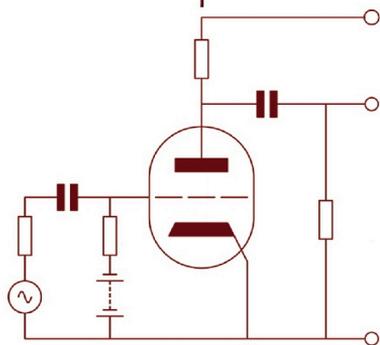


# Ламповые усилители



Морган Джонс

Под общей научной редакцией  
к.т.н. доц. Иванюшкина Р. Ю.

Morgan Jones

# Valve Amplifiers

Third Edition



Newnes

Amsterdam Boston Heidelberg London New York Oxford  
Paris San Diego San Francisco Singapore Sydney Tokyo

---

Морган Джонс

# Ламповые усилители

*3-е издание, электронное*

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



Москва, 2023

УДК 621.375.132

ББК 32.846.6

М79

**Морган, Джонс.**

М79 Ламповые усилители / М. Джонс ; пер. с англ. под общ. науч. ред. к. т. н. доц. Р. Ю. Иванюшкина. — 3-е изд., эл. — 1 файл pdf : 626 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-625-8

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.

УДК 621.375.132

ББК 32.846.6

**Электронное издание на основе печатного издания:** Ламповые усилители / М. Джонс ; пер. с англ. ; под общ. научной ред. к. т. н. доц. Р. Ю. Иванюшкина. — 2-е изд., перераб. — Москва : ДМК Пресс, 2016. — 624с. — ISBN 978-5-97060-366-6. — Текст : непосредственный.

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.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-625-8

© 1995, 1999, 2003 Morgan Jones.

All rights reserved.

© Оформление ДМК Пресс, 2016

# Содержание

<b>Предисловие научного редактора</b> .....	19
<b>Предисловие автора</b> .....	21
<b>Посвящение</b> .....	23
<b>Благодарности</b> .....	24
<b>1. Основы действия усилительных приборов</b> .....	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 $\mu$ , 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**

<b>усилителей</b> .....	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 (каскодная схема) .....	145
2.11. Катодный повторитель .....	152
2.12. Источники и потребители (приемники) энергии: определения .....	157
2.13. Каскод 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. $\mu$ -повторитель .....	169
2.19. Учет эквивалентных сопротивлений предшествующего и последующего каскадов .....	172

2.20. Выбор верхней лампы для $\mu$ -повторителя .....	173
2.21. Ограничения $\mu$ -повторителя .....	174
2.22. Параллельно управляемый двухламповый усилитель (SRPP) .....	176
2.23. $\beta$ -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

<b>3. Искажения в усилителях, их измерение, меры по снижению искажений .....</b>	<b>199</b>
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 $\mu$ .....	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
<b>4. Источники питания .....</b>	<b>266</b>
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
<b>5. Каскады усиления мощности .....</b>	<b>374</b>
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 13E1 .....	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
<b>6. Каскады предварительного усиления .....</b>	<b>513</b>
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 звукоснимателя 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 звукоснимателей 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 звукоснимателя .....	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 ВAX ...	614
6.15.3. Выбор лампы .....	615
6.16. Практические советы по наладке .....	618
Список используемой литературы .....	620
Литература для углубленного изучения .....	620
<b>Список рекомендуемой русскоязычной литературы .....</b>	<b>621</b>
<b>Приложение .....</b>	<b>622</b>

---

# Предисловие научного редактора

Уважаемый читатель!

Перед Вами книга, посвященная ламповым аудиоусилителям повышенного качества, написанная известным английским специалистом в этой области, разработавшим и изготовившим своими руками немало высококлассной звуковоспроизводящей и звукоусилительной аппаратуры. Книга предназначена в первую очередь для радиолюбителей, желающих научиться искусству разработки и изготовления высококачественных усилителей звуковой частоты на электронных лампах. Также книга может быть полезна радиоинженерам, студентам радио и электротехнических вузов, разработчикам аудиотехники.

На сегодняшний день на полном серьезе можно сказать, что ламповые усилители звуковой частоты повышенного качества (часто называемые громкой аббревиатурой High-End) являются очень популярными и, даже не побоявшись громких слов, — модными у аудиофилов.

К сожалению, подавляющее большинство готовых ламповых усилителей, предлагаемых на рынке, являются эксклюзивной ручной работой, и их цена для подавляющего большинства потребителей является заоблачной. Тем не менее, потенциала многих радиолюбителей, имеющих опыт самостоятельного изготовления электронной аппаратуры с паяльником в руках, зачастую оказывается достаточно для самостоятельной разработки и изготовления лампового аудиоусилителя, себестоимость которого будет на порядок ниже готовых изделий, предлагаемых на рынке.

Предлагаемая уважаемому читателю книга ставит своей задачей закрыть брешь в недостатке литературы, позволяющей в доступной форме научить любителя искусству создания ламповых аудиоусилителей повышенного качества. Ламповым усилителям звуковой частоты посвящено немало книг, журнальных статей и других ис-

точников. Тем не менее, все эти издания обычно сводятся к одной из двух крайностей — либо «сухая» теория (зачастую сопровождающаяся сложными для понимания «простых смертных» математическими выкладками), либо описание готовых разработок, где зачастую не хватает как раз элементарной теории, описывающей принцип их работы.

В отличие от большинства подобных изданий, предлагаемая книга содержит как подробный теоретический материал (начиная с банального закона Ома и заканчивая теорией работы сложных каскадов усиления и проблематикой нелинейных искажений), так и большое количество практических рекомендаций по самостоятельному проектированию аудиоусилителей, включая как инженерные расчеты, так и элементы конструирования. При этом теоретические разделы не перегружены математическими выкладками и не требуют от читателя владения высшей математикой. Некоторым недостатком предлагаемой книги является отсутствие подробных рекомендаций по практическому изготовлению трансформаторов (даются лишь методики определения их необходимых параметров), но, как говорится — нельзя объять необъятное в рамках одной книги.

В процессе научного редактирования перевода этой книги, редактор позволил себе незначительные отступления от оригинального текста в плане улучшения доступности теоретической части для недостаточно подготовленных любителей. Таким образом, при рассмотрении принципов работы отдельных цепей, усилительных приборов и каскадов усиления, пояснительный материал в отдельных разделах был несколько расширен. С этой же целью научным редактором несколько изменен порядок изложения материала в теоретической части книги, а также дополнительно написаны параграфы 1.4, 1.6, 1.7 (кроме последнего раздела о лучевых триодах) и 1.11.7, отсутствующие в оригинальном авторском тексте, но существенно облегчающие понимание принципов работы и характеристик усилительных приборов (в частности электронных ламп — являющихся одним из главных объектов внимания настоящей книги).

Краткая информация о научном редакторе: Иванюшкин Роман Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры Радиопередающих устройств Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ). Научные интересы: проблемы повышения энергетической эффективности мощных радиопередатчиков для радиовещания и телевидения. Также у редактора имеется давний опыт реставрации бытовой ламповой радиоаппаратуры прошлых лет выпуска, что и послужило причиной особого внимания к аппаратуре на электронных лампах, включая как радиопередатчики, так и ламповые усилители звуковой частоты, которым и посвящена предлагаемая книга.

Иванюшкин Р. Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры  
Радиопередающих устройств Московского технического  
университета связи и информатики (МТУСИ)

---

# Предисловие автора

Прошло уже более тридцати лет с тех пор, когда автор этой книги купил свой первый ламповый усилитель. Он стоил три фунта, и это были карманные деньги, копившиеся много недель. По мере роста количества карманных денег росли его устремления, и родилось желание самому сделать хороший аудиоусилитель.

Хотя имелось много источников информации по проектированию таких усилителей, в книгах по электронике уделялось мало внимания разработке звуковой аппаратуры, а в книгах по высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуре (Hi-Fi) недоставало теории. Поэтому автор много времени проводил в библиотеках, стараясь увязать эту информацию и сформировать основы проектирования звуковой аппаратуры. Эта книга — результат многолетних усилий. Она нацелена на то, чтобы представить сложную теорию в доступной форме, не используя затруднительных для понимания уравнений высшей математики. В основном эта книга предназначена для умельцев, вооруженных простым инженерным калькулятором, электродрелью и паяльником с терморегулятором.

Автор — бакалавр естественных наук — начал карьеру в компании Acoustical Engineering, но через год покинул ее и поступил в BBC Engineering в качестве технического ассистента. Там он приобрел замечательную подготовку в области электроники и вырос до старшего инженера, затем его уволили по сокращению штатов. Затем он работал в сфере высшего образования, где разработал первый в Великобритании курс для бакалавров по технологии средств массовой информации. Там он радовался успехам своих бывших студентов, что приносило большое удовлетворение. Работая там, он не только заседал в методических советах, но и познакомился с классными специалистами.

Вскоре автор стал членом общества инженеров-специалистов по звуковой аппаратуре (Audio Engineering Society), разработал и собрал много ламповых предварительных усилителей, усилителей мощности, акустических систем, тонармов для проигрывателей виниловых грампластинок, электростатических головных телефонов (наушников).

Прошло более двадцати лет с начала работы над первым изданием «Ламповых усилителей» — с тех пор многое изменилось, в том числе устаревшие технологии. Появившиеся в домах компьютеры позволили удешевить процессы тестирования и измерений, так как сегодня используется мощная компьютерная обработка результатов, и эта обработка продиктована требованиями современных технологий. Таким образом, быстрое преобразование Фурье, прежде являвшееся инструментом лишь прикладных математиков, стало инструментом повсеместного использования, и для профессиональных разработчиков промышленной аппаратуры, и для увлеченных любителей, позволяя проводить спектральный анализ — что было привилегией компаний мирового класса всего лишь 15 лет назад. Эти благоприятные возможности были использованы автором в этом издании — он выполнил различные измерения, чего ранее не мог осуществлять из-за недостатка времени и средств.

Распространение торговли через всемирную сеть Интернет сделало рынок электронных ламп поистине глобальным. Редкие лампы, такие как, например, Loctails, европейские «специального качества», последнее поколение советских интегральных ламп, легко доступны любому любителю. Немного терпения, Интернет — и мы не ограничены в выборе электронных ламп, как было ранее.

Парадоксально — современная цифровая электроника улучшила поддержку электронных ламп, но она активно вытесняет с рынка элементной базы другие аналоговые компоненты. В первую очередь это касается конденсаторов. Конденсаторы из посеребренной слюды исчезают, полистироловые становятся большой редкостью. Элементы управления повсюду вытесняются цифровыми кодерами, поэтому исчезают механические переключатели диапазонов, и, в соответствии с теорией Дарвина, вымирают переменные резисторы — потенциометры.

Несмотря на эти проблемы, а может быть благодаря им, электронные лампы и виниловые грампластинки стали предметами поклонения. В 2002 году они появлялись в рекламе Великобритании 845 раз при рекламировании продуктов, не имеющих к ним никакого отношения.

Примечание для поколения компакт-дисков: тонарм — это изящное механическое устройство, с корундовой или алмазной иглой на конце держателя, которая движется по извилистой дорожке плоского винилового диска диаметром 300 мм, называемого долгоиграющей грампластинкой. Получаемый в результате звук зачастую очень хороший.

---

# Посвящение

Автор посвящает эту книгу команде инженеров Би-би-си, особенно из г. Саутгемптона, а также из Вуд Нортон, о котором у него сохранились очень яркие впечатления.

---

# Благодарности

Первое издание книги и ее автор получили неоценимую поддержку от многих людей.

Особая благодарность Полу Леклерку (Paul Leclercq), который взял на себя трудную задачу по редактированию. Без его зоркого глаза осталось бы много ошибок в глаголах и оказалось бы меньше протестированных на искажения ламп (см. главу 4).

Многие люди помогли материалами исследований, но наиболее значительный вклад сделали: Дэйв Мэнсел (Dave Mansell), Пол Леклерк (Paul Leclercq), Гэри Лонгри (Gary Longrie), Роджер Лоунсбороу (Roger Lownsbrough) и Бриан Террел (Brian Terrell).

Также помогли многие коммерческие предприятия, предоставляя материалы и оборудование, их названия упоминаются в тексте, но особый вклад сделал Бриан Соутер (Brian Sowter) из компании «Sowter Transformers», терпеливо выслушивавший эксцентричные запросы автора.

И, наконец, автор хотел бы поблагодарить тех читателей, которые нашли время на написание очень полезных для автора отзывов.

# Основы действия усилительных приборов

## 1.1. Общие замечания

В этой главе подробно рассматриваются принципы действия усилительных приборов — электронных ламп и транзисторов. Подавляющая часть главы посвящена электронным лампам, поскольку именно ламповым усилителям посвящена настоящая книга. Тем не менее, в конце главы кратко рассмотрены и полупроводниковые приборы и даже операционные усилители, несмотря на то, что их применение в ламповых усилителях сильно ограничено. Также рассмотрен ряд конструктивных особенностей приемо-усилительных ламп и методика определения их эквивалентных параметров по реальным статическим характеристикам.

## 1.2. Краткая историческая справка об электронных лампах

Электронная лампа с термоэлектронной эмиссией не явилась плодом очень уж серьезных теоретических исследований, перед тем, как была открыта и обнародована ее концепция. Она была открыта благодаря опытам, проводимых Томасом Эдисоном, по изучению долговечности нити накаливания обычных ламп освещения. В результате этих опытов было установлено, что перед тем, как осветительная лампа закончит свое существование, стеклянная колба лампы темнеет и обесцвечивается. Этот эффект очень редко наблюдается на обычных электрических лампах, но он отчетливо проявляется на галогенных осветительных лампах, баллоны которых изготовлены не из кварцевого стекла, а также на театральных осветительных лампах. Причиной потемнения колбы являлось испарение вольфрамовой спирали лампы и осаждение паров металла на внутренней поверхности стеклянной колбы. С целью определить па-

раметры процесса испарения материала нити накала, в стеклянный вакуумный баллон лампы была введена специальная металлическая пластина. В ходе опытов было обнаружено, что если к этому электроду, впоследствии названному анодом, приложить положительный относительно нити накаливания лампы потенциал, то в вакууме протекал электрический ток. Воздух из колб ламп накаливания откачивался потому, что раскаленная вольфрамовая нить на воздухе немедленно окислялась и сгорала. Потемнение стекла отчетливо видно на имеющейся у автора лампе, так называемого R-типа (рис. 1.1).

В 1904 г. Джон Эмброуз Флеминг пошел еще дальше и изобрел новый прибор, который он назвал электронной лампой (или электронным вентилем, так как она позволяла току протекать только в одном направлении). В его устройстве использовались две углеродные нити, одна из которых нагревалась «до раскаленного до бела состояния и большей, по сравнению с обычными осветительными лампами, степени свечения», хотя впоследствии в полученном патенте это состояние характеризовалось температурой примерно 2000 К (вольфрамовые спирали современных осветительных ламп имеют рабочую температуру примерно 2900 К). Вторая углеродная нить, или электрод, оставалась холодной, а после того, как между двумя этими электродами включался источник переменного напряжения, то обнаружилось, что ток в лампе мог протекать только в одном направлении. Этот новый прибор явился термоэлектронным диодом, потому что для протекания ионного тока необходимо было затрачивать гораздо большую энергию.



**Рис. 1.1** Лампа R-типа, видны следы потемнения на колбе.  
(Вытравленная надпись утверждает, что эта лампа является «Типом, одобренным главным почтмейстером Би-би-си»)

Строго говоря, только для ламп с невысокой степенью вакуума в колбе (либо для газонаполненных ламп низкого давления) протекание тока возможно за счет ионов газа, тогда как для ламп с высоким вакуумом возможен лишь электронный ток.

Хотя вакуумные диоды представляли из себя в то время странную диковинку, Флеминг предположил, что они смогут быть применены для детектирования волн Герца

(радиоволн). Однако они не нашли широкого распространения по двум основным причинам. Первая заключалась в том, что углерод эмитировал электроны весьма слабо, а вторая заключалась в том, что эмиссия электронов в сильной степени зависела от температуры, которая должна была быть из соображений увеличения срока службы углеродной нити поддерживаться сравнительно невысокой. Эти два фактора означали, что углеродная нить имела эффективность, составляющую всего примерно 0,003% по сравнению с эмиссионной способностью вольфрамовой нити, нагретой до температуры 2900 К (для определения эмиссионной способности понадобился особо чувствительный зеркальный гальванометр).

В патенте 1908 г., выданном Ли де Форесту (Lee de Forest), в электронную лампу, получившую название аудион, вводилась платиновая проволока, выполненная в виде колосниковой решетки, которая располагалась между нагретой нитью и анодом. Экспериментально им было показано, что в такой лампе возможно достичь усиления слабых колебаний. Хотя патент и показывал со всей очевидностью, что автор так и не понял, каким образом все это действует, новый прибор оказался весьма полезным и вскоре привел к рождению коммерческого радиовещания. Разброс в характеристиках усиления аудиона, в колбе которого использовался низкий вакуум, был очень велик, однако, очень скоро на авансцену вышел гораздо более качественный высоковакуумный триод.

### 1.3. Термоэлектронная эмиссия

Все металлы имеют кристаллическую структуру и характеризуются наличием свободных электронов, участвующих в электропроводности. Естественно, что часть этих электронов будет находиться на поверхности металла, но они остаются связанными межатомными силами взаимодействий с соседними атомами в структуре металла. Однако атомы за счет тепловой энергии совершают хаотические (Броуновское) колебательные движения относительно точек равновесия, электроны находятся на своих электронных орбитах, энергия которых также зависит от температуры. При значительном увеличении температуры металла, часть электронов может приобрести достаточную кинетическую энергию, чтобы преодолеть силу притяжения атома и покинуть поверхность металла.

Разогретый металл в электронной лампе получил название катода. Когда он разогревается до температуры, которая определяется особой константой материала, из которого катод изготовлен, и называемой работой выхода, кинетическая энергия некоторых электронов превышает действие атомных сил, и тогда вокруг катода образуется электронное облако или пространственный заряд, сформированный покинувшими металл электронами. Так как одноименные заряды отталкиваются, то в электронном облаке вокруг катода создается достаточный отрицательный заряд, препятствующий дальнейшей эмиссии электронов из металла, при возникновении которого наступает статическое равновесие.

Если подключить к другому электроду (аноду) положительный вывод от батареи (а отрицательный соединить с катодом), на электроны облака станет действовать электрическое поле, которое вызовет их ускоренное движение в вакууме в сторону положительно заряженного анода. Так как концентрация электронов в облаке, и величина объемного пространственного заряда, при этом будет снижаться, действие силы, препятствующей эмиссии электронов из катода, уменьшается, поэтому процесс эмиссии электронов из металла возобновляется, восполняя электронное облако и восстанавливая динамическое равновесие.

### 1.4. Принцип действия и статические характеристики вакуумного диода

Теперь самое время подвести некоторый итог вышесказанному и рассмотреть принцип действия простейшего электровакуумного прибора — диода. В основе работы любых электронных ламп, электронно-лучевых трубок (осциллографов, кинескопов, видеоконвертеров) и ряда других приборов, лежит эффект протекания электрического тока в вакууме. Казалось бы вакуум, заполняющий баллон любого электровакуумного прибора (к которым относятся и электронные лампы) является идеальным диэлектриком, и электрический ток через него протекать никак не может. Однако, в реальной жизни все бывает по-другому. Природа существования тока в вакууме обусловлена в первую очередь физическим явлением, называемым термоэлектронной эмиссией, которое было рассмотрено в предыдущем параграфе. Итак, суть явления термоэлектронной эмиссии состоит в том, что при разогреве металлической пластины, находящейся внутри баллона из которого откачан воздух, происходит отрыв электронов от поверхности пластины. При нагреве, как известно, кинетическая энергия хаотически движущихся частиц возрастает, и при определенной температуре разогрева пластины, энергии электронов оказывается достаточно, для того, чтобы преодолеть действие сил, удерживающих свободные электроны в металле. Покидая поверхность металла, электрон совершает работу, называемую работой выхода. Для снижения величины этой работы, пластину часто покрывают специальными примесями — солями бария, тория, различными оксидами.

Однако, для существования тока в вакууме наличие только одной лишь эмиссии электронов недостаточно. Представим себе лампочку от карманного фонарика, к которой подключена батарейка (рис. 1.2). При протекании по этой цепи электрического тока, нить лампочки сильно разогревается, и электроны, преодолевая работу выхода, вырываются из нее в окружающее пространство внутри баллона. Однако, эти электроны никуда от нити не разлетаются, поскольку нет силы, которая заставила бы их двигаться в каком-либо направлении в сторону от нити. Сама же нить частично притягивает электроны обратно на себя, поскольку, теряя отрицательный заряд в виде вырвавшихся из нее электронов, нить заряжается положительно. Таким образом, одни электроны покидают нить, преодолевая работу выхода, а другие притягива-

ются к ней обратно, образуя некий баланс. При этом вокруг нити образуется облачко свободных электронов, как это условно показано на рис. 1.3.

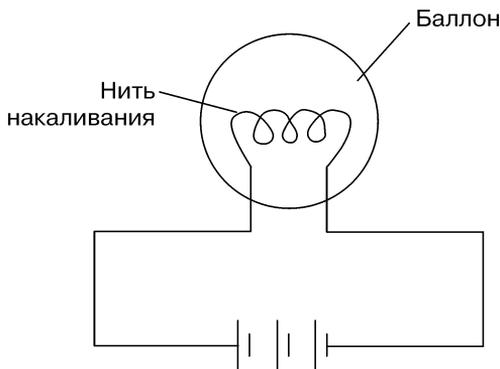


Рис. 1.2 Нить накаливания простейшей лампочки

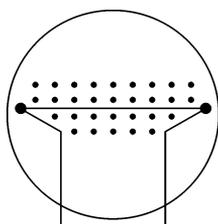


Рис. 1.3 Электронное облако вокруг нити накаливания

Для существования электрического тока в любой среде необходимо выполнение двух обязательных условий — это наличие носителей тока и наличие силы, которая заставляла бы их двигаться. Для того, чтобы через вакуум потек электрический ток, носителями которого являлись бы вырвавшиеся из раскаленной нити электроны, необходимо приложить к какой-либо вспомогательной пластине положительный заряд относительно нити, что создаст необходимую электрическую силу, заставляющую электроны двигаться в определенном направлении. Такая конструкция, показанная на рис. 1.4, является простейшим вакуумным диодом. Здесь в баллон, из которого предварительно откачан воздух, помимо нити накала, разогреваемой за счет тока, протекающего через нее от источника постоянного напряжения  $E_n$ , помещена также металлическая пластина, называемая анодом (А). К этой пластине подключен поло-