

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 незамкнутой 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	86
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 каскад I	125
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	
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	
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 критическими	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

Я посвящаю эту книгу моим родителям Расселу (Russell) и Эвелин (Evelyn), а также всем друзьям и коллегам, которые оказали неоценимую помощь в работе над книгой. В особенности хочу отметить активную поддержку, оказанную мне Гаретом Коннором (Gareth Connor) в моих попытках создать «безупречный усилитель», и терпение Питера Кинга (Peter King) при обсуждении новых идей по этому вопросу.

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 честолюбивый 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

Глава 1. Общие сведения о УМЗЧ

1.1. Экономическая важность УМЗЧ

Значение усилителей мощности звуковых частот (УМЗЧ) трудно переоценить. Ежегодно в мире производится сотни тысяч УМЗЧ, история их развития ведется с двадцатых годов прошлого столетия. Поэтому вызывает удивление тот факт, что вопросам их разработки посвящено не так уж много книг.

Автор надеется, что книга, которую вы держите в руках, несколько восполнит этот пробел. Во-первых, здесь вы найдете серьезное обсуждение многих проблем, возникающих у разработчиков при проектировании УМЗЧ. Во-вторых, за последние годы в данной области было опубликовано немало оригинальных работ, поэтому одной из целей книги является распространение новых результатов среди широкой читательской аудитории.

Важный результат последних достижений в области разработки звуковых усилителей состоит в том, что процедура проектирования УМЗЧ с низким коэффициентом искажений теперь может быть описана в виде достаточно строгого алгоритма, а не расплывчатых методик с множеством подводных камней, как это было ранее.

1.2. Обращение к читателю

Чтобы книга такого рода имела разумный объем, автор вынужден предполагать у читателя наличие элементарных знаний в области аудиотехники. Поэтому мы не будем обсуждать определения основных понятий, таких как частотная характеристика, коэффициент нелинейных искажений и отношение сигнал/шум. Поскольку большинство банальных и широко известных фактов из области электроники безжалостно опущены, данная книга не может быть рекомендована для начального знакомства с предметом. Чтобы не усложнять изложение математическими выкладками, приведены только самые важные соотношения для основных параметров усилителей, а для сложного расчета характеристик рассматриваемых схем используются специализированные компьютерные программы.

Тем не менее, автор подробно обсуждает механизм действия отрицательной обратной связи, положенной в основу работу высококачественных усилителей, так как до сих пор широко распространены различные заблуждения относительно принципа работы подобных устройств.

1.3. Цели и источники

Основной материал, приведенный в данной книге, был первоначально опубликован в *Computer World* («Мир электроники») в виде серии из восьми статей под общим названием *Distortion In Power Amplifiers* («Искажения в усилителях мощности»). Статьи были посвящены главным образом обсуждению наиболее важного параметра звуковых усилителей – *коэффициенту нелинейных искажений* (КНИ). Значение этого параметра у различных УМЗЧ при максимальной выходной мощности может варьироваться от 2% до 0,0005%, то есть разница составляет 4000:1, и это при том, что и те, и другие усилители могут считаться достаточно качественными. Из этого нельзя делать вывод, что значение данного параметра не так уж важно. Если вы наблюдали развитие рынка аудиоусилителей за последние двадцать лет, то наверняка заметили, что УМЗЧ с более низким значением КНИ имеют большую стоимость. Далее мы подробно обсудим этот вопрос.

На публикацию первоначальной серии статей автора вдохновила идея создания усилителя, имеющего такую же линейность характеристики, что и усилители класса А, но без обычных в этом случае проблем с низким КПД и отводом тепла. Однако в процессе работы выяснилось, что высокая линейность выходного каскада практически полностью затмевается на фоне искажений, вносимых малосигнальными каскадами предварительного усиления. Поэтому достижение высоких характеристик всего устройства невозможно без снижения искажений в предварительных усилительных каскадах. Поэтому маломощные усилители класса А с высокой линейностью были рассмотрены отдельно, чтобы выявить различные источники искажений сигнала. Следует заметить, что это оказалось непростой задачей. Возможно, самым главным элементом новизны рассматриваемого в книге подхода к описываемой проблеме заключается в том, что все источники искажений (а не один-два основных, как обычно) учитываются совместно, что дает в результате возможность проектировать УМЗЧ с чрезвычайно низким коэффициентом искажений, используя несколько общих контуров отрицательной обратной связи.

Большая часть книги посвящена рассмотрению проблем, связанных с искажениями в усилительных каскадах. Во-первых, это объясняется тем, что значение коэффициента нелинейных искажений изменяется в наиболее широких пределах, по сравнению со всеми другими параметрами усилительных каскадов. Во-вторых, вопрос об источниках искажений в усилителях до недавнего времени являлся своего рода белым пятном на карте разработчика УМЗЧ. Было ясно, что существуют несколько различных источников искажений, действующих совместно. Эта книга поможет вам отделить эти источники друг друга, чтобы по возможности минимизировать вклад каждого из них и добиться наиболее высоких характеристик проектируемого усилителя.

Следует заметить, что на протяжении всей книги мы будем считать, что искажение усиливаемого сигнала – это плохое явление и что оно должно быть по возможности минимизировано. Иногда выдвигаются альтернативные идеи по поводу того, что некоторые виды искажений воспринимаются ухом человека как вполне благозвучные и поэтому могут быть оставлены или даже увеличены при проектировании УМЗЧ, но автор никогда не разделял подобных воззрений. Поэтому мы будем стремиться к тому, чтобы сделать аудиотракт в максимальной степени прозрачным для усиливаемого сигнала. А если кому-то захочется внести в сигнал какие-либо искажения, то лучший способ реализации этого – использование дополнительного источника. Во-первых, такой подход более эффективен, чем генерация искажений нужного типа в самом усилителе, а во-вторых, он имеет важное преимущество перед всеми остальными методами, так как дополнительный источник искажений при желании может быть выключен.

Автор надеется, что представленная в книге информация будет полезна всем, кто интересуется проектированием аудиоусилителей. Великобритания имеет давнюю традицию маленьких и очень маленьких фирм, занимающихся производством аудиоаппаратуры, чьи технические и производственные мощности не слишком-то отличаются от возможностей опытного радиолюбителя. Поэтому книга рассчитана и на любителей, и на профессионалов.

Автор стремился как к техническому совершенствованию рассматриваемых устройств, так и к их экономической эффективности, то есть к достижению лучших характеристик при минимальной стоимости изделия.

Вероятно, читателю известен тот факт, что литература по электронике содержит множество описаний самых различных устройств, работоспособность которых кажется вполне вероятной, но которые никогда не проверялись на практике и зачастую оказываются неработоспособными. Поэтому автор по возможности стремился приводить в книге только те сведения и схемы устройств, которые были им собственноручно проверены. Этим объясняется непропорциональность представленного в книге материала, например, каскады на полевых транзисторах рассмотрены менее подробно, чем на биполярных. Дело в том, что полевые транзисторы, как правило, оказываются и более дорогими, и менее линейными. Кроме того, автор имеет опыт в проектировании УМЗЧ с выходной мощностью не более 300 Вт, так что сверхвысокомощные усилители для громкоговорящих систем оповещения также не представлены в книге. Автор надеется, что эти ограничения оправданы, так как помогут избежать публикации непроверенных сведений.

1.4. Исследования в области проектирования УМЗЧ

История развития твердотельных усилителей насчитывает уже более 40 лет, но было бы ошибкой считать, что все вопросы их анализа и проектирования достаточно изучены. В книге приводится ряд результатов, которые имеют элемент новизны:

- необходимость точного подбора входного импеданса усилителя для предотвращения генерации второй гармоники сигнала;

- повышение линейности и снижение коллекторного импеданса в каскаде усиления напряжения за счет использования супербета-транзистора;
- объяснения того, почему биполярный транзистор имеет бóльший коэффициент нелинейных искажений при работе на нагрузку сопротивлением 4 Ом, чем при восьмиомной нагрузке;
- выявление того факта, что в обычном выходном каскаде на биполярных транзисторах величина постоянного тока не оказывает решающего влияния на качество усиления, что действительно важно – так это напряжение между эмиттерами транзисторов;
- доказательство того, что полевые транзисторы в УМЗЧ, в течение многих лет рекламируемые как имеющие лучшую линейность усиления, на самом деле обладают по сравнению с биполярными транзисторами худшей линейностью характеристик;
- в большинстве УМЗЧ главным источником искажений являются не сами усилительные каскады, а наводки по шинам питания и нестабильность источника питания;
- несмотря на многочисленные публикации осциллограмм, изображающих последовательность прямоугольных импульсов, искаженных помехами, заявленных как демонстрация переходной характеристики при работе усилителя на емкостную нагрузку, на самом деле подобные диаграммы демонстрируют искажения, вызванные выходной индуктивностью и импедансом нагрузки, и мало что говорят о стабильности усиления.

Приведенный список может быть продолжен.

Как и любая другая, данная книга не может являться последним словом в области проектирования УМЗЧ, она лишь отражает состояние проблем, сложившихся в этой области к моменту ее написания. Разумеется, также нельзя утверждать, что здесь всесторонне рассмотрены все возможные типы усилителей мощности и нашли свое отражение все мыслимые аспекты их проектирования. При обсуждении многих затронутых здесь вопросов автор ловил себя на желании написать: «Потребуется отдельная книга для подробного рассмотрения...». На пути между Сциллой-Подробности и Харибдой-Разносторонности автор зачастую был вынужден отсылать читателя за дальнейшими сведениями к различного рода справочникам.

Бытует мнение, что проектирование дискретных усилителей – в значительной степени безынициативное занятие по сравнению с проектированием аналоговых интегральных схем. Стремительное развитие технологии операционных усилителей могло бы служить наглядным подтверждением данного тезиса. Но автор потратил значительное время на изучение последних достижений в области проектирования операционных усилителей и должен с сожалением констатировать, что эта область предоставляет не так уж много возможностей для фантазии разработчика, пытающегося создать новые методики проектирования аудиоусилителей; тому есть несколько причин, и чтобы сэкономить ваше время, автор перечислит некоторые из них:

- большинство накопленного в этой области исследовательского материала относится к полевым транзисторам, используемым в операционных усилителях,

изготовленных по КМОП технологии, которые по своим параметрам заметно отличаются от биполярных транзисторов (например, низкой крутизной характеристики);

- только в ранних работах по этой тематике рассматривалось использование биполярных транзисторов, так как имелись серьезные затруднения при создании комплементарных каскадов: р-п-р транзисторы в интегральном исполнении имели низкое значение коэффициента усиления и плохую частотную характеристику;
- большое количество усилий при создании операционных усилителей сосредотачивалось на достижении наилучших характеристик входного каскада, что было бы неправильным при проектировании УМЗЧ;
- многие методики проектирования операционных усилителей существенным образом используют высокую идентичность параметров транзисторов, выполненных по интегральной технологии на одном кристалле полупроводника; кроме того, в большинстве случаев стремятся минимизировать занимаемую транзисторами площадь, чтобы снизить стоимость микросхемы, что также не может быть перенесено в область проектирования УМЗЧ;
- многие методы проектирования операционных усилителей создавались только для того, чтобы обойти трудности, которые имеются (или имелись) при создании резисторов и конденсаторов в интегральном исполнении.

Описанный в книге материал базируется главным образом на методах проектирования усилителей в дискретном исполнении. Разумеется, уже существует большое количество интегральных и гибридных УМЗЧ, но их характеристики и схемы включения строго фиксированы, и разработчику ничего не остается, как просто следовать инструкции по их применению. За последние десять лет качество и надежность интегральных УМЗЧ заметно улучшилось, но они все еще имеют достаточно высокий коэффициент нелинейных искажений и высокую потребляемую мощность, поэтому преимущество использования дискретной элементной базы, по-видимому, сохранится еще надолго.

Искусство проектирования УМЗЧ многим представляется как нечто схожее с черной магией, то есть сам процесс считается невероятно сложным, а результат – непредсказуемым. Автор надеется, что эта книга приоткроет завесу тайны и покажет, что вполне возможно добиться предсказуемых результатов при выполнении последовательности четко описанных шагов проектирования. Описанный в книге алгоритм проектирования позволяет путем использования небольшого количества контуров отрицательной обратной связи добиться чрезвычайно низкого значения коэффициента нелинейных искажений (до 0,001% на частоте 1 кГц).

1.5. Распространенные заблуждения

Аудиотехника, как ни одна другая область, пестрит огромным количеством ошибочных суждений. За последние двадцать лет положение дел еще более ухудшилось под влиянием целого ряда течений, объединенных под общим названием «субъективизм». Многие самоуверенные эксперты считают возможным

утверждать, что они способны различить такие нюансы звучания, которые нельзя выразить в терминах электрических измерений.

Материал данной книги опирается только на те понятия, которые могут быть измерены, удовлетворяют обычному для научных исследований требованию повторяемости и лишены любого налета субъективизма. На самом деле это не такое уж и большое ограничение, как может показаться на первый взгляд, и позволит нам разработать методику проектирования высококачественных усилителей. В конце концов, ничто не мешает приверженцу субъективизма после применения нашей строгой и рациональной методики «позолотить лилии», используя супермодный резистор или какой-нибудь дорогой конденсатор и соединив все это вместе проводом, цена которого за метр превышает стоимость всего остального устройства – такие реверансы в сторону субъективизма вряд ли уже смогут ухудшить качество спроектированного усилителя. Однако не все утверждения субъективистов столь же безобидны, встречаются и безусловно вредные гипотезы, например, о том, что в усилителях не следует использовать отрицательную обратную связь.

Такое большое количество заблуждений объясняется, вероятно, тем, что аудиоэлектроника оказывается значительно более технически сложной, чем это представляется при первом знакомстве с предметом. Довольно просто, соединив вместе нужные радиоэлементы, получить работающий усилитель, и эта простота создает иллюзию того, что мы достаточно глубоко понимаем принцип работы созданного нами устройства. Напротив, мало кто решится пропагандировать такой же подход к проектированию, например, крыла самолета или двигателя ракеты: возможностей для совершения ошибки здесь намного больше, а цена ошибки – выше.

Автор потратит некоторое время и место в этой книге на рассмотрение некоторых идей субъективизма, но только для того, чтобы убедить читателя в том, что эти идеи не могут оказать ни малейшей помощи тем, кто надеется спроектировать качественный УМЗЧ. Заметим, что здесь речь идет только о стадии проектирования, реклама – это, конечно, уже другой вопрос.

1.5.1. Наука и субъективизм

Вряд ли еще какая-нибудь отрасль современной науки и техники столь же явно разделяется на два противоборствующих лагеря с точки зрения приверженности рационализму или субъективизму, как это случилось с аудиотехникой. Субъективизм все еще обладает заметным влиянием в области производства высококачественной аудиоаппаратуры, но его значимость в среде профессиональных звукотехников мала, так как близкое знакомство с «живым» звуком, а также необходимость зарабатывать себе на жизнь, используя надежное и высококачественное оборудование, создает заградительный барьер на пути большинства иррациональных влияний. (Заметьте, что антонимом к понятию «субъективист» является не «объективист», а «рационалист».)

Большинство отраслей современной технологии развиваются в направлении повышения каких-нибудь показателей, которые всегда можно измерить:

производители автомобилей конкурируют друг с другом, пытаясь повысить максимальную скорость или снизить потребление топлива, изготовители компьютеров увеличивают тактовую частоту процессоров... Улучшение любого из этих показателей качества выпускаемой продукции однозначно расценивается как шаг вперед. Напротив, в области Hi-Fi звуковоспроизведения большинство людей затрудняются в определении направлении развития.

Один субъективист сказал мне, что человеческое ухо является настолько сложным инструментом, что процесс восприятия звука не может быть однозначно соотнесен с теми электрическими параметрами, которые могут измерить наши приборы. Я надеюсь, что это крайняя позиция. Мой опыт профессионального разработчика аудиоаппаратуры и мои исследования в области психоакустики заставляют меня с сомнением относиться к идеям субъективистов. Хотя подобные воззрения еще распространены, но они вряд ли могут стать основой надежной методики проектирования аудиоаппаратуры.

1.5.2. Концепция субъективизма

Приведем краткое перечисление основных тезисов субъективизма:

- Объективные измерения показателей качества воспроизведения звука с помощью аудиоаппаратуры слабо коррелируют с субъективными впечатлениями слушателей и поэтому могут не приниматься во внимание, если они не соответствуют последним.
- Усилителям свойственен эффект деградации звука, который не известен ортодоксальной технической науке и не может быть измерен с помощью электрических приборов.
- Объяснения причин ухудшения качества звучания могут опираться на весьма широкие предположения о таинственных дефектах в конденсаторах или соединительных проводах, не подтвержденные какими-либо объективными свидетельствами.

Я надеюсь, что достаточно точно передал здесь основные идеи субъективизма. Заметим, что несмотря на ожесточенные дебаты, люди продолжают покупать обычные Hi-Fi системы воспроизведения звука, к тому же кажется весьма маловероятным, чтобы промышленность избрала для определения направления своего развития столь таинственные и далекие от науки концепции.

По аналогии с этим уместно вспомнить гонения на генетику и лысенковщину [1] в СССР, а также исследования в области парапсихологии, которые вот уже на протяжении 100 лет так и не смогли привести к получению объективно наблюдаемых и повторяемых результатов [2]. Возможно, читатель возразит, что парапсихология – не слишком подходящая аналогия, так как большинство нормально мыслящих людей согласится с тем, что в ней начисто отсутствует сам предмет исследования, в то время как вряд ли кто-либо осмелится заявить, что корреляция между объективно измеряемыми параметрами аудиоустройств и качеством звучания полностью отсутствует – достаточно приложить телефонную трубку к уху, чтобы наглядно убедиться в том, что ширина полосы пропускания в 4 кГц

и коэффициент нелинейных искажений, равный 10%, обеспечивают недостаточно хорошее качество звука.

Приведем более убедительный пример – теперь уже почти забытую историю «открытия» N-лучей. В 1903 году французский физик Рене Блондло (Rene Blondlot) заявил, что он обнаружил новый тип излучения, названный им N-лучами (это случилось вскоре после того, как Рентген открыл излучение, которое в настоящее время носит его имя). По утверждению Блондло, новые лучи преломлялись с помощью алюминиевой призмы, но обнаружить их можно было только с помощью субъективной оценки яркости свечения электрической дуги, на которую они якобы оказывали какое-то таинственное воздействие. Таким образом, никакое объективное измерение этих лучей не представлялось возможным. Тем не менее, сам Блондло и не менее 14 его коллег утверждали, что изменение яркости электрической дуги вполне наблюдаемо, и французская Академия наук выпустила более чем 100 статей по этой теме.

К сожалению, французский физик и его коллеги стали жертвами известного в науке явления, носящего название «ожидания экспериментатора». Американский ученый Роберт Вуд (Robert Wood) наглядно продемонстрировал субъективную природу явления, когда во время демонстрации незаметно убрал алюминиевую призму, но горе-экспериментаторы продолжали утверждать, что все равно наблюдают эффект изменения яркости.

Остается признать, что очень многие люди склонны обманываться в своих субъективных оценках какого-либо явления, поэтому подобного рода суждения не могут служить ориентиром при выборе направления прогресса в науке и технике.

1.5.3. Краткая история субъективизма

Ранняя история субъективизма начинается с того момента, когда слушатели восторженно заявили, что граммофон воспроизводит звук, не отличимый от реального. Интерес к звуковоспроизводящей аппаратуре вновь вспыхнул в послевоенный период, когда были приняты новые технические стандарты, например DIN 45-500, хотя вскоре после этого они неоднократно подвергались острой критике за свою излишнюю лояльность. В конце 60-х годов XX века эксперты пришли к более-менее единодушному мнению, что Hi-Fi аппаратура звуковоспроизведения должна иметь суммарный коэффициент нелинейных искажений не более 0,1%, достаточно широкую частотную характеристику (от 20 Гц до 20 кГц) и как можно более низкий уровень шума.

В начало 70-х годов к этому добавились требования о наличии защиты от перегрузок, но в любом случае обзоры и публикации по данной теме апеллировали к строгим техническим параметрам и в них отсутствовало всякое упоминание о субъективном качестве звучания.

Первой ласточкой новой истории субъективизма стала колонка *Subjective Sounds* («Субъективные звуки») Поля Мессенджера (Paul Messenger) в журнале *Hi-Fi News* в сентябре 1976 года (впоследствии это издание стало главным рупором субъективистов). Цитируем небольшой отрывок из этой публикации:

«Оценка качества звука всегда будет (почти) полностью субъективна, что имеет как свои сильные, так и слабые стороны, поскольку получение лабораторных данных требует больших затрат, и хотя человеческое ухо склонно ошибаться, но в то же время является чувствительнейшим из доступных нам инструментов восприятия». Заметим, что ни в одной из ранних публикаций сторонников субъективизма не содержалось даже упоминание о качестве работы и параметрах собственно усилителей. Только в марте 1977 года вышла статья Джина Хирага (Jean Hiraga), в которой подверглась суровой критике большая глубина отрицательной обратной связи в УМЗЧ, имеющих коэффициент нелинейных искажений около 2%. В том же номере журнала Поль Мессенджер заявил, что ламповый усилитель Радфорда (Radford) «звучит» лучше, чем транзисторный, и к концу года шумиха по этому вопросу уже была в самом разгаре. В августе 1977 года Хигара выступил с весьма спорным утверждением о якобы слышимых ухом человека искажениях в соединительных проводах, после чего уже можно было ничему не удивляться.

1.5.4. Ограниченность человеческого восприятия звука

Субъективисты апеллируют к известным свойствам человеческого слуха. Существует большое количество публикаций по психофизиологии слухового восприятия – психоакустике. Вкратце основные накопленные к настоящему времени факты из этой области формулируются следующим образом:

- Минимальное изменение амплитуды чистого тона, которое еще может воспринимать ухо человека, составляет около 0,3 дБ; номинальное значение этого параметра – от 0,5 до 1,0 дБ. Другими словами, человек ощущает, что звук становится чуть громче или чуть тише, когда изменение уровня звука достигает примерно 10% [4].
- Минимальное изменение высоты чистого тона (то есть частоты звукового колебания), воспринимаемое человеком, составляет 0,2% в диапазоне 500 Гц – 2 кГц. Именно к этому параметру – высоте звука – человеческое ухо является наиболее чувствительным.
- Минимальный слышимый уровень искажений – это самый трудный для точного измерения параметр, так как его значение зависит от многих факторов. Принято считать, что на слух воспринимаются нелинейные искажения, достигающие 1%, а для перекрестных искажений слышимый порог составляет 0,3% или даже ниже. Поэтому никто не может утверждать, что способен воспринимать улучшение качества звучания при снижении коэффициента нелинейных искажений усилителя с 0,005% до 0,001% [6].

Как известно, результаты измерения КНИ, выполненные с помощью обычного анализатора, могут иметь лишь ограниченное применение для предсказания субъективного качества воспроизведения звука. Очевидно, что при воспроизведении музыки уровень интермодуляционных помех более важен, чем коэффициент гармоник. Однако измерение последнего параметра дает опытному исследователю большое количество информации о самой первопричине нелинейности усилителя. Существуют и другие методы измерения уровня искажений, и хотя они

менее информативны, но учитывают сразу весь частотный диапазон и хорошо коррелируют с субъективными оценками качества звучания. Например, тест Белчера (Belcher) на уровень интермодуляционных искажений (его принцип иллюстрируется на рис. 1.1) заслуживает большего внимания, чем то, каким он пользуется

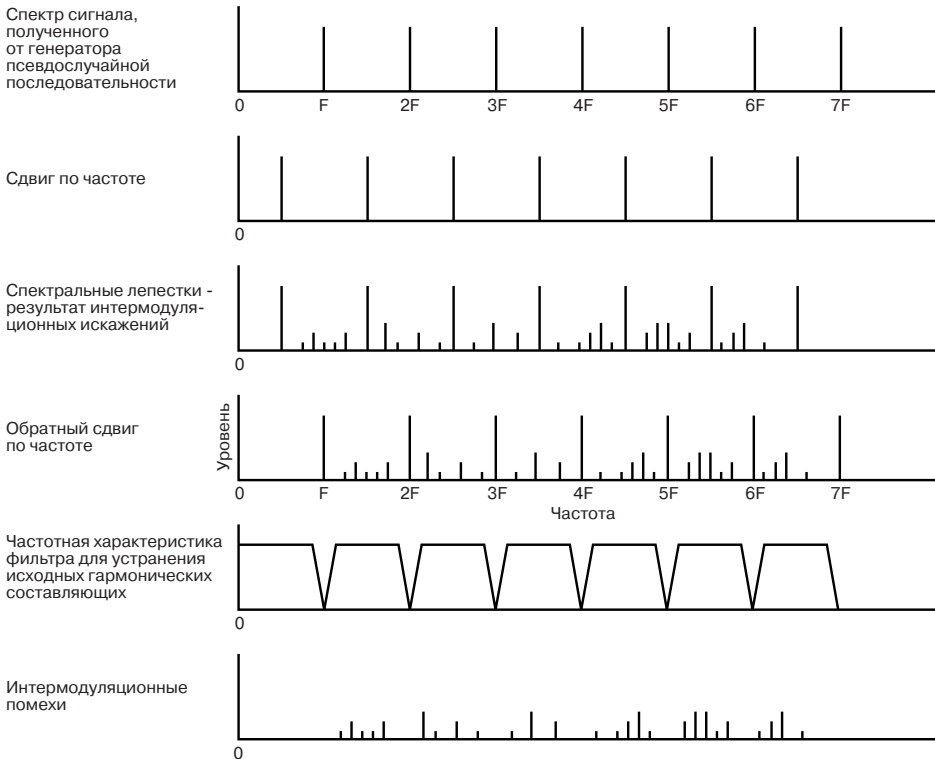


Рис. 1.1. Метод Белчера измерения уровня интермодуляционных искажений

в настоящее время; возможно, он приобретет популярность в связи с распространением в последнее время процессоров цифровой обработки сигналов.

Одно из возражений, высказываемых противниками измерения коэффициента нелинейных искажений, заключается в том, что этот параметр не позволяет выявить нелинейность усиления, имеющую предельно низкий уровень. Хоксфорд (Hawksford), например, утверждает, что «пороговые явления определяют предельную границу прозрачности усилителей» [7], а некоторые эксперты заявляют, что металлические контакты в схеме усилителей образуют что-то вроде микродиодов. Подобные (весьма вредные) гипотезы и в самом деле могут дискредитировать значимость измерений коэффициента нелинейных искажений.

Я разработал метод измерения предельно низких значений КНИ (до 0,01% при среднеквадратическом уровне сигнала 200 мкВ) и использовал его для измерения нелинейностей, вызванных электролитическими конденсаторами большой

емкости, различными контактами и длинными соединительными проводами, как обладающими, так и не обладающими теми таинственными свойствами, которые приписывают им субъективисты. Схема измерений показана на рис. 1.2, в ней использован малошумящий усилитель [8]. Использование делителя напряжения с малым значением сопротивления нижнего плеча, который служит для ослабления входного сигнала, позволяет свести шумы Джонсона¹ к минимуму. Никаких нелинейных искажений, вызванных испытываемыми элементами, обнаружить так и не удалось.

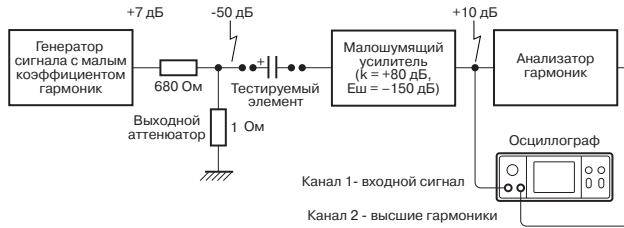


Рис. 1.2. Метод измерения низких значений коэффициента нелинейных искажений

Интермодуляционные искажения, очевидно, ухудшают разделение стереоканалов, но данный эффект практически невозможно обнаружить, пока он не достигнет по крайней мере значения 20 дБ, но в более-менее качественных усилителях его значения много меньше.

Фазовые и групповые задержки долгое время служили источником всякого рода споров. Стэнли Липшиц (Stanley Lipshitz) и др. отмечают, что эти эффекты, очевидно, заметны, но только если они имеют достаточно большую величину. Но ведь никто не проектирует усилители, которые бы воспроизводили верхнюю половину звукового спектра на три часа позже нижней. Поэтому обсуждения о влиянии фазовой задержки сосредоточились главным образом на динамиках, то есть там, где такие задержки еще могли бы иметь место, не сопровождаясь при этом наблюдаемым измерением частотной характеристики. Липшиц утверждает [10], что влияние фазового фильтра второго порядка с постоянной АЧХ может восприниматься ухом человека, в то время как Британская вещательная корпорация (BBC – British Broadcasting Corporation) в лице Харвуда (Harwood) [11] утверждает прямо противоположное, так что истина в этом вопросе пока еще не установлена. Следует заметить, что эта проблема не так уж и важна для проектировщика аудиоусилителей, поскольку требуется ужасающая некомпетентность, чтобы разработать схему усилителя, включающую в себя фазовый фильтр. В противном случае фазовые задержки в усилителе полностью определяются его частотной характеристикой (и наоборот) – данный факт хорошо известен из теории автоматического управления. Частота среза правильно спроектированного

¹Тепловые шумы, вызванные хаотичным движением носителей заряда, в технической литературе часто называются также шумами Найквиста. – *Прим. ред.*

аудиоусилителя располагается не слишком далеко за пределом его частотного диапазона и это, конечно, обуславливает небольшую фазовую задержку усиленного сигнала, но она слишком мала, чтобы быть заметной слушателю [8].

Исследования в области психоакустики показывают, что человеческий слуховой аппарат обладает удивительной чувствительностью, хорошо различает направление на источник звука и имеет широкий динамический диапазон, но его способность воспринимать малые изменения уровня сигнала или гармонические искажения не так уж велика. И это не должно вызывать удивления: в ходе эволюции человеческого организма на первое место всегда выдвигалась возможность быстро определить источник опасности (то есть услышать даже самый слабый звук и определить направление, из которого он исходит), а также способность хорошо различать речь. С точки зрения распознавания человеческой речи много важнее уметь выделять форманты (частотные диапазоны гармонических составляющих звуков речи, издаваемых с помощью голосового аппарата), а также разделять гласные и согласные, чем повышать значения параметров, рассматриваемых обычно для Hi-Fi аппаратуры. Возможно, само существование такого направления человеческого творчества, как музыка, является своеобразным побочным эффектом развития наших удивительных способностей, развитых в результате речевого общения.

1.5.5. Предмет веры: доктрины субъективизма

Все перечисляемые ниже утверждения считаются общепризнанными в среде субъективистов и неоднократно упоминаются в литературе как непреложные факты. Однако ни одно из этих положений за последние пятнадцать лет так и не нашло своего объективного подтверждения. Такой грустный рекорд, возможно, способны побить разве что студенты, обучающиеся на курсах парапсихологии.

- Обычно используемые при испытании аудиоаппаратуры синусоидальные колебания являются слишком стабильными сигналами и поэтому не соответствуют сложному характеру реальных сигналов, для усиления которых эта аппаратура предназначена.

Поскольку производные любого порядка для синусоидального колебания не равны нулю, то понятие стабильности к ним вряд ли применимо. Во всяком случае, нет оснований считать, что, например, синусоидальная волна со случайно изменяющейся амплитудой будет для усилителей более адекватным испытанием.

Возможно, подобного рода утверждения являются следствием некоторого «очеловечивания» аудиоаппаратуры: некоторые думают, будто усилитель «понимает», что именно он усиливает. Конечно, комбинация двадцати синусоидальных колебаний с различными частотами представляется человеку более сложным сигналом, чем одно такое колебание, но для усилителя оба этих сигнала сводятся всего лишь к последовательности мгновенных значений напряжения, которые необходимо увеличить по амплитуде в определенное число раз и подать на низкоомную нагрузку.

- Конденсаторы искажают проходящий через них сигнал, и этот эффект не может быть обнаружен с помощью приборов, используемых для измерения коэффициента нелинейных искажений.

Некоторые исследователи, опираясь на эксперименты по вычитанию импульсных сигналов при прохождении их через конденсаторы двух разных типов, заявили, что наличие ненулевого разностного сигнала якобы доказывает, что конденсаторы вызывают искажения звука. Однако, на мой взгляд эти эксперименты всего лишь демонстрируют хорошо известные недостатки реальных конденсаторов, такие как потери в диэлектрике и наличие внутреннего сопротивления, а также, возможно, уязвимости пленки диэлектрика, используемого в конденсаторах, к изменению полярности приложенного сигнала. Ни один из этих эффектов, тем не менее, не способен повлиять на качество звучания правильно спроектированного усилителя.

- Прохождение сигнала по соединительным проводам, проводникам печатной платы и через контакты переключателей вызывает ухудшение качества звука. Покрытие поверхности контактов драгоценными металлами уменьшают этот эффект, но не устраняют его полностью. Это ухудшение также не обнаруживается с помощью стандартных методов измерения нелинейности усилителей.

Подобные беспокойства по поводу электрических соединений весьма распространены, но пока что нет ни одного достаточно весомого доказательства существования данных эффектов. Искажения, вносимые коротким отрезком провода в электрический сигнал, невозможно обнаружить с помощью приборов. Что касается утверждения относительно того, что межсоединения образуют нечто вроде микродиодов, то оно полностью исключается с точки зрения известных современной науке свойств радиотехнических материалов. Никто так и не смог предложить какой-либо метод измерения подобных эффектов.

Наиболее значимый параметр динамической головки – это индуктивность ее обмотки. Под влиянием этой индуктивности частотная характеристика всей системы звуковоспроизведения действительно несколько изменяется на высоких частотах, но эти отклонения вряд ли могут превысить уровень 0,1 дБ при разумных значениях индуктивности обмотки (скажем, менее 4 мкГн). Конечное сопротивление соединительного провода (около 0,1 Ом), разумеется, может вызвать небольшие искажения сигнала из-за малых вариаций импеданса динамика, но они весьма малы (не больше 0,05 дБ) и не могут повлиять на качество работы усилителя.

Также маловероятно, что коррозия контактов может сказаться на параметрах звуковоспроизведения. Хорошо известный эффект – формирование со временем на серебряной поверхности контактов слоя сульфида из-за окисления на воздухе – как правило, нарушает контакт полностью, позволяя только пиковым значениям передаваемого сигнала проходить через слой сульфида. Но этот эффект слишком велик, чтобы являться причиной малозаметных искажений сигнала, о которых говорят субъективисты. Для устранения данного явления контакты следует покрывать слоем золота, но это дорогое удовольствие.

- Кабель, используемый в усилителях, якобы обладает односторонней проводимостью, то есть передает сигнал в одном из направлений лучше, чем в другом.

Носителем звукового сигнала является переменный ток. Он распространяется по кабелю одинаково, независимо от своего направления. Любой, кто способен поверить, что это не так, вряд ли может спроектировать хоть какой-то УМЗЧ, так что дальнейшие аргументы по этому вопросу излишни.

- Ламповые усилители обеспечивают более качественное звучание, нежели транзисторные.

Справедливости ради следует признать, что эффект «лампового звука» действительно может иметь место. Многие эксперты в самом деле предпочитают некоторую долю примеси второй гармоники сигнала, которая характерна для ламповых усилителей из-за того, что последние обычно имеют небольшую глубину отрицательной обратной связи и, следовательно, недостаточную линейность. Но HiFi аппаратура по определению должна обеспечивать высокую верность звуковоспроизведения, поэтому если требуется добавить к сигналу вторую гармонику, то это должно управляться с помощью отдельной кнопки на передней панели усилителя.

Использование ламповых усилителей связано с целым комплексом дополнительных проблем: это плохая линейность, низкая надежность, необходимость применения огромных трансформаторов с железными сердечниками (что еще более ухудшает линейность усилителя в целом). Современная мода на ламповые усилители остается для меня загадкой, тем более что хрупкие стеклянные сосуды с раскаленными анодами, питаемыми сотнями вольт постоянного напряжения, вряд ли прибавляют чувство безопасности их обладателям.

Недавнее достижение субъективизма – одноцокольные триоды с прямым накалом – весьма дороги. Построенные на них усилители из-за асимметрии активного элемента имеют большой уровень второй гармоники сигнала и, следовательно, высокое значение коэффициента нелинейных искажений и требуют использования очень больших выходных трансформаторов, которые могли бы выдержать высокое значение постоянной составляющей анодного тока и сердечник которых при этом еще не входил бы в насыщение. В результате их выходная мощность ограничена величиной 10 Вт, если не меньше. В недавних обзорах говорится, что общий коэффициент нелинейных искажений усилителя Cary CAD-3000SEI достигает значения 3% при выходной мощности 9 Вт, и это при стоимости 3400 фунтов! К тому же еще требуется покупать отдельный предусилитель.

- Отрицательная обратная связь является безусловно вредной и без ее использования звучание усилителей всегда оказывается более качественным.

В действительности ООС не только не вредна, но является неотъемлемым принципом проектирования электронной аппаратуры, способным при надлежащем использовании улучшить значение практически любого ее параметра. Как правило, субъективисты критикуют общую отрицательную обратную связь, необходимость местной ООС нехотя признается ими, так как весьма трудно

разработать электронную схему без ее использования. Часто утверждается, что глубокая ООС искажает фронты импульсов, но это не так. Более подробно эту тему мы обсудим позже, кроме того, читатель может найти дополнительные сведения в [15].

- Регуляторы тембра ухудшают качество звучания, даже когда их регулировка настроена на плоскую АЧХ.

Обычно это утверждение обосновывается фазовыми сдвигами в регуляторах тембра. Но при плоской АЧХ их влияние не может восприниматься ухом человека. Без сомнения, сами по себе регуляторы тембра совершенно необходимы, чтобы скорректировать акустику помещения, недостатки акустических колонок или несбалансированность исходной аудиозаписи. В любом случае накладно было бы компенсировать неидеальность частотной характеристики аудиоканала с помощью модернизации громкоговорителей. Хотя это и возможно, но является слишком дорогим способом коррекции тембра.

- Качество источника питания оказывает влияние на работу усилителя, более тонкое, чем обычное «плавание» звука.

В действительности все достаточно хорошие усилители слабо чувствительны к небольшим колебаниям напряжения питания, особенно к этому устойчивы операционные усилители. Поэтому рекомендации субъективистов, которые утверждают, что следует использовать позолоченные провода большого сечения, рассчитанные на ток до 13 А, кажутся лишними здравого смысла. К тому же непонятно, где следует остановиться? Возможно, следует позолотить все провода, используемые на подстанции?

- Моноблочная конструкция (то есть использование двух отдельных блоков усилителей) всегда более предпочтительна, так как снижает влияние перекрестных искажений.

На самом деле нет никакой необходимости идти на удорожание конструкции, пытаясь снизить взаимные наводки, так как минимальное их значение, которое еще является действительно необходимым, составляет около -20 дБ. Но это может быть достигнуто обычными средствами: последний спроектированный мной усилитель обеспечивал -90 дБ при частоте 10 кГц без использования каких-либо дополнительных ухищрений, кроме обычных в таких случаях предосторожностей. Те же, кто намерен следовать моде и отдают предпочтение моноблочному исполнению, должны мириться с удорожанием механических частей аппаратуры практически в два раза.

- Микрофонный эффект оказывает заметное влияние на качество звука, поэтому требуется надежная виброизоляция аудиоаппаратуры.

Микрофонный эффект проявляется в ламповых предварительных усилителях; что касается полупроводниковых УМЗЧ, то здесь его влияние вряд ли может быть заметно на слух, так как уровень паразитных колебаний в этом случае много меньше уровня шума самого усилителя.

В литературе практически не упоминаются методы измерения микрофонного эффекта, поэтому предлагаю читателю повторить единственный известный мне эксперимент: возьмите микрофонный предусилитель с коэффициентом усиления около +70 дБ и резко ударьте отверткой по входному электролитическому конденсатору – вы услышите в динамике слабый шум, в котором преобладают низкие частоты. Из всех радиоэлементов только электролитические конденсаторы демонстрируют подобный эффект. Но любые возможные вибрации аудиоаппаратуры производят намного меньшие искажения, чем сильный удар отверткой по конденсатору.

Давайте на минуту представим, что какое-либо из вышеперечисленных утверждений субъективистов является верным, и попробуем проанализировать вытекающие отсюда следствия. Имеется эффект, который не могут обнаружить измерительные приборы, но который является безусловно слышимым на слух. Во-первых, можно постулировать, что для каждого вида звуковых искажений имеется какое-либо характерное изменение в рисунке флуктуаций давления, которое воспринимается ухом человека, и что соответствующей модификации подвергнулся электрический сигнал, проходящий через усилитель. Если это не так, то мы должны признать, что существует некий неизвестный нам канал передачи информации, помимо предполагаемого в этом случае электрического сигнала, но в таком случае мы приходим к потусторонним силам, не признаваемым современной наукой. К счастью, пока никто из субъективистов и не пытался утверждать обратное. Следовательно, должны наблюдаться эти самые отклонения в каких-либо параметрах электрического сигнала, проходящего через усилитель, но эти изменения почему-то не обнаруживаются с помощью наших приборов. Как такое возможно? Вероятно, существуют два способа объяснить этот феномен: первое предположение заключается в том, что стандартные методики измерения не обеспечивают достаточную чувствительность, чтобы зарегистрировать соответствующие отклонения параметров, но тогда возникает вопрос, как человеческое ухо способно различить столь малые искажения сигнала? Второе (более популярное) объяснение утверждает, что стандартные методы измерения коэффициента нелинейных искажений в принципе не могут адекватно отразить дефекты в усиливаемом сигнале, которые проявляются только при воспроизведении музыки или человеческой речи. Эти «только музыкальные» виды искажений не могут быть также зафиксированы с помощью многочастотного метода измерения интермодуляционных искажений, и даже с помощью псевдослучайных сигналов в тесте Белчера. Но тест Белчера позволяет эффективно проверить аудиотракт сразу во всем диапазоне усиливаемых частот, и трудно представить существование каких-либо искажений, которые могли бы пройти совершенно незамеченными.

Самое очевидное свидетельство в пользу ошибочности субъективизма представляет нам разностный тест. Он ясно показывает, что при вычитании сигналов на входе и выходе УМЗЧ не остается ничего, что могло бы восприниматься человеческим ухом.

Разностный тест предложен Баксандаалом (Baxandall) в 1977 году [17]. Принцип его проведения иллюстрируется на рис. 1.3. Точная подстройка верхней

и нижней частоты среза фильтра предотвращает малые изменения полосы пропускания, которые могли бы заглушить имеющийся разностный сигнал. За прошедшие годы субъективисты даже не пытались как-нибудь ответить на этот эксперимент.

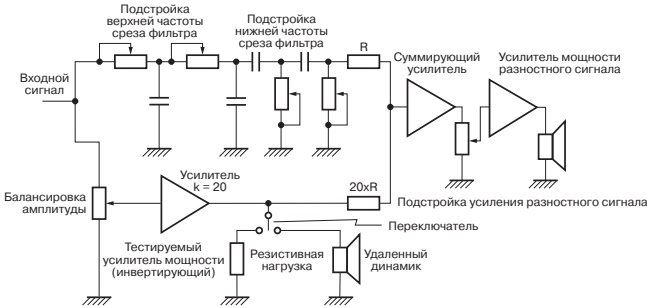


Рис. 1.3. Разностный тест Баксандалла

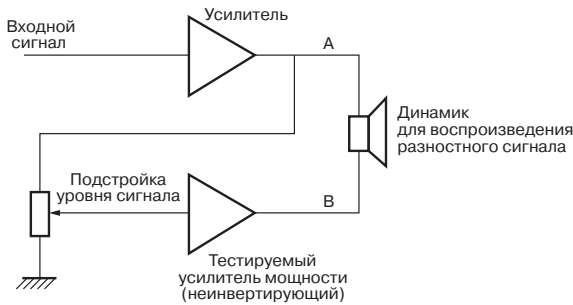


Рис. 1.4. Разностный тест Хафлера

Упрощенная версия этого теста предложена Хафлером (Hafler [18]). Этот метод менее чувствителен, но более нагляден, так как содержит меньшее количество электронных компонентов на пути тестируемого сигнала. Схема измерения показана на рис. 1.4. Видный субъективист, присутствовавший на демонстрации этого эксперимента, был вынужден заявить, что использованный при проведении опыта лабораторный набор переключателей вызывает такие сильные искажения сигнала, что они затмевают любые искажения в тестируемом усилителе, однако, это вряд ли можно считать серьезным аргументом.

1.5.6. Длина аудиоканала

Очевидный довод против сторонников существования неизмеряемых приборами таинственных эффектов в усилителях – это тот факт, что при записи в студии сигнал проходит через многочисленные соединения, имеющиеся в сложных микшерских пультах, причем некоторые сигналы (например, вокальная партия или ведущая гитара) проходят через него по крайней мере дважды: один раз при записи и один – при сведении фонограмм. Если бы мистические искажения, на суще-

ствовании которых настаивают приверженца субъективизма, имели место, то на своем пути через сотню усилительных элементов, десятки коммутаторов и сотню метров обычного экранированного кабеля они бы, безусловно, достигли бы изменяемых уровней.

1.5.7. Последствия заблуждений

Такое положение дел в аудиотехнике имеет весьма неприятные последствия. Во-первых, поскольку отсутствуют строгие критерии, по которым можно судить о качестве выпускаемой продукции, то страдают производители, так как теперь в конкурентной борьбе выживает не тот, чья продукция лучше, а тот, кто выиграл в лотерее рекламных лозунгов. Так как субъективные оценки не удовлетворяют принятому в науке и технике критерию повторяемости, то коммерческий успех становится игрушкой в руках изменчивой моды. Это можно терпеть в вопросах стиля одежды, но в деле производства Hi-Fi аппаратуры следует ожидать более технического подхода.

Во-вторых, от претензий субъективистов страдают разработчики, так как никакая техническая изобретательность и достижение хороших параметров качества не гарантируют более благосклонных публикаций в печати, а весьма дорогие нововведения типа позолоченных проводов приходится применять только как дань моде, даже если проектировщик убежден в полной бесполезности таких новшеств.

В-третьих, раз игнорируются объективные значения параметров качества выпускаемой продукции, то открывается дорога для производства плохой аудиоаппаратуры. В недавних обзорах упоминался предусилитель Counterpoint SA7 стоимостью 795 фунтов, при этом имеющий запас по перегрузке всего 12 дБ. Другой предусилитель (Burmester 838/846) при цене 2040 фунтов имел значение этого же параметра, равное 15 дБ, а еще один (стоимостью 1550 фунтов) «хвастался» значением коэффициента нелинейных искажений в 1% на частоте 1 кГц. Еще 10 лет назад такая устрашающая нелинейность отпугнула бы покупателя! По цене 5700 фунтов можно приобрести моноблочный усилитель, нелинейность которого снижена до 0,3% (Audio Research M100-2). Но это, разумеется, не означает, что нельзя купить аудиоаппаратуру с лучшим значением основных параметров качества. Например, всего за 725 фунтов можно приобрести предусилитель и выходной усилитель с запасом по перегрузке 31 дБ и коэффициентом нелинейных искажений 0,003% на частоте 1 кГц (Audiolab 8000C/S000P). Как видим, парадоксальность ситуации заключается в том, что самая дорогая аппаратура имеет самое низкое качество, выраженное в объективном значении основных технических характеристик. Я думаю, большинство людей, независимо от своей приверженности или неприятия субъективизма, согласится с тем, что такое положение вещей можно назвать странным.

Наконец, вызывает большие сомнения нравственная позиция так называемых экспертов, которые внушают неспециалистам – потенциальным покупателям целесообразность покупки весьма дорогостоящей техники с сомнительным качеством.