухтактном каскаде	230
3.10.10. Подавление искажений в дифференциальной	
паре	231
3.11. Проблемы смещения по постоянному току	231
3.11.1. Общие замечания	231
3.11.2. Автосмещение катодным резистором	233
3.11.3. Сеточное смещение	235
3.11.4. Катодное смещение с помощью перезаряжаемого	
аккумулятора	236
3.11.5. Диодно-катодное смещение	237
3.11.6. Смещение с помощью приемника	
неизменяющегося тока	240
3.12. Выбор электронной лампы по критерию	
низких искажений	241
3.12.1. Общие замечания	241
3.12.2. Специальные разработки ламп с малыми	
искажениями	241
3.12.3. Проблема карбонирования баллонов ламп	243
3.12.4. Проблема размагничивания ламп	244
3.12.5. Необходимость тестирования для отбора	
электронных ламп с малыми искажениями	244

3.12.6. Схема проверки	245
3.12.7. Уровни и частоты проверочной схемы	246
3.12.8. Результаты испытаний	247
3.12.9. Интерпретация измерений	247
3.12.10. Альтернативные электронные лампы со средним μ	250
3.12.11. Взвешенные результаты искажений	251
3.12.12. Общие выводы	252
3.13. Проблема сопряжения одного каскада со следующим	252
3.13.1. Общие замечания	252
3.13.2. Проблема блокировки разделительным конденсатором	252
3.13.3. Трансформаторная связь между каскадами	254
3.13.3. Смещение уровня и связи по постоянному току	255
3.13.4. Усилитель класса А для электромагнитных головных телефонов с непосредственной междукаскадной связью	257
3.13.5. Использование схемы сдвига уровня с источником тока	261
Список используемой литературы	264
Литература для углубленного изучения	265
4. Источники питания	266
4.1. Общие сведения	266
4.2. Основные виды источников питания	266
4.3. Выпрямление переменного тока	268
4.3.1. Общие сведения о выпрямителях	268
4.3.2. Выбор ламповых или полупроводниковых выпрямительных диодов	268
4.3.3. Ртутные выпрямители	273
4.3.4. ВЧ шумы выпрямителей	274
4.4. Сглаживающие цепи (фильтры) выпрямителей	275
4.4.1. Назначение сглаживающих элементов	275
4.4.2. Одиночный накопительный конденсатор в роли сглаживающего элемента	276
4.4.3. Влияние напряжения пульсаций на выходное напряжение	278
4.4.4. Пульсирующая составляющая постоянного тока и угол проводимости	279
4.4.5. Насыщение сердечника трансформатора	282

4.4.6. Критерии выбора силового трансформатора и накопительного (сглаживающего) конденсатора	285
4.4.7. Источник питания со сглаживающим дросселем	288
4.4.8. Минимальный ток нагрузки для источника питания со сглаживающим дросселем	290
4.4.9. Номинальное значение тока дросселя	291
4.4.10. Номинальный ток трансформатора, используемого в источнике питания со сглаживающим дросселем	294
4.4.11. Выбросы тока и демпфирующие элементы	294
4.4.12. Использование накопительного конденсатора для снижения высоковольтного напряжения	298
4.4.13. Частотные характеристики используемых на практике LC-фильтров	300
4.4.14. Широкополосная фильтрация	304
4.4.15. Секционированный резистивно-емкостный (RC) фильтр	305
4.5. Выпрямители с умножением (умножители) напряжения ...	307
4.6. Стабилизаторы	309
4.6.1. Общие сведения о последовательных и параллельных стабилизаторах напряжения	309
4.6.2. Классическая схема последовательного стабилизатора	310
4.6.3. Двухтранзисторная схема последовательного стабилизатора	313
4.6.4. Ускоряющий конденсатор	314
4.6.5. Компенсация выходного индуктивного сопротивления стабилизатора	317
4.6.6. Стабилизатор цепи сеточного смещения с регулируемым выходным напряжением	317
4.6.7. Стабилизатор напряжения на интегральной микросхеме 317 серии	319
4.6.8. Источники питания низкого напряжения и синфазный шум	322
4.6.9. Источники синфазного шума в низковольтном источнике питания	325
4.6.10. Использование интегральной микросхемы 317 серии в качестве стабилизатора высоковольтного источника питания	326
4.6.11. Ламповый стабилизатор напряжения	327
4.6.12. Пути совершенствования схемы лампового стабилизатора напряжения	329

4.6.13. Применение схемы с входной экранирующей сеткой для нейтрализации фоновых шума переменного тока	330
4.6.14. Способы увеличения выходного тока стабилизатора	331
4.6.15. Коэффициент режекции источника питания применительно к отдельным каскадам и устойчивость схемы	334
4.6.16. «Пение» стабилизатора напряжения	338
4.7. Применяемые на практике схемы источников питания ...	339
4.7.1. Общие сведения	339
4.7.2. Выбор высоковольтного напряжения	339
4.7.3. Включение сглаживающих конденсаторов при повышенном высоком напряжении	340
4.7.4. Необходимость разряда высоковольтных конденсаторов	341
4.7.5. Перенапряжения, возникающие при включении схемы	343
4.7.6. Низковольтные источники питания	344
4.7.7. Радиопомехи от внешних источников	344
4.7.8. Составление предварительной схемы блока питания ...	345
4.7.9. Расчет низковольтных источников питания	346
4.7.10. Высоковольтный выпрямитель и стабилизатор	350
4.7.11. Особенности источников смещения подогревателей ламп, находящихся под повышенным потенциалом относительно корпуса	354
4.7.12. Составление окончательной схемы блока питания ...	357
4.8. Схема улучшенного источника питания	359
4.8.1. Общие замечания	359
4.8.2. Низковольтная часть улучшенного блока питания	360
4.8.3. Схема стабилизатора тока	361
4.8.4. Режим пониженного энергопотребления	363
4.8.5. Рабочий режим	364
4.8.6. Погрешности и неисправности	364
4.8.7. Выбор силового трансформатора и дросселя низковольтного источника питания для схем с последовательным накалом ламп	365
4.8.8. Требования к трансформатору и дросселю высоковольтного источника питания	367
4.8.9. Высоковольтный стабилизатор	367

4.8.10. Увеличение максимально допустимого обратного напряжения V_{RRM} при последовательном включении выпрямительных диодов	368
4.8.11. Компенсация разбаланса сопротивлений полуобмоток трансформатора, имеющих отвод от средней точки	370
4.8.12. Схема задержки включения высоковольтного напряжения	371
Список используемой литературы	372
Литература для углубленного изучения	373

5. Каскады усиления мощности

5.1. Требования к усилителю мощности	374
5.2. Выходной каскад	374
5.2.1. Общие замечания	374
5.2.2. Выходной каскад класса А с несимметричным выходом	375
5.2.3. Особенности акустических систем	379
5.2.4. Неидеальности трансформаторов	380
5.3. Режимы работы усилительных приборов.	
Классы усилителей	382
5.3.1. Режим класса А	383
5.3.2. Режим класса В	383
5.3.3. Режим класса С	383
5.3.4. Угол отсечки. Режим класса АВ	384
5.3.5. Режимы классов АВ1 и АВ2	384
5.4. Двухтактный выходной каскад	386
5.5. Выходной каскад по ультралинейной схеме	389
5.6. Трансформаторный катодный повторитель в качестве выходного каскада	390
5.7. Усилители без выходного трансформатора	393
5.8. Составляющие блока усилителя мощности	395
5.9. Предоконечный каскад блока усилителя мощности	396
5.10. Фазоинверсный каскад	397
5.10.1. Общие замечания	397
5.10.2. Дифференциальный усилитель или пара с катодной связью в качестве фазоинвертора	400
Схемотехническое решение $R_k \gg R_L$	400
Схемотехническое компенсированное решение $R_k \approx R_L$	401
Схемотехническое решение $R_k \ll R_L$, глубокая обратная связь	404

5.10.3. «Согласованный» фазоинвертор	406
5.10.4. Усиление «согласованного» фазоинвертора	407
5.10.5. Выходное сопротивление «согласованного» фазоинвертора при равных (сбалансированных) нагрузках	407
5.10.6. Выходное сопротивление «согласованного» фазоинвертора при несимметричной нагрузке	409
5.11. Входной каскад	411
5.12. Устойчивость работы многокаскадного усилителя	411
5.12.1. Общие проблемы устойчивости усилителей	411
5.12.2. Подавление первой доминанты высокочастотной составляющей	413
5.12.3. Низкочастотное самовозбуждение усилителя	414
5.12.4. Паразитные колебания в выходном каскаде и схема подавления паразитных колебаний в цепи сетки	415
5.12.5. Самовозбуждение выходного каскада с ультралинейным выходом и подавление автоколебаний в цепи экранирующей сетки	416
5.13. Классические усилители мощности	417
5.13.1. Общие замечания	417
5.13.2. Усилитель Williamson	417
5.13.3. Усилитель Mullard 5-20	420
5.13.4. Усилитель Quad II	425
5.14. Пример разработки однотактного усилителя мощности	430
5.14.1. Общие замечания	430
5.14.2. Выбор выходной лампы	431
5.14.3. Выбор класса выходного каскада	432
5.14.4. Выбор статической рабочей точки с учетом требований выходной мощности и искажений	433
5.14.5. Точное определение параметров выходного трансформатора	435
5.14.6. Задание смещения лампы	435
5.14.7. Катодный шунтирующий конденсатор	436
5.14.8. Определение необходимого напряжения высоковольтного источника питания	437
5.14.9. Сглаживание высоковольтного напряжения	438
5.14.10. Особенность выпрямление высоковольтного напряжения	438
5.14.11. Высоковольтный силовой трансформатор	439

5.14.12.	Применимость высоковольтного дросселя и проблемы сглаживания пульсаций	440
5.14.13.	Варианты применения стабилизатора высоковольтного напряжения	441
5.14.14.	Определение выходного сопротивления усилителя	445
5.14.15.	Требования к каскаду предоконечного усиления	445
5.14.16.	Топология каскада предоконечного усиления	446
5.14.17.	Выбор лампы для каскада предоконечного усиления	447
5.14.18.	Определение рабочей точки предоконечного каскада	448
5.14.19.	Создание напряжения смещения предоконечному каскаду	449
5.14.20.	Оценка значений выходного сопротивления и коэффициента усиления каскада предоконечного усиления	449
5.14.21.	Какова же роль обратной связи?	450
5.14.22.	Подведение итогов разработки конструкции	450
5.14.23.	Проверка работоспособности усилителя	451
5.14.24.	Проверка звучания усилителя	454
5.14.25.	Наблюдения разработчика	454
5.14.26.	Выводы	456
5.15.	Пример разработки двухтактного усилителя мощности ...	457
5.15.1.	Общие замечания	457
5.15.2.	Исходные требования к разработке	457
5.15.3.	Оптимизация входного и фазоинверсного каскадов по постоянному току	460
5.15.4.	Расчет сопротивлений резистора катодного смещения входной лампы и резистора обратной связи	462
5.15.5.	Выбор элементов оконечного каскада	465
5.15.6.	Авторские разработки усилителей на лампах EL84	469
5.16.	Разработка усилителей мощностью более 10 Вт	470
5.16.1.	Традиционный подход к усилителям с мощностью более 10 Вт	470
5.16.2.	Пиковая музыкальная мощность: распушенность и ложь производителей	471
5.16.3.	Эффект «сжатия» мощности громкоговорителя	471

5.16.4. Активные кроссоверы и схема Зобеля	472
5.16.5. Параллельная работа выходных ламп в схеме и расчет трансформатора	473
5.16.6. Особенности возбуждения выходного каскада повышенной мощности	474
5.16.7. Выбор лампы для оконечного каскада	476
5.16.8. Выбор режима лампы 13Е1	477
5.16.9. Требования к предоконечному каскаду усиления	480
5.16.10. Определение топологии схемы, удовлетворяющей требованиям к предоконечному каскаду усиления	481
5.16.11. Топология схемы: источники питания и их влияние на элементы, задающие постоянную токовую нагрузку	484
5.16.12. Максимальное значение анодного напряжения и источник положительного высоковольтного питания	486
5.16.13. Симметричность и источник положительного высоковольтного напряжения	487
5.16.14. Второй дифференциальный усилитель и ток выходного каскада	488
5.16.15. Почему нет необходимости стабилизации всех источников питания?	491
5.16.16. Первый дифференциальный усилитель: его источник высоковольтного напряжения и линейность характеристики	492
5.16.17. Согласование ламп первого дифференциального каскада	493
5.16.18. Завершающие этапы разработки	493
5.16.19. Каскодная схема постоянной токовой нагрузки второго дифференциального усилителя и ее стабилизация	494
5.16.20. Постоянная токовая нагрузка первого дифференциального каскада. Температурная стабилизация	497
5.16.21. Элементы, повышающие высокочастотную устойчивость. Итоговая схема усилителя	499
5.16.22. Высоковольтные стабилизаторы	502
5.16.23. Стереозвук и масса конструкции	502
5.16.24. Схема источника питания	503

5.16.25. Межкаскадная отрицательная обратная связь и напряжения смещения	504
5.17. «Потомок от усилителя Beast» для прослушивания компакт-диска на электростатические телефоны	506
5.17.1. Особенности усилителя и его схемы	506
5.17.2. Расчет уровня фонового шума, производимого высоковольтным источником питания	508
5.17.3. Особенности цифрового сигнала от компакт-диска	510
5.17.4. Тепловой баланс	511
Список используемой литературы	512
Литература для углубленного изучения	512
6. Каскады предварительного усиления	513
6.1. Требования к предусилителю и его структурная схема ...	513
6.2. Линейный каскад	514
6.2.1. Технические требования к линейному каскаду и способы их реализации	514
6.2.2. Традиционный линейный каскад	518
6.2.3. Пути достижения заданных требований. Выбор лампы и топологии каскада	520
6.2.4. Выполнение требования необходимого значения коэффициента усиления	522
6.3. Регулятор громкости	525
6.3.1. Основные проблемы регулирования громкости	525
6.3.2. Подгонка закона изменения сопротивления потенциометра	527
6.3.3. Переключаемые аттенюаторы	528
6.3.4. Расчет переключаемого аттенюатора	531
6.3.5. Табличные вычисления для расчета регулятора громкости	534
6.3.6. Конструкция регулятора громкости	536
6.3.7. Светочувствительные резисторы и регулятор громкости	537
6.3.8. Регулятор громкости звука для симметричной схемы	538
6.4. Входной переключатель	539
6.5. Частотный корректор сигнала от проигрывателя грампластинок Американской ассоциации звукозаписывающей индустрии (RIAA)	543
6.5.1. Общие сведения	543

6.5.2. Проблемы механики	545
6.5.3. Влияние провода звукоусилителя и сопротивления по постоянной составляющей подвижной катушки его головки	547
6.5.4. Проблемы разработки блока частотной коррекции (пассивного эквалайзера) RIAA	548
6.5.5. Требования к блоку частотной коррекции	549
6.5.6. Метод частотной коррекции стандарта RIAA	552
6.5.7. Выравнивание частотных характеристик путем введения пассивных цепей	554
6.5.8. Раздельное выравнивание частотной характеристики блока коррекции RIAA	555
6.5.9. Раздельное выравнивание частотной характеристики блока коррекции RIAA для ламповых схем	557
6.5.10. Шумы и влияние входной емкости входного каскада	558
6.5.11. Учет собственных шумов лампы	564
6.5.12. Проблема Фликкер-шумов	565
6.5.13. Трудности альтернативного подбора звукоусилителей и входных ламп	565
6.5.14. Улучшение шумовых характеристик при использовании блока частотной коррекции стандарта RIAA	567
6.5.15. Обобщающие выводы по проблеме собственных шумов ламп	568
6.5.16. Пример практического воплощения блока частотной коррекции RIAA	569
6.5.17. Расчет значений элементов цепи, определяющей постоянную времени 75 мкс	570
6.5.18. Параметры цепей, определяющих постоянные времени 3180 мкс, 318 мкс, и проблемы взаимовлияния элементов цепей	573
6.5.19. Выравнивание частотных характеристик в точках, характеризующихся постоянными времени 3180 мкс и 318 мкс	574
6.5.20. Подгонка требуемых значений пассивных элементов под стандартные нормалы	576
6.6. Авторский образец исполнения схемы предусилителя ..	578
6.7. Симметричный вход и провода для подключения звукоусилителя	580
6.8. Выявление недостатков конструкций предусилителей ...	582

6.9. Симметричный предусилитель	583
6.9.1. Общие замечания	583
6.9.2. Входной каскад	583
6.9.3. Второй каскад и постоянная времени 75 мкс	587
6.9.4. Постоянные времени 3180 мкс и 318 мкс объединенных цепей коррекции и связанный с ними катодный повторитель	588
6.9.5. Симметричная схема соединений и контуры протекания тока фонового шума	589
6.9.6. Контуры фонового шума и несимметричный входной каскад	590
6.10. Возможности исключения линейного каскада	591
6.11. Сравнение уровней сигнала звукоснимателей для грампластинок и плееров компакт-дисков	593
6.12. Вариант блока частотной коррекции RIAA с использованием лампы типа EC8010	594
6.12.1. Общие замечания	594
6.12.2. Входной каскад	594
6.12.3. Оптимизация характеристик входного трансформатора	599
6.12.4. Второй каскад	599
6.12.5. Выходной каскад	602
6.12.6. Переосмысление результата выбора ламп исходя из требований к цепям подогревателей	602
6.13. Анализ работы блока частотной коррекции RIAA	603
6.13.1. Общие замечания	603
6.13.2. Искажения, вызванные сеточным током, и последовательные сопротивления RIAA эквалайзера	603
6.13.3. Погрешности параметров объединенных цепей с постоянными времени 3180 мкс и 318 мкс, вызванные влиянием емкости Миллера	604
6.13.4. Проблемы реализации постоянной времени 75 мкс	605
6.13.5. Расчет схемы в использовании средств вычислительной техники	605
6.13.6. Меры по улучшению характеристик объединенных цепей с постоянными времени 3180 мкс и 318 мкс	606
6.13.7. Манипуляции с постоянными времени 75 мкс и 3,18 мкс	607

6.14. Практические методы настройки блока частотной коррекции RIAA	608
6.14.1. Общие замечания	608
6.14.2. Проблемы, возникающие при прямых измерениях в блоке частотной коррекции RIAA	609
6.14.3. Точность изготовления компонентов и критерии их практического выбора	612
6.14.4. Погрешности выравнивания частотной характеристики, вызванные разбросом параметров электронных ламп	613
6.15. Линейный каскад	614
6.15.1. Общие замечания	614
6.15.2. Определение значения тока в рабочей точке ВАХ ...	614
6.15.3. Выбор лампы	615
6.16. Практические советы по наладке	618
Список используемой литературы	620
Литература для углубленного изучения	620
Список рекомендуемой русскоязычной литературы	621
Приложение	622