

Компенсационный метод тестирования моделей усилителей звуковой частоты на этапе их проектирования.

Основные измеряемые сегодня параметры такие как КНИ и ИМИ не коррелируют с качеством звука.

Такие параметры как КНИ и ИМИ показывают только вносимые усилителями продукты искажений (гармоники, продукты интермодуляции) в установившемся режиме, но не отражают динамические искажения возникающие в моменты изменения амплитуды сигнала или его частоты, а также не отражают искажения памяти.

Аннотация

Использование симулятора для изучения параметров различных усилителей с ООС позволило установить корреляцию между вносимым временем задержки прохождения сигнала с имеющимися сведениями о субъективно оцениваемом качестве звучания, что указывает на целесообразность применения этого метода на этапе проектирования электронных усилителей высокой верности воспроизведения для аудиосигналов.

С помощью симулятора установлено что усилители с наименьшим временем задержки прохождения сигнала вносят и наименьшие дополнительные искажения в начале и конце бурстов, а также в моменты изменения частоты или амплитуды сигналов что является непрерывным процессом в звуковых сигналах.

1. Введение

Измерение искажений имеет основополагающее значение для проектирования и оценки аудиосхем. С самого начала развития схемотехники аудиоусилителей было определено несколько методов измерения искажений, которые широко используются для улучшения аудиосхем по сегодняшний день. Однако оценка усилителей высшего качества с помощью прослушивания не соответствует цифрам, полученным с помощью этих методов и все больше и больше людей предпочитают ламповые схемы, или схемы без применения общей ООС несмотря на их низкие показатели искажений.

Были попытки определить новые, более точные измерения, лучше коррелирующие с субъективными тестами, но без особого успеха. Объяснение этой неудачи может заключаться в том, что эти новые измерения основаны на классическом использовании синусоидальных сигналов в установившемся режиме без учета природы реальных звуковых сигналов. Реальный сигнал похож на что угодно, но только не на стандартный сигнал в 1 кГц. Звуковой сигнал меняется псевдослучайным образом по амплитуде, частоте, спектральному составу. Вопросы теоретических основ искажений в сигналах близких к звуковым плодотворны и ведут к открытию новых горизонтов в проектировании усилителей дружелюбных слушателям. Эта работа является дальнейшим развитием работы [1].

2. Обобщенный теоретический анализ

2.1. Традиционный теоретический анализ

На рис. 1 представлена классическая теоретическая модель аудиоусилителя. Эта модель является основой для измерения искажений усилителя. Он состоит из идеального усилителя и двух генераторов искажений: генератор линейных искажений соответствует амплитуде, фазе, наклону фазы и групповой задержке, возникающим в результате ограничений полосы частот реального усилителя; генератор нелинейных искажений соответствует нелинейной передаточной характеристике реального усилителя.

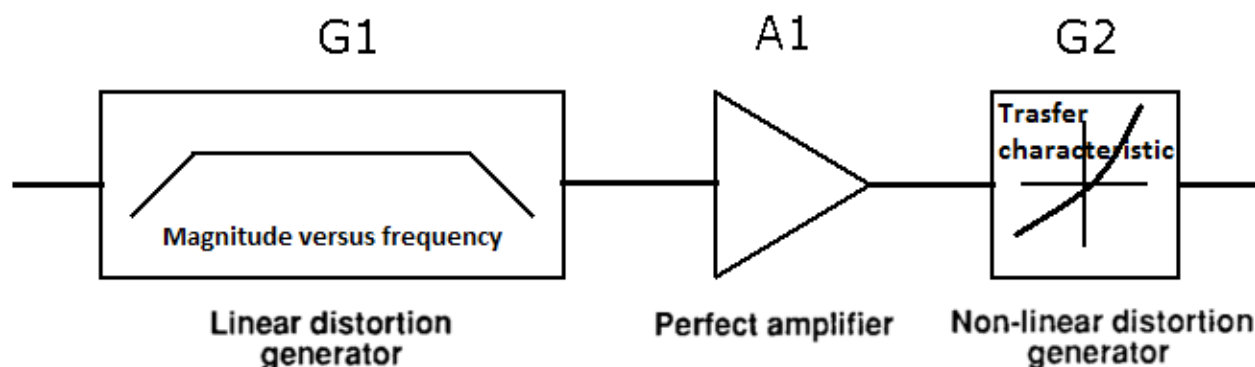


Рис. 1. Классическая теоретическая модель аудиоусилителя

Что касается звука, под искажением понимается любой вид деформации выходного сигнала по сравнению с его входным сигналом. Технически к дополнительным искажениям может привести любой вид обработки звука (эквалайзер, сжатие, временные эффекты и т. д.)

Цель измерения текущих искажений состоит в том, чтобы охарактеризовать генераторы искажений. Ограничение полосы и нелинейная передаточная функция измеряются для того, чтобы полностью охарактеризовать тестируемую схему и определить ее искажения для любого аудиосигнала. Характеристики генераторов искажений производятся синусоидальными сигналами.

Этот подход является строгим и действителен до тех пор, пока действительна сама модель. Справедливость модели искажения широко признана, даже несмотря на то, что эта модель не принимает во внимание известные явления искажений:

- переходные интермодуляционные искажения связанные с поворотом сигнала SID (Slew-rate Induced Distortion),
- искажения памяти,
- динамические искажения связанные со сложным характером реальных сигналов,
- искажения во временной области.

Причина этого в том, что применяются устаревшие традиционные методы измерений с применением стандартных измерительных приборов и синусоидальных сигналов в установившемся режиме. Однако применение более сложных тестовых сигналов в виде бурстов и сигналов треугольной формы при измерении искажений компенсационным методом показывает, что линейные и нелинейные искажения могут комбинироваться более сложным образом, чем в классической модели усилителя. Таким образом, их нелинейность не может быть адекватно проанализирована с помощью синусоидальных волн и, следовательно, с помощью классических измерений искажений.

Была попытка оценивать качество усилителей с помощью дифференциального теста «прямого провода» (SWDT - «straight-wire» differential test) [2]. Однако этот тест измерял векторные погрешности а не искажения. И хотя условием выполнения теста должна быть задержка прохождения сигнала на частоте тестирования всего 8 нс положительный результат теста не гарантировал качество звука тестируемого усилителя так как не учитывал продукты искажений во временной области и поведение ГВЗ сразу за пределами звукового диапазона.

2.2. Новый теоретический анализ

Тщательный теоретический анализ звуковых цепей выявляет множество возможных причин, делающих характеристики нестабильными и особенно изменяющимися в зависимости от сигнала. Эти изменения часто имеют постоянные времени, вызывающие явления памяти, а также приводят к деградации важных составляющих сигнала отвечающих за естественность звучания.

Для анализа искажений может быть предложена новая модель тестирования схемы (новый компенсационный метод тестирования), включающая идеальную линию задержки X1, дополнительный идеальный усилитель A2 и сумматор X2 (рис. 2).

В идеальном случае, для того чтобы усилитель не вносил искажений в передаваемый сигнал, необходимо, чтобы кривая изменения напряжения на выходе точно повторяла в увеличенном масштабе кривую изменения напряжения на входе. При этом неизбежен сдвиг во

времени Δt между входным и выходным напряжениями, равный времени прохождения сигнала через усилительное устройство (time Propagation Delay).

Условие неискаженного усиления сигнала может быть записано в виде:

$$V_{out}(t) = V_{in} K_u (t - \Delta t) = V_{in} K_u (t - t_{PD})$$

где

K_u – коэффициент усиления на частоте тестирования;

t – время в которое нас интересует значение выходного напряжения;

t_{PD} – время задержки прохождения сигнала на частоте тестирования [3]

Для этого необходимо, чтобы соотношения амплитуд и фаз гармонических составляющих выходного напряжения были соответственно такими же, как и у входного напряжения. Это означает, что как изменения амплитуд, так и запаздывание во времени всех гармонических составляющих не должны зависеть от частоты, а это возможно только при постоянстве ГВЗ.

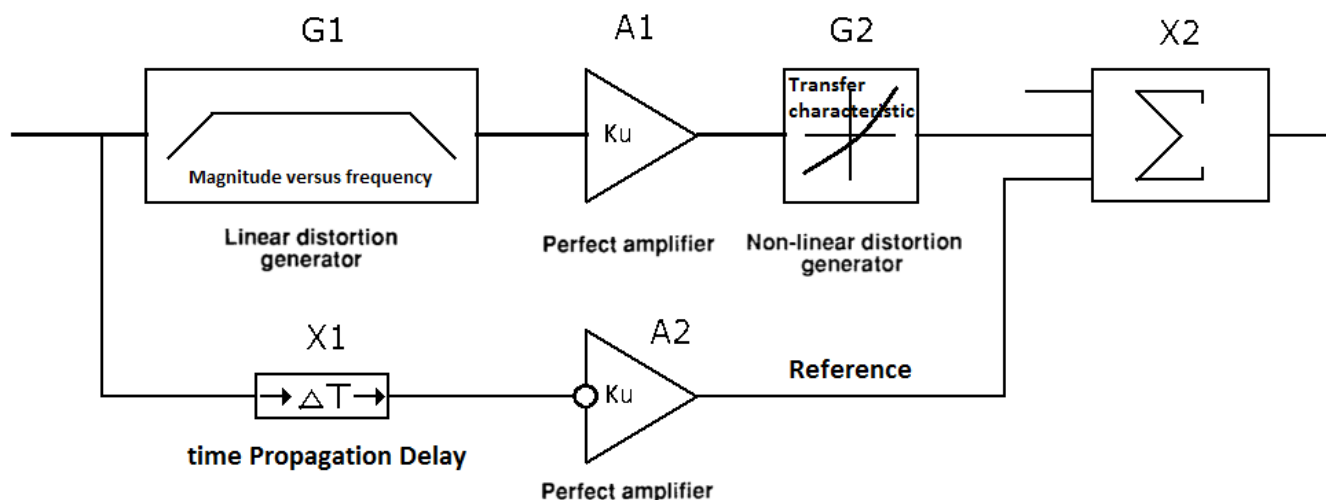


Рис. 2. Компенсационный метод измерения искажений

При измерении компенсационным методом входной сигнал является эталоном и не должен подвергаться никакой обработке кроме масштабирования и сдвига во времени.

Любой усилитель имеет усиление (K_u) и задержку прохождения сигнала t_{PD} (time Propagation Delay). За эталон для сравнения принимают входной сигнал умноженный на K_u и сдвинутый во времени на время задержки t_{PD} . Ориентировочное значение задержки берут с горизонтального участка ГВЗ графика Боде. Окончательное значение уточняется в процессе тестирования специальными сигналами (см. п.3). Входной сигнал умноженный на K_u назовем приведенным к уровню выходного сигналом или просто приведенным сигналом.

Далее путем вычитания эталона из выходного сигнала и получают продукты искажений, показано на рис. 2. При этом сразу получаем все продукты искажений в натуральном масштабе, в том числе и искажения памяти (memory distortion) которые не выявляются никакими другими тестами (КНИ, ИМИ и др.). В симуляторе идеальный усилитель A2 может быть заменен простой операцией умножения, а сумматор X2 — операцией вычитания сигналов.

Усилители без ООС состоят из двух основных узлов:

усилитель напряжения (УН) и усилитель тока - выходной каскад (ВК) который чаще всего не нуждается в индуктивности на выходе.

Оба этих узла имеют малое время задержки прохождения сигнала (не более 50 нс) и как правило достаточно широкополосны так как не охвачены коррекцией для обеспечения устойчивой работы и существенно ограничивающей полосу пропускания.

Типовое время задержки прохождения сигнала в усилителях с ООС находится в пределах 0,2...3,5 мкс и только в редких образцах опускается ниже 0,1 мкс.

Следует различать следующие виды искажений:

- нелинейные искажения в виде гармоник (дополнительные гармоники в спектре);
- продукты интермодуляции в случае двух или мультитональных сигналов;
- линейные искажения: изменение амплитуды сигнала и его фазы без добавления гармонических составляющих (имеют место в установившемся режиме);
- переходные искажения — искажения связанные с постоянными времени входных цепей и цепей ОС. Во время переходных процессов гармонические сигналы становятся квазигармоническими и обогащаются дополнительными гармоническими составляющими [4];
- временные искажения резонансного характера связанные с наличием индуктивности на выходе усилителя и реактивным характером нагрузки. Этот вид искажений также может давать нежелательный дополнительный уровень гармонических составляющих;
- искажения памяти (искажения связанные с тепловыми процессами в полупроводниках и с электрическими постоянными времени);
- динамические интермодуляционные искажения сигнала типа SID (Slew-rate induced distortion) возникающие в моменты его отклонениями от синусоиды: изменение частоты, изменение амплитуды или и то и другое одновременно что и имеет место в звуковых сигналах непрерывно.

Традиционными методами измерения искажений выявляется только первые два вида искажений которые слабо коррелирует с качеством звука.

Последний вид искажений зависит от времени прохождения сигнала в усилителе. Этот вид искажений наиболее неблагоприятен, так как ведет к деградации звука, к потере микродинамики - «смазывает» тонкие детали звукового материала подобно компрессору $mp3$.

Усилители с общей ООС подвержены всем видам искажений, в то время как усилители без ООС в наименьшей степени подвержены последнему виду искажений.

3. Новый набор тестовых сигналов.

Компенсационный метод измерения искажений не нов, одно из первых упоминаний об этом методе описано в [5]. Следующие упоминания можно найти в работах [6] и [7].

К недостаткам указанных методов можно отнести то, что в качестве линии задержки для входного сигнала применялись RC-цепочки. Такие линии задержки вносят переходные и линейные искажения в тестовые сигналы как эталоны что недопустимо.

Для выявления всех видов искажений необходимо использовать идеальную линию задержки что возможно в симуляторах в процессе отладки схем, а также применять вместо синусоидальных сигналов более сложные тестовые сигналы.

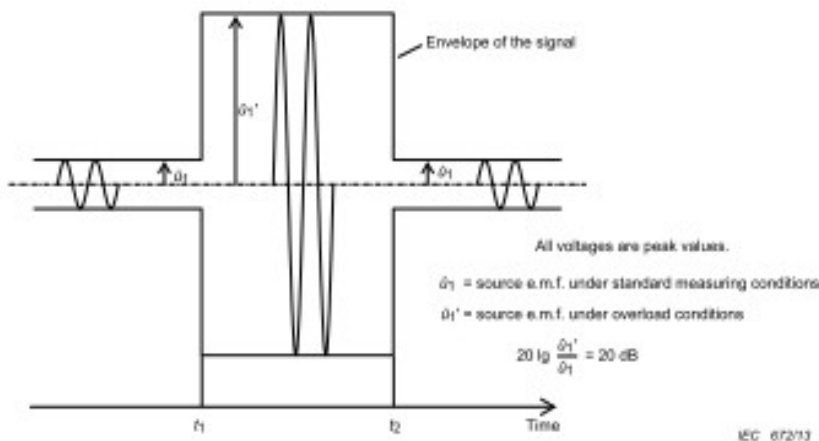
К таким сигналам можно отнести следующие сигналы:

- бурсты частотой 10 кГц (2-3 периода) с чередующейся полярностью первого полупериода;
- бурсты частотой 10 кГц разной амплитуды без разрыва фазы;
- бурсты частотой 10 и 20 кГц без разрыва фазы, в том числе и разной амплитуды;
- треугольные сигналы частотой 10 кГц.

Перед подачей таких сигналов на вход тестируемой модели усилителя их подвергают обработке ФНЧ первого порядка с частотой среза 100 кГц (как в тесте DIM-100). В результате скорость нарастания на поворотах сигнала (в начале и конце бурстов, в местах изменения амплитуды сигнала или его частоты, а также на вершинах треугольного сигнала) не превышает 0,5 В/мкс что в 100 раз меньше значения $SR = 50$ В/мкс в соответствии с требованиями Hi-Fi.

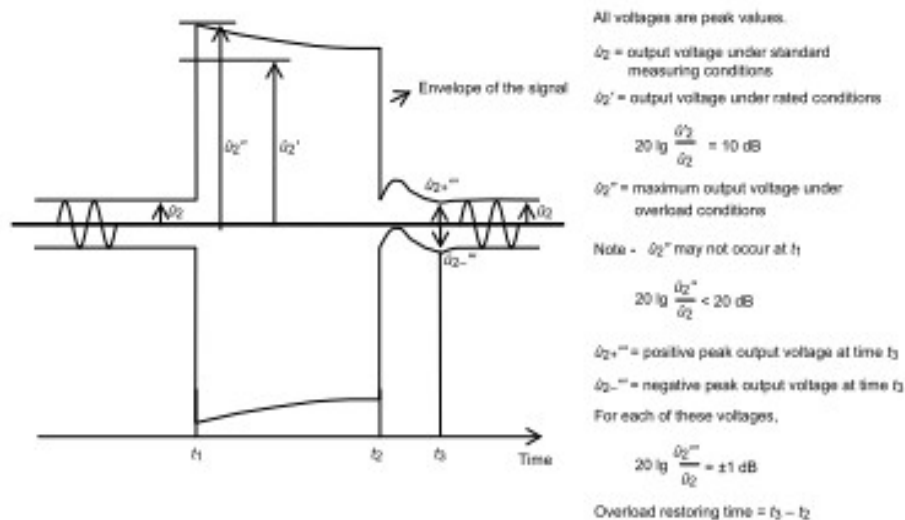
Что касается ТИМ-искажений (которые некоторые авторы путают с SID-искажениями), то в современных усилителях они не проявляются на частоте 20 кГц, и тем более на тестовых сигналах частотой 10 кГц.

Сигналы типа бурст рекомендованы как тестовые и стандартом IES 60268-3, рис. 3



IEC 612/13

Figure 4a – Oscillogram of the source e.m.f. for measuring overload restoring time (see 14.6.5)



IEC 613/13

Figure 4b – Oscillogram of the output voltage when measuring overload restoring time (see 14.6.5)

Figure 4 – Oscillogram when measuring overload restoring time

Рис. 3. Пример применения бурстов в соответствии со стандартом IES 60268-3

После генератора (перед входом усилителя) имеет смысл вставить линию задержки на 50 мкс, а при просчете оставить место не менее 200 мкс для возможности наблюдения возможных переходных процессов по окончании второго бурста.

Применение коротких бурстов (достаточно двух периодов) следующих друг за другом с интервалом в 1...3 периода позволяет выделить в паузах как переходные искажения, так и искажения памяти которые могут быть зависимы от полярности первого полупериода в бурстах.

В качестве эталона продуктов искажений первых двух тестовых сигналов можно использовать продукты искажений выделенные на синусоидальном сигнале в установившемся режиме с помощью режекторного фильтра на 10 кГц, рис. 4

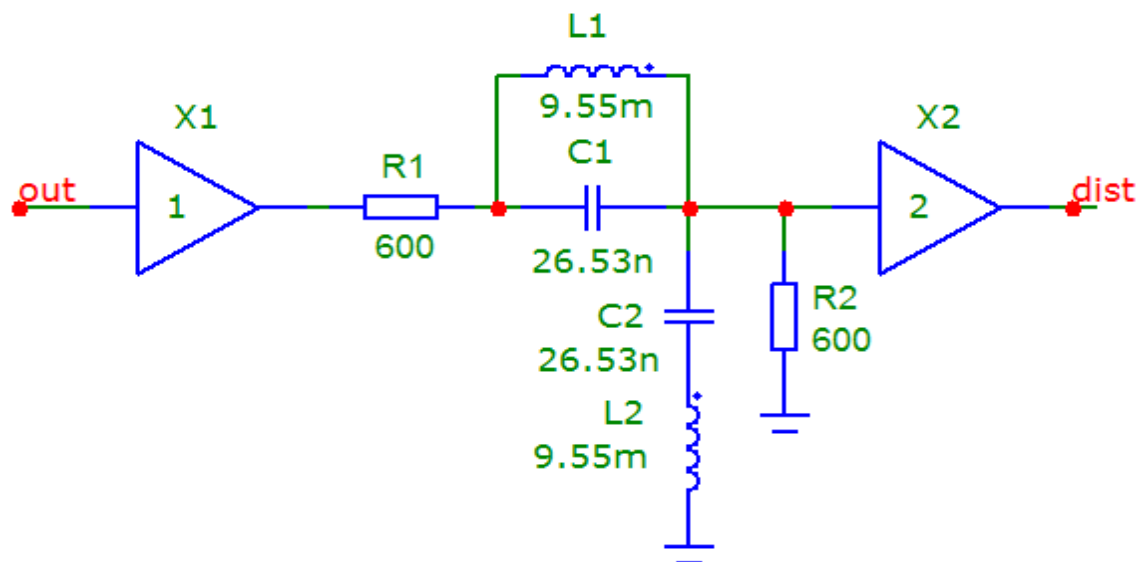


Рис. 4. Режекторный фильтр на частоту 10 кГц

Диаграмма Бode такого фильтра представлена на рис. 5

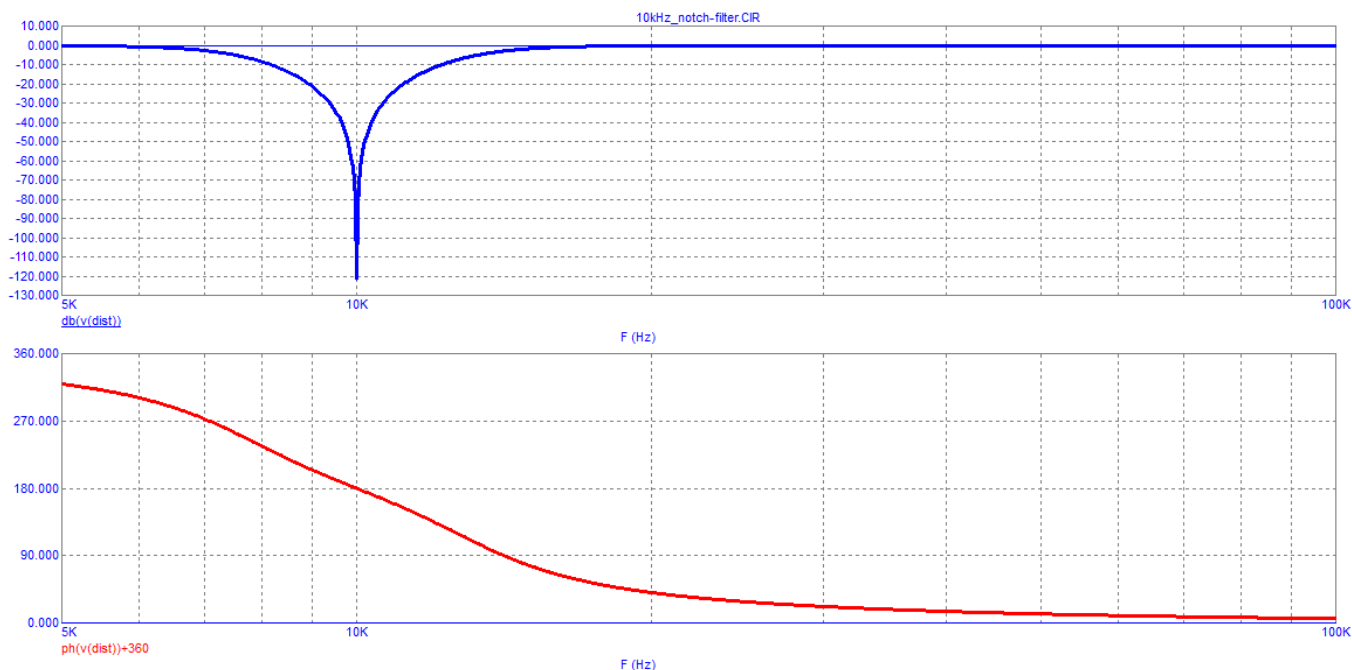


Рис. 5. Диаграмма Бode режекторного фильтра.

Из диаграммы Бode видно что уже начиная с 20 кГц (2-я гармоника тестового сигнала) коэффициент передачи фильтра равен 1, а максимальное отклонение по фазе менее 45 градусов для 2-й гармоники сигнала.

При использовании такого фильтра, например в программе Micro Cap запускают тест Transient на 2 мс и смотрят продукты искажений в интервале 1,72 мс (т. е. по окончании переходных процессов в фильтре).

Можно с уверенностью сказать что уже со второго периода сигнала частотой 10 кГц у подавляющего большинства усилителей (особенно у усилителей постоянного тока (УПТ) в которых нет переходных искажений связанных с наличием конденсаторов на входе, выходе и в цепи ОС) спектр искажений мало отличается от спектра в установившемся режиме. Поэтому при проведении теста компенсационным методом задача инженера использующего этот метод состоит в том чтобы получить максимальное совпадение продуктов искажений второго периода бурстов и последующих с продуктами искажений на выходе режекторного фильтра как по амплитуде, так и по форме. Это достигается уточнением как коэффициента передачи, так и времени идеальной

линии задержки.

4. Корреляция с тестами прослушивания

В работе [1] доказано что усилители с отсутствующими искажениями памяти (в частности ламповые усилители) выгодно отличаются по качеству звука от усилителей в которых подобные искажения присутствуют.

Был проведен анализ информации об усилителях без NFB таких фирм как Densen, Threshold, Pioneer, Nakamichi, Akai а также об усилителях без использования глобальной NFB таких разработчиков как Чарлез Хансен, Нельсон Пасс, Jeff Rowland, Mike Malinowski, Владимир Шушурин (Lamm) и др.

Несмотря на относительно высокий уровень искажений по сравнению с усилителями имеющими глубокую ООС именно эти усилители обеспечивают наилучшее качество звука. И это не удивительно, ведь задержка прохождения сигнала в таких усилителях ничтожно мала, а спектр гармоник короткий, спадающий.

Одновременно проделана большая работа с моделями усилителей с ООС. Время задержки прохождения сигнала в таких усилителях колеблется в пределах 0,2...3,5 мкс. Более того, такие усилители имеют низкую частоту первого полюса, их выходное сопротивление не постоянно в звуковой полосе и имеет фазовый сдвиг в соответствии с фазой петлевого усиления что также не способствует качеству звука. Результат повторялся с неизбежной стабильностью: чем меньше задержка прохождения сигнала — тем шире малосигнальная полоса пропускания, тем более быстродействующая ОС, тем лучше она справляется с коммутационными и другими видами искажений, тем меньше модели таких усилителей подвержены динамическим интермодуляционным искажениям типа SID в моменты изменения как частоты, так и амплитуды входного сигнала, и тем меньше шумовая подставка при измерении ИМИ а значит и выше корреляция с качеством звука.

В работе [8] был проведен анализ причин возникновения SID и сделан вывод что одна из причин их возникновения чрезмерная глубина ООС и ее недостаточное быстродействие. Оптимальной глубиной ООС при достаточном быстродействии (ГВЗ не более 100...120 нс) было рекомендовано значение 30...40 дБ.

5. Вывод.

Представлен компенсационный метод измерения всех видов искажений. Метод реализован и опробован на большом количестве моделей усилителей звуковой частоты и показал высокую эффективность.

Сегодня когда ни одна разработка аудиоусилителей не обходится без предварительного моделирования в симуляторе и оптимизации таких основных параметров как запас по фазе и усилению на реактивной нагрузке целесообразно измерять ГВЗ и анализировать его поведение далеко за пределами звукового диапазона. Спад ГВЗ должен быть плавным, без значительных выбросов и не принимать отрицательных значений.

При разработке усилителей с ООС следует избегать разработок с ГВЗ более 100 нс. в диапазоне частот от 5 кГц до 300 кГц. Подъем ГВЗ за пределами звукового диапазона выше 100...150 нс в диапазоне частот до 300 кГц нежелателен. Небольшой подъем ГВЗ с невысокой добротностью допустим в районе 1 МГц и выше с последующим плавным спадом. Выбросы ГВЗ с высокой добротностью могут говорить о склонности усилителя к паразитной генерации. Наиболее предпочтительными следует признать усилители постоянного тока (УПТ) у которых ГВЗ постоянно от инфранизких частот (в некоторых паспортах на усилители указывают «от DC»).

Если усилитель разработан грамотно и его ГВЗ горизонтальная линия как минимум от 5 кГц и до нескольких сот кГц то выравнивание эталона и выходного сигнала происходит автоматически до 15...20 гармоник звукового диапазона. В THD в лучшем случае учитывается 10 гармоник, а часто и вообще до 80 кГц (т. е. до 4-х гармоник сигнала частотой 20 кГц).

Что касается допустимого уровня THD, то психоакустика дает такой ответ: «Пороги слуховой чувствительности существенно зависят от характера нелинейности: при появлении низших (второй, третьей) гармоник пороги слуха для тональных (одиночных, синусоидальных) сигналов составляют 0,1%, для фортепианной музыки 1-2%, для эстрадной музыки до 7%.» [9].

В соответствии со стандартом [10] от усилителя звуковой частоты для получения качества звука не требуется большое количество нулей после запятой, вполне достаточно 1 %.

IEC 60268-3

Edition 4.0 2013-04

14.12.2 Номинальное полное гармоническое искажение, характеристика должна быть указана.

П р и м е ч а н и е — Опубликованные исследования восприятия искажений человеческим ухом показывают, что предельное значение искажений для большинства целей составляет порядка 1 %. Время восстановления после перегрузки также имеет важное значение; см. 14.6.5.

Применение этого метода тестирования на этапе разработки позволит существенно повысить уровень разработок.

Литература:

1. Gérard PERROT, Measurement of a Neglected Circuit Characteristic, AES-100, may 1996
2. Nulling Out Amp Distortion by David Hafler (Feb. 1987),
https://gammaelectronics.xyz/audio_02-1987_null.html
3. С.Н.Кризе, Усилительные устройства, Связьиздат 1958
4. Л.М.Финк, Сигналы, помехи, ошибки... , М, Радио и связь, 1984
5. М.А. Сапожков, Корреляционный метод измерения нелинейных искажений передачи, Акустический журнал, Том 2, вып. 3, 1956
6. Jan Lohstroh and Matti Otala, An Audio Power Amplifier for Ultimate Quality Requirements, IEEE TRANSACTIONS ON AUDIO AND ELECTROACOUSTICS, VOL. AU-2 1, NO. 6, DECEMBER 1973
7. P.J. Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery, Wireless World, november 1977
8. An Overview Of SID and TIM, Walter G. lung, Mark L. Stephens, and Craig C. Todd
9. И.Алдошина, Слуховые пороги (ч.2), Звукорежиссер 2000-06
10. INTERNATIONAL STANDARD IES 60268-3

Александр Петров

Беларусь

30.05.2024