

Компенсационный метод тестирования усилителей звуковой частоты

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

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

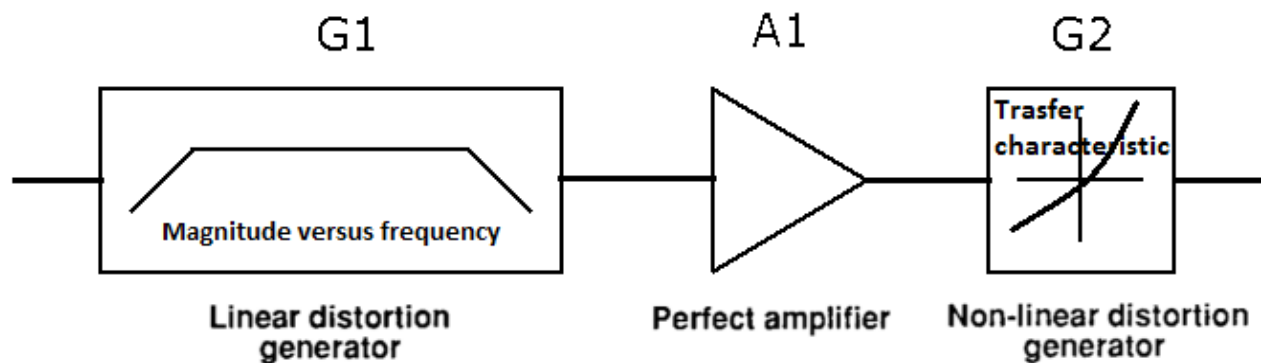


Рис. 1. Классическая теоретическая модель аудиоусилителя

Под искажением звукового сигнала понимается любой вид деформации выходного сигнала по сравнению с входным. Технически к дополнительным искажениям приводит 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 снимаются с помощью синусоидальных сигналов.

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 такие известные явления искажений как:

- искажения во временной области, т. е. искажения формы сигнала, в первую очередь это искажения SID (Slewing Induced Distortion) связанные со скоростью вращения фрагментов сигнала (это эффекты, которые, как правило, возникают только во время изменения формы волны сигналов проходящих через аудиоусилители и которые приводят к слышимому ухудшению качества звука в музыке, даже когда тесты на гармонические искажения с фиксированной частотой показывают низкие уровни искажений для простого синусоидального тестового сигнала);
- переходные искажения;
- искажения памяти - искажения связанные с постоянными времени входных цепей и цепей отрицательной обратной связи, а также с тепловыми процессами в элементах.

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 измеряет векторные погрешности а не искажения. Учитывая что синусоидальные сигналы на среднем участке склонов (до 25 %) достаточно линейны можно с уверенностью считать векторные погрешности скоростными погрешностями [3]. И хотя условием выполнения теста должна быть задержка прохождения сигнала на частоте тестирования всего 8 нс положительный результат теста в установившемся режиме не гарантирует качество звука тестируемого усилителя так как не учитывает продукты искажений во временной области связанные с поведением 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) что неизбежно ведет и к искажениям во временной области.

Условие неискаженного усиления сигнала может быть записано в виде [4]:

$$V_{out}(t) = V_{in} K_u (t - \Delta t) = V_{in} K_u (t - t_{PD}) \quad (1)$$

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

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.

Только тогда когда мы имеем дело с постоянной задержкой во времени (постоянный наклон фазы в линейной шкале) для всех частот, фазовая и групповая задержка одинаковы.

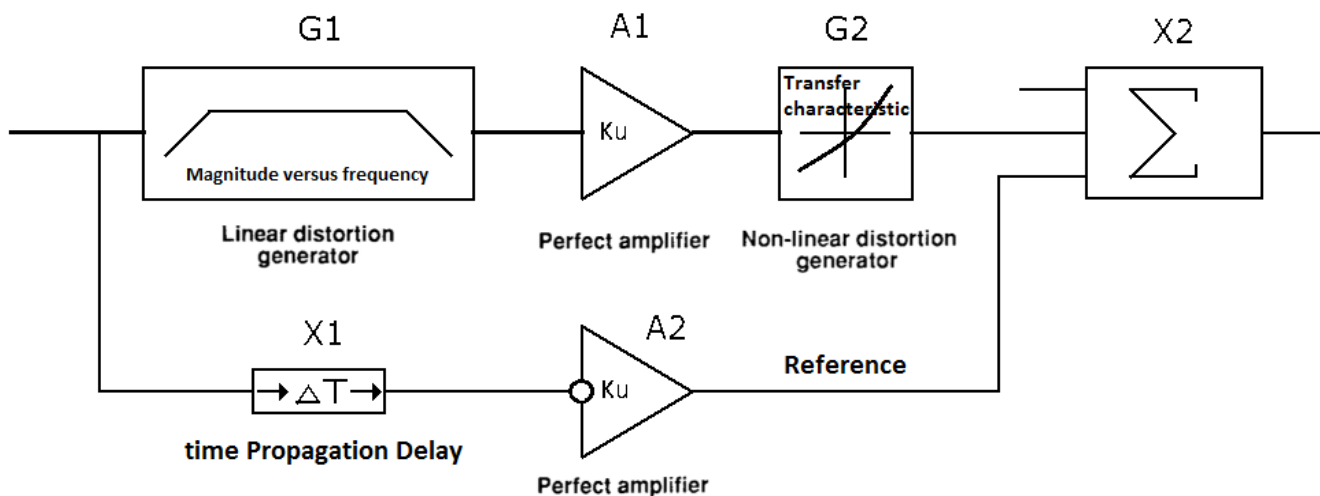


Рис. 2. Компенсационный метод измерения искажений

При измерении компенсационным методом входной сигнал является эталоном и не должен подвергаться никакой обработке кроме масштабирования и сдвига во времени, рис. 2.

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 тестового сигнала 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 во временной области, 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...5,5 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 от частоты без добавления гармонических составляющих (имеют место в установившемся режиме). Амплитудные и фазовые искажения взаимосвязаны;
- 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];
- искажения памяти (искажения связанные с тепловыми процессами в полупроводниках и с электрическими постоянными времени отвечающими за переходные процессы);
- 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;
- динамические интермодуляционные искажения сигнала типа SID (Slewing induced distortion) связанные со скоростью вращения фронтов (склонов) сигнала и возникающие в моменты его отклонения от синусоиды: изменение частоты, изменение амплитуды или и то и другое одновременно что и имеет место в звуковых сигналах непрерывно. Скорость вращения сигналов в атаке и затухании (спаде) звуковых сигналов зависит как от частоты основного сигнала, так и от скорости его нарастания/спада.

Любые усилители вносят в усиливаемый сигнал свои задержки, создавая разного рода эффекты не только в частотной, но и во временной области.

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

Последний вид искажений в значительной степени 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. Именно эти искажения и оказывают пагубное влияние на качество звука. Чем меньше tPD (в идеале равно нулю) – тем меньше деградация звука.

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

Искажения типа SID часто путают с ТИМ. Искажения типа ТИМ (имеют пилообразную форму характерную для интегратора) практически отсутствуют в современных усилителях в звуковом диапазоне. ТИМ-искажения присущи усилителям с общей ООС и рождаются в основном в УН и практически отсутствуют в усилителях без общей ОС. В усилителях без ООС с ростом частоты сигнала возникают линейные искажения (падает его амплитуда и возрастает фазовый сдвиг). Синусоидальный сигнал имеет максимальную скорость нарастания при переходе через ноль. SR сигнала частотой 20 кГц и напряжением 30 В(пик) (типичное выходное напряжение бытового усилителя) равно:

$$SR = 2\pi f V_m = 6,28 * 0,02 * 30 = 3,768 \text{ V}/\mu\text{S} \quad (2)$$

Минимальная SR рекомендуемая для усилителей класса Hi-Fi не менее 50 В/мкс. Тогда полоса полной мощности без ТИМ искажений должна быть равна:

$$f = SR/2\pi V_m = 50/(6.28*30) = 0,265 \text{ МГц} = 265 \text{ кГц} \quad (3)$$

Скорость нарастания в начале и конце бурстов, а также на вершинах треугольного сигнала не превышает 0,5 В/мкс. Чтобы убедиться в этом достаточно увеличить участок сигнала с поворотом (начало и конец бурста, а также вершины треугольного сигнала пропущенных через ФНЧ 100 кГц) и измерить скорость нарастания графическим методом как dV/dt . По факту SID-искажения являются сглаживанием микроуровневой информации ведущей к потере нюансов звукового материала наподобие mp3.

3. Новый набор тестовых сигналов.

Компенсационный метод измерения искажений не нов, одно из первых упоминаний о нем описано в [6] и [7]. Следующие ссылки можно найти в работах [8] и [9].

Описывая метод тестирования [7] автор [6] пишет, что в общем случае вместо фазокомпенсатора должна включаться линейная линия задержки. Например, в модели усилителя это идеальная линия задержки на частоте тестирования.

Подводя итог по корреляционному методу тестирования В.Раковский делает вывод: «По-видимому, корреляционный метод измерения искажений в будущем будет основным методом критерия качества систем передачи с точки зрения вносимых ими искажений в условиях передачи рабочего сигнала»

Недостатком работ [8] и [9] является то, что Эталон подвергался таким же линейным искажениям, который вносит сам тестируемый усилитель, что исключает выделение продуктов искажений во временной области, на что обращают внимание некоторые выдающиеся разработчики, например [10], [11]. Устранение искажений во временной области стало основанием для Джеффа Роуланда при разработке усилителя модели 7 без NFB.

При тестировании реальных усилителей в качестве линии задержки можно использовать коаксиальный кабель с задержкой на погонный метр около 5 нс. Таким образом, вам может понадобиться бухта кабеля длиной 10 и более метров. При групповой задержке ≤ 100 нс линия задержки может быть организована с помощью простой RC-цепочки. Например, резистор сопротивлением 10 Ом и конденсатор емкостью 1 нФ дадут задержку 10 нс, а резистор сопротивлением 10 Ом и конденсатор 10 нФ дадут задержку 100 нс. При этом конденсатор используется как подстроечный.

Теория психоакустики гласит что принципиально важны спектрально-временные характеристики изменения структуры временной огибающей на всех этапах развития звука: атаки (что особенно важно для распознавания тембров различных источников), стационарной части и спада.

В работе [6] (с. 180) автор указывает что при выборе метода измерения искажений необходимо полагаться прежде всего на тот метод, который дает наибольший уровень нелинейных и других видов искажений и использовать такие тестовые сигналы которые наиболее близки к рабочим.

Из теории колебаний известно, если в системе происходит сложение двух колебаний с близкими частотами f_1 и f_2 , то возникает режим биений, эти биения воспринимаются на слух как пульсации громкости тона со средней частотой $1/2(f_1 + f_2)$ и медленно меняющейся амплитудой с частотой $(f_1 - f_2)$. Чем больше разница между частотами тем выше частота биений и тем выше скорость вращения склонов (фронтов) сигнала.

Аналогичный сигнал можно получить и при 100% амплитудной модуляции. Например, если несущую 10 кГц промодулировать сигналом 1 кГц, то получим дополнительные две боковые частоты 9 и 11 кГц.

Таким образом в качестве тестовых сигналов можно использовать следующие сигналы:

- бурсты частотой 10 кГц (2-3 периода) с паузой 2-3 периода и чередующейся полярностью первого полупериода;

- бурсты частотой 10 кГц разной амплитуды следующие друг за другом без разрыва фазы;
- 1/3 октавный бурст частотой 10 кГц (20 кГц — 48 дБ, 80 кГц — 58,5 дБ);
- бурсты частотой 10 кГц с линейным нарастанием/спадом амплитуды сигнала и содержащие участок с постоянной амплитудой имитирующие атаку, стационарную часть и затухание реальных музыкальных сигналов;
- амплитудно модулированный сигнал частотой 10 кГц;
- сумма двух частот отстоящих от частоты 10 кГц на 0,5...5 кГц в обе стороны.

Особенность амплитудно-модулированных сигналов и сигналов из суммы двух частот в том что их склоны (передний и задний) вращаются на протяжении всего сигнала.

Например, у 1/3 октавного бурста вращение склонов максимально в начале и конце бурста, т. е. там где скорость нарастания амплитуды сигнала максимальна. Причем вращение положительных склонов сигнала до середины бурста происходит против часовой стрелки, а отрицательных склонов - по часовой стрелке. Во второй половине происходит спад амплитуд сигнала и вращение склонов сигнала происходит зеркально. Повороты сигнала против часовой стрелки дают продукты искажений в виде положительного напряжения, а повороты по часовой стрелке — в виде отрицательного напряжения.

Аналогично ведет себя и бурст с линейным нарастанием/спадом сигнала, только в этом случае скорость вращения склонов сигнала постоянна, поэтому и уровень искажений вносимых вращением склонов (SID) постоянен, т. е. не зависит от амплитуды сигнала.

Особенность треугольного сигнала состоит в том что повороты сигнала происходят на его вершинах.

Перед подачей тестовых 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 вращения на поворотах сигнала (в начале и конце бурстов, в местах изменения амплитуды сигнала или его частоты, а также на вершинах треугольного сигнала) существенно снижается а скорость нарастания не превышает 0,5 В/мкс что в 100 раз меньше значения $SR = 50$ В/мкс в соответствии с требованиями Hi-Fi. Таким образом такая обработка тестовых сигналов дает своего рода фору тестируемым усилителям.

Перед применением тестовых сигналов частотой 10 кГц (в том числе и суммы двух сигналов со средней частотой 10 кГц) проводят измерение продуктов искажений сигнала частотой 10 кГц с помощью режекторного фильтра (рис. 3) и компенсационным методом в установившемся режиме (например между 1,7 и 2 мс). При этом уточняют коэффициент передачи K_u и время задержки прохождения сигнала (tPD). Продукты искажений двух тестов должны быть максимально похожи. Только после этого не изменяя настроек подают на вход модели (тестируемого усилителя) тестовые сигналы.

При моделировании при использовании тестовых сигналов в виде бурстов перед ними имеет смысл вставить линию задержки на 50 мкс, а при просчете оставить место не менее 200 мкс для наблюдения возможных переходных процессов по окончании второго бурста.

Применение коротких бурстов (достаточно двух периодов) следующих друг за другом с интервалом в 2...3 периода и с разной полярностью первого полупериода позволяет выделить в паузах как переходные искажения, так и искажения памяти которые могут быть зависимы от полярности первого полупериода в бурстах.

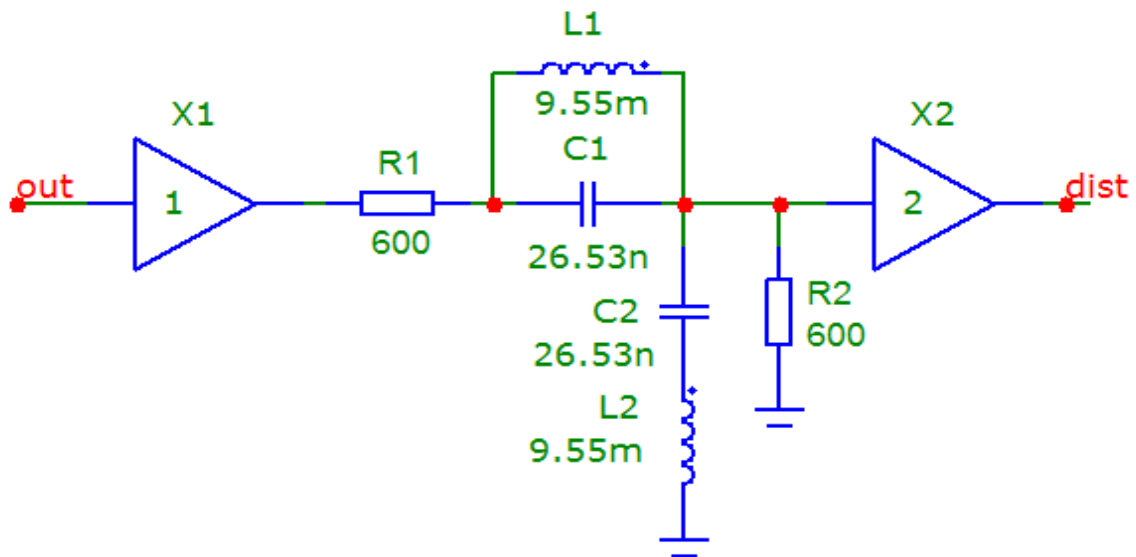


Рис. 3. Режекторный фильтр на частоту 10 кГц

Диаграмма Бode такого фильтра представлена на рис. 4

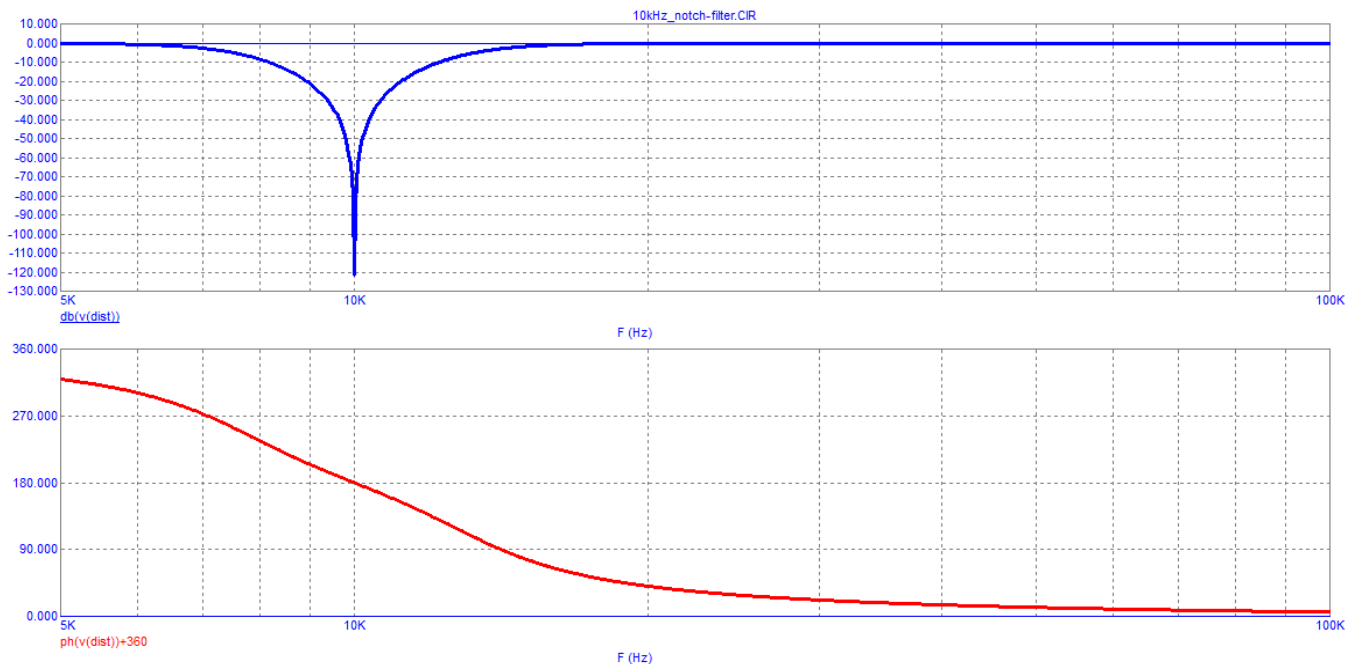


Рис. 4. Диаграмма Бode режекторного фильтра.

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, а для остальных и того меньше.

При использовании такого фильтра, например в программе Micro Cap запускают тест Transient на 2 мс и смотрят продукты искажений в интервале 1,7 ... 2 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 K_u , так и времени линии

задержки.

4. Корреляция с тестами прослушивания

В работе [1] доказано что усилители с отсутствующими искажениями памяти (в частности ламповые усилители в которых отсутствуют тепловые искажения) 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), Kato (SOULNOTE) 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...5,5 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 (атака и спад сигналов музыкальных инструментов), и тем меньше шумовая подставка при измерении ИМИ а значит и выше корреляция с качеством звука.

В работе [12] 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, примечание автора) было рекомендовано значение 30...40 дБ.

Пару слов о применении компенсационного метода тестирования в реальных усилителях. Для начала подаем на вход усилителя сигнал частотой 10 кГц и с помощью 2-х лучевого осциллографа измеряем время прохождения сигнала (time Propagation Delay) со входа (желательно от источника сигнала с выходным сопротивлением до 100 Ом) до выхода на номинальной нагрузке подключенной коротким кабелем (не более 1 м), а еще лучше коаксиальным. При ГВЗ до 100 нс линию задержки можно организовать с помощью простейшей RC-цепи:

$$tPD = RC, \text{ нс}$$

где R в Омах, C — в нанофарадах на напряжение не менее 250 В.

Например 10 Ом и 10 нФ дадут нам задержку в 100 нс, рис. 5

Как видите, сопротивление равно номиналу традиционного резистора цепочки Цобеля. Для настройки точного значения задержки можно использовать емкость чуть меньшего номинала и параллельно к ней подпаивать подборные конденсаторы. Для плавной перестройки параллельно резистору можно подпаять подстроечный резистор сопротивлением 100 Ом.

При требуемой задержке до 200 нс часть задержки можно сделать комбинированной с помощью коаксиального кабеля RG58 вносящего задержку примерно 5 нс на погонный метр как это сделано в работе [12], рис. 8. Таким образом для получения задержки в 100 нс потребуется небольшая бухта в 20 метров, а оставшуюся часть задержки выполнить перестраиваемой на RC-цепочке.

Примечание. При tPD выше 200 нс компенсационный метод тестирования реальных образцов теряет свою эффективность, точность измерений существенно снижается из-за роста фазовой погрешности.

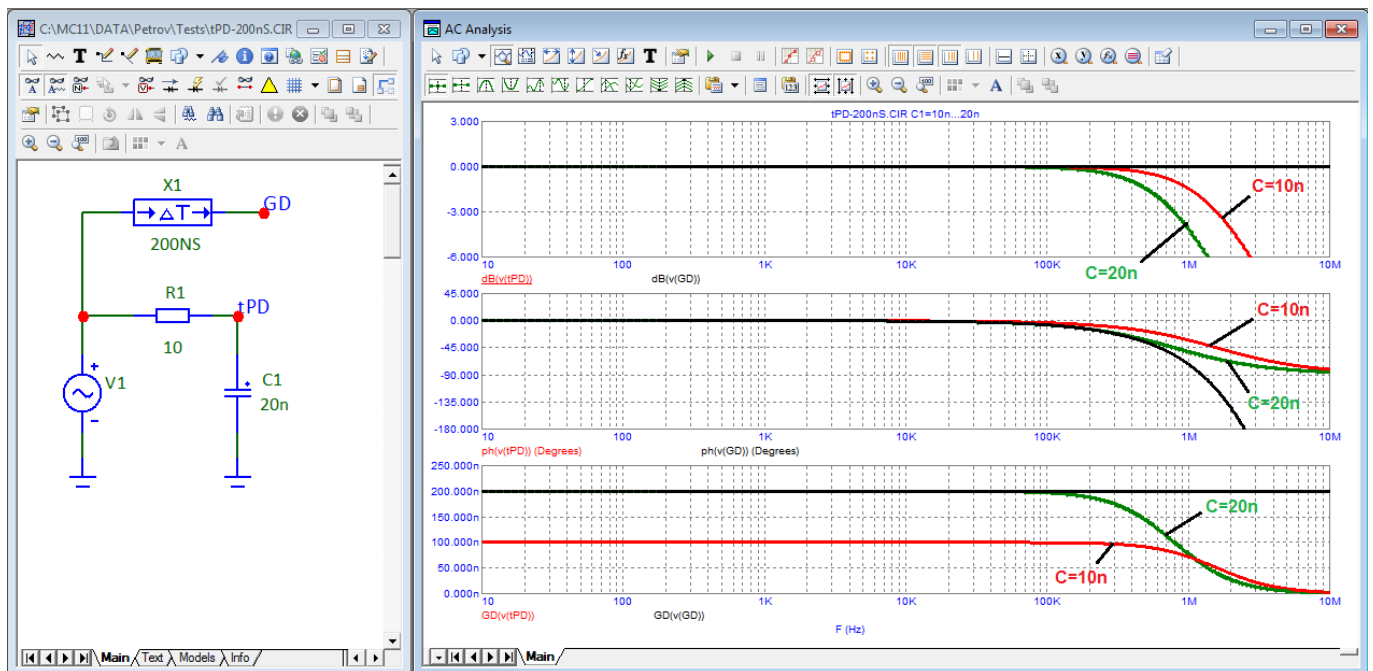


Рис. 5. Характеристики линии задержки на RC-цепочке и идеальной линии.

Для измерений необходимо собрать схему аналогичную тесту SWDT Д.Хафлера [2], рис. 6.

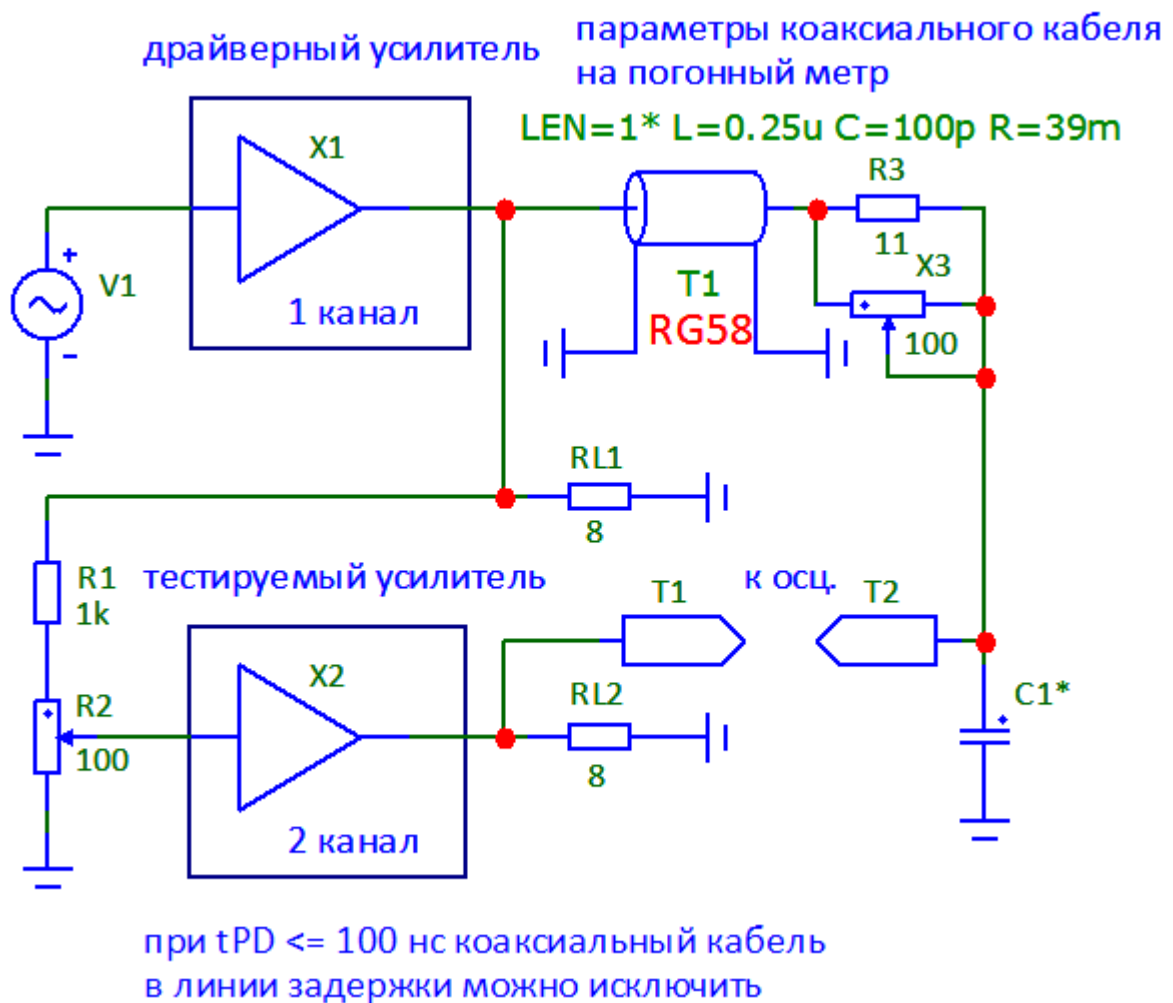


Рис. 6. Структурная схема измерения продуктов искажений компенсационным методом

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 по 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 не превышает 100... 120 нс и представляет собой горизонтальную линию как минимум от 5 кГц и до нескольких сот кГц то совпадение сигнала ЭТАЛОНА и выходного сигнала тестируемого усилителя во временной области 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). Более того, в цифре THD нет информации о спектре гармоник и их фазах. В реальных усилителях (в железе) линию задержки можно реализовать с помощью простой RC-цепи (10 Ом и подборный конденсатор) подключаемой к выходу драйверного усилителя в тесте SWDT Хафлера. Таким образом с помощью модифицированного теста Хафлера можно измерять не только векторные погрешности, но и все виды искажений.

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%.» [14].

Там же автор пишет: «Способность слуховой системы различать тонкие временные различия в структуре сигнала является в настоящее время основным предметом многочисленных исследований. ... какие-то различия во временной структуре сигнала, которые до настоящего времени еще четко не определены, являются значимыми для слуховой системы, и именно по ним она определяет живое звучание... исследования Блаурерта показали, что слух наиболее чувствителен к скорости изменения фазы, т.е. к групповому времени задержки (ГВЗ) »

В соответствии со стандартом [13] от усилителя звуковой частоты для получения качества звука не требуется большое количество нулей после запятой, вполне достаточно 1 %. *(примечание автора. Это справедливо при спадающем характере спектра!).*

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.

Следует отметить что предлагаемая философия подхода к проектированию усилителей звуковой частоты во многом совпадает с философией дизайна главного дизайнера Като компании SOULNOTE [11].

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. Operational Amplifiers by Jiri Dostal_1993_p.211
4. С.Н.Кризе, Усилительные устройства, Связьиздат 1958
5. Л.М.Финк, Сигналы, помехи, ошибки... , М, Радио и связь, 1984
6. В.Раковский, Измерения в аппаратуре записи кинофильмов, «Искусство», Москва, 1962
7. М.А. Сапожков, Корреляционный метод измерения нелинейных искажений передачи, Акустический журнал, Том 2, вып. 3, 1956
8. 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
9. P.J. Baxandall, Audible amplifier distortion is not a mystery, Wireless World, november 1977
10. <https://www.theabsolutesound.com/articles/charlie-hansen-1956-2017/> Interview with Charles Hansen of Ayre Acoustics (2015)
11. Kato's Design Philosophy, https://www.soulnote.co.jp/eu_sn_philosophy-en.html
12. 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
13. An Overview Of SID and TIM, Walter G. lung, Mark L. Stephens, and Craig C. Todd
14. INTERNATIONAL STANDARD IES 60268-3
15. И.Алдошина, Слуховые пороги (ч.2), Звукорежиссер 2000-06

Александр Петров
Беларусь
30.11.2024