

Приложение 1

Обоснование идеальной линии задержки

В статье AES-100 [1] приведена классическая структурная схема УМЗЧ, рис. 1.

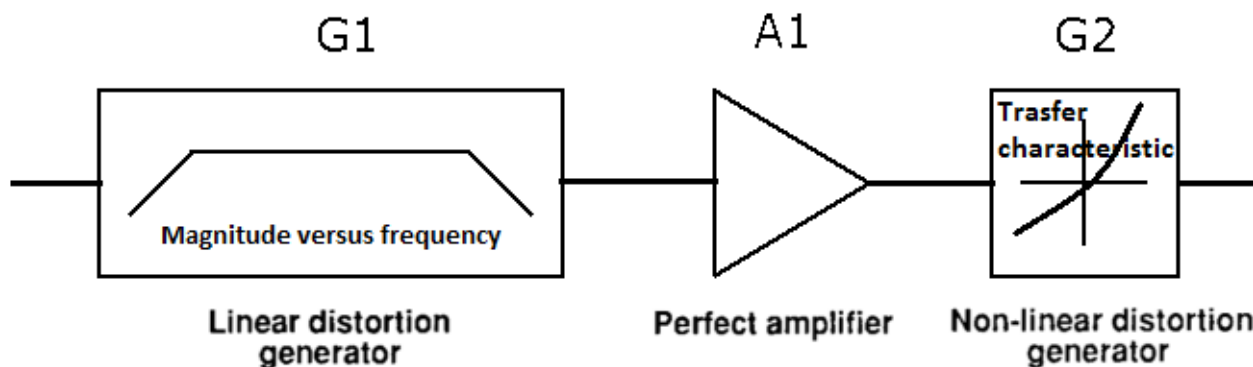


Рис. 1. Классическая структурная схема УМЗЧ

Блок G1 формирует АФЧХ, A1 — идеальный усилитель, G2 — формирует нелинейные искажения (НИ).

Подавляющее большинство разработчиков считали (и считают сегодня) что достаточно измерить нелинейные искажения (THD) и по ним можно будет судить о качестве УМЗЧ. Благодаря увеличению глубины ООС добились ничтожно малых значений THD, но адекватного прироста качества не получили, а в ряде случаев скорее наоборот — получили звук далекий от реального. Из огромного количества разработок хорошим качеством звука отличались только некоторые из них. Один из таких усилителей AMPZILLA II.

<https://www.pult.ru/articles/interesting/legendarnye-kotorye-mi-poteryali/> [2]

Парадоксально, но лампово-правоверная аудиофильская критика (в журналах типа Stereophile, Pride Audio и др.), высоко оценила этот вопиющий образец транзисторно-полупроводниковой бездушности, со смехотворным (для Hi End) ценником, отметив в частности:

«Многие транзисторные усилители, тогда и сейчас, демонстрируют наличие впечатляющих технических характеристик, но это не больше, чем наличие стерильного мертвого звука. То есть, ему не хватает эмоциональной напряженности.

С усилителем Ampzilla II это всегда происходит по-другому. Его ритмичная, полная динамики презентация покоряла всех любителей музыки, в то время как меломаны старались найти в спектре высоких частот все больше подробностей.»

К анализу упрощенной модели этого усилителя вернемся чуть позже, а сейчас продолжим работу с блок-схемой.

Предположим что усилитель не вносит нелинейные искажения, тогда выпадает G2. В результате получим следующую блок-схему, рис. 2.

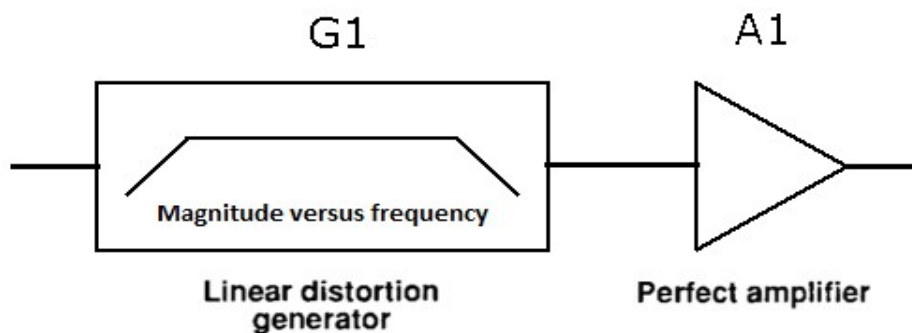


Рис. 2. Блок-схема УМЗЧ на основе идеального усилителя

Промоделируем модель на основе идеального усилителя. АФЧХ сформируем с помощью пассивных RC-цепей, рис. 3.

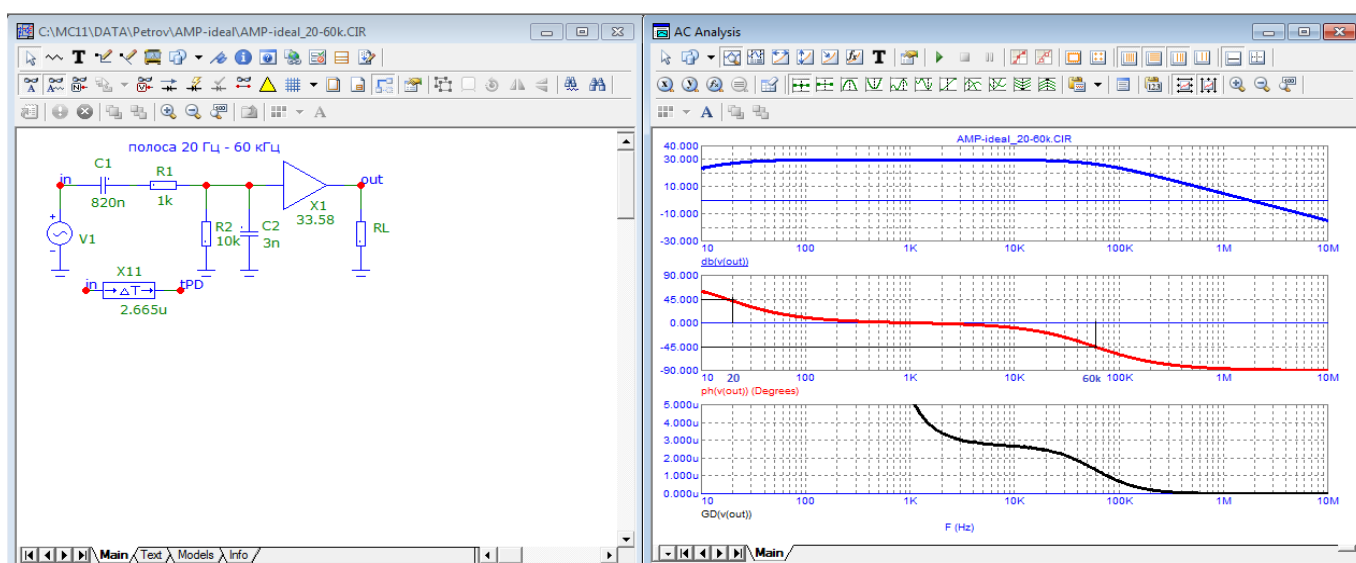


Рис. 3. Диаграмма Бодэ модели с полосой 20 Гц — 60 кГц на основе идеального усилителя.

Измерим искажения такой модели на частоте 10 кГц с помощью режекторного фильтра, рис. 4

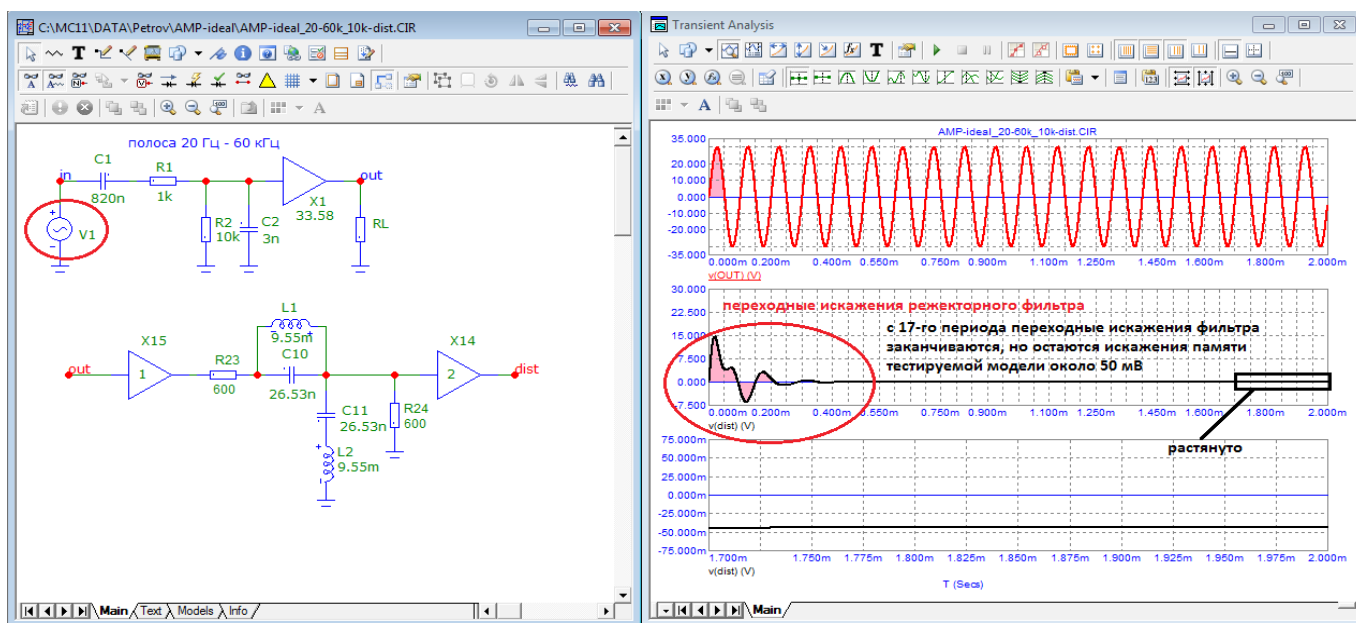


Рис. 4. Тест на частоте 10 кГц

После 17-го периода практически отсутствуют переходные искажения режекторного фильтра, гармонических составляющих в таком масштабе не видно, но остается постоянная составляющая около минус 50 мВ (искажения памяти). Изменим полярность первой полуволны сигнала, рис. 5.

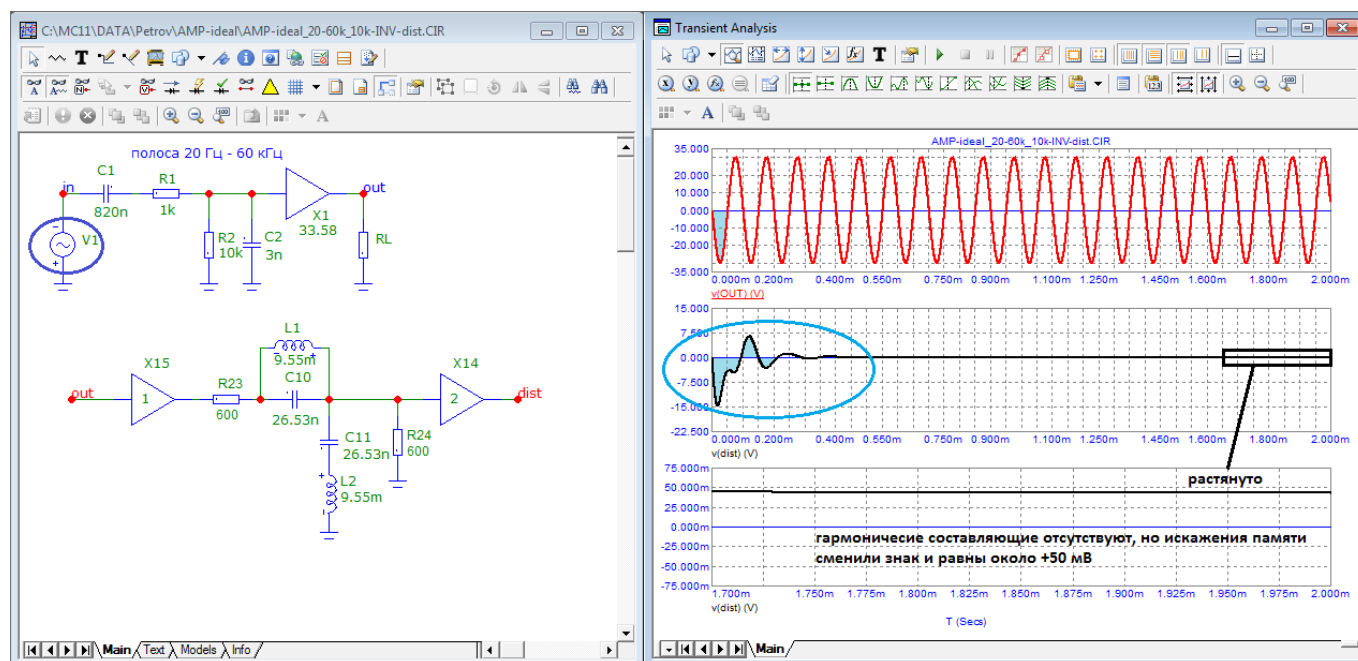


Рис. 5. Тест на частоте 10 кГц с отрицательной полярностью первой полуволны.

С изменением полярности сигнала продолжительность переходных процессов фильтра не изменилась, они стали зеркальными, изменилась и полярность постоянной составляющей (искажения памяти) — они улетели в положительную область. Нетрудно представить себе как будут «летать» продукты искажений реального звукового сигнала в котором всплески первого периода сигналов не предсказуемы. В данном случае только к 50-й миллисекунде искажения памяти снижаются до пренебрежимо малого уровня, а это как никак 500-й период сигнала.

Время 50 мс ничтожно мало по сравнению временем включения прибора ИНИ для измерения Кг. Сначала мы включаем УМЗЧ и даем ему выйти на температурный режим (от 10 минут до часа и более), генератор также включают заранее. Затем подключаем ИНИ к выходу УМЗЧ и подаем сигнал на его вход. В худшем случае проходят секунды (а не 50 мс) перед тем как запускают ИНИ в режим тестирования. В любом случае измерения происходят в установившемся режиме и никаких искажений кроме Кг (THD) тест выявить не может.

Чтобы убедиться что постоянная составляющая в продуктах искажений принадлежит усилителю, а не фильтру, проведем компенсационный тест, рис. 6. Бурсты обрабатываем ФНЧ 100 кГц (как в тесте DIM-100).

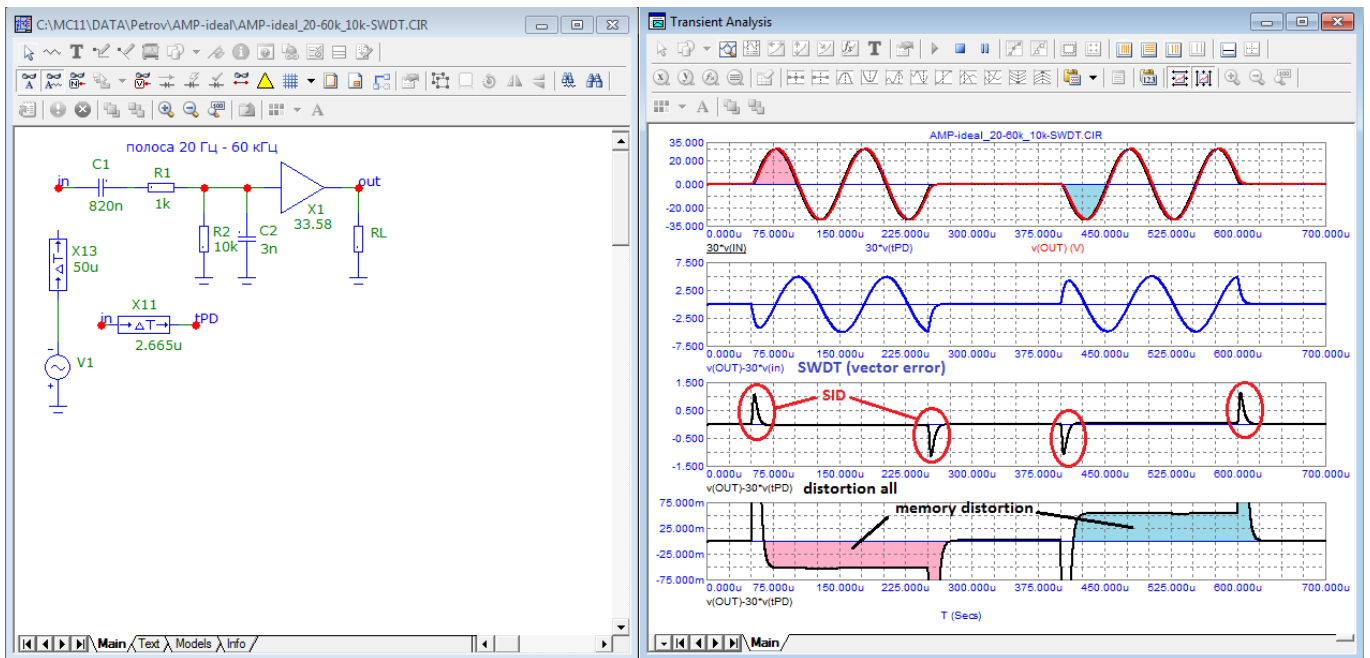


Рис. 6. Результат компенсационного теста

Компенсационный тест показал тот же результат что и режекторный фильтр сразу после окончания переходного процесса фильтра (после 17-го периода) — выявил искажения памяти которые в установившемся режиме усилителя (к 500-му периоду сигнала) уже практически отсутствуют и измерителями ИНИ не выявляются. Тест выявил и искажения SID в начале и конце бурстов.

Что же происходит в начале (и конце) бурстов. Для этого растянем начальный участок, рис. 7

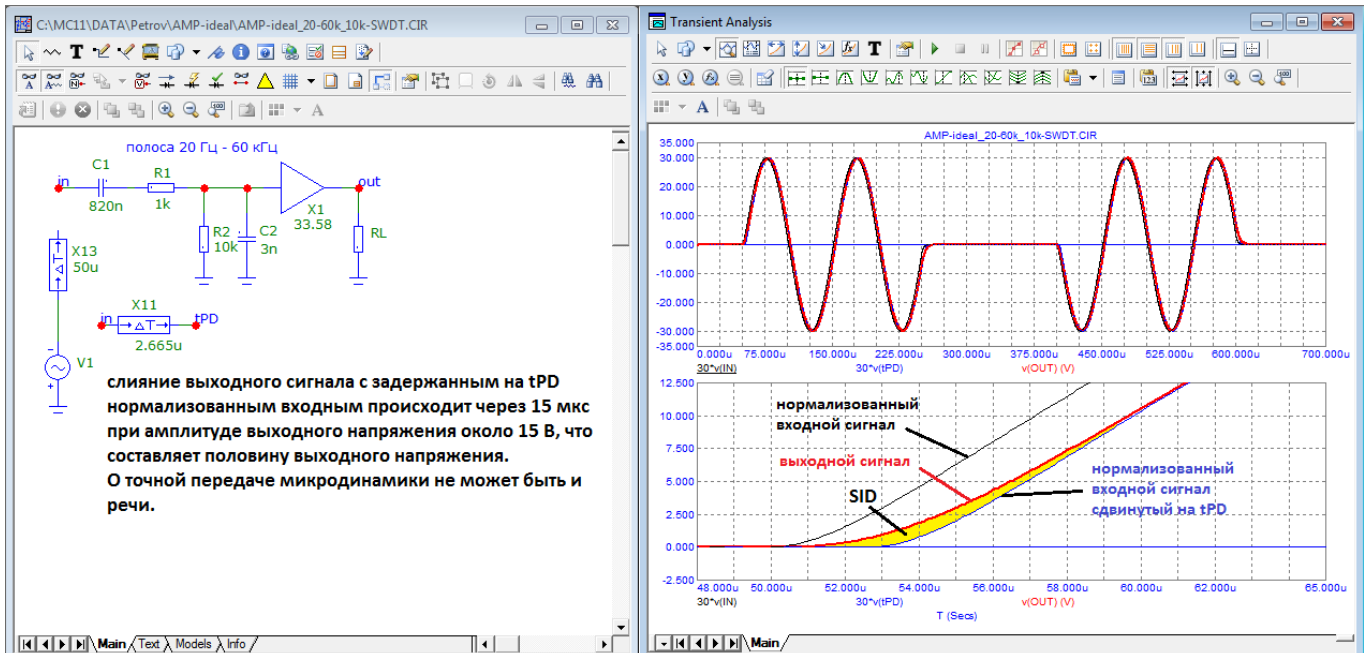


Рис. 7. Усиление начального участка бурста

Нормализованный входной сигнал (синяя) сдвинут на время t_{PD} (идеальное время задержки равное времени прохождения сигнала на частоте тестирования). Таким образом получен ЭТАЛОН.

В данном случае выходной сигнал сливается с задержанным нормализованным входным сигналом только выше 15 Вольт. По времени процесс занимает более 12 мкс. Это как раз и совпадает с временем переходного процесса равному $(3...5) \tau$ или $(3...5) \text{ГВЗ}$ до точности установления 95...98 %.

Растянутый участок наглядно показывает что на начальном участке выходной сигнал не повторяет задержанный нормализованный входной сигнал. Желтым цветом выделена погрешность — это и есть динамические искажения связанные с поворотом сигнала (SID – Slew-rate induced distortion).

Ниже представлена выдержка из [4], рис. 8

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 обычно допустим некоторый сдвиг во времени Δt между входным и выходным напряжениями, равный времени пробега сигнала через усилительное устройство. **(time Propagation Delay)**

Условие неискаженного усиления сигнала может быть записано в виде

$$u_{\text{вых}}(t) = k u_{\text{вх}}(t - \Delta t),$$

где k — постоянная величина. **(Ku)** **идеальной задержки**

Рис. 8.

Надеюсь понятно, что если в ЭТАЛОН (нормализованный входной сигнал задержанный на время t_{PD} , см. статью) внести такие же искажения АЧХ как вносит сам усилитель то никаких дополнительных искажений (перечислены в статье) кроме THD мы не обнаружим. В этом случае теряет смысл компенсационного метода тестирования так как будут выявлены только гармонические составляющие внесенные тестируемым усилителем.

Известно что до окончания переходных процессов синусоидальный сигнал поступающий на вход усилителя на его выходе является квазигармоническим и в соответствии с [3] будет иметь дополнительные гармонические составляющие. Чтобы в этом убедиться проведем измерение THD на 2-м периоде (рис.9) и в режиме «Periodic Steady State» (рис. 10).

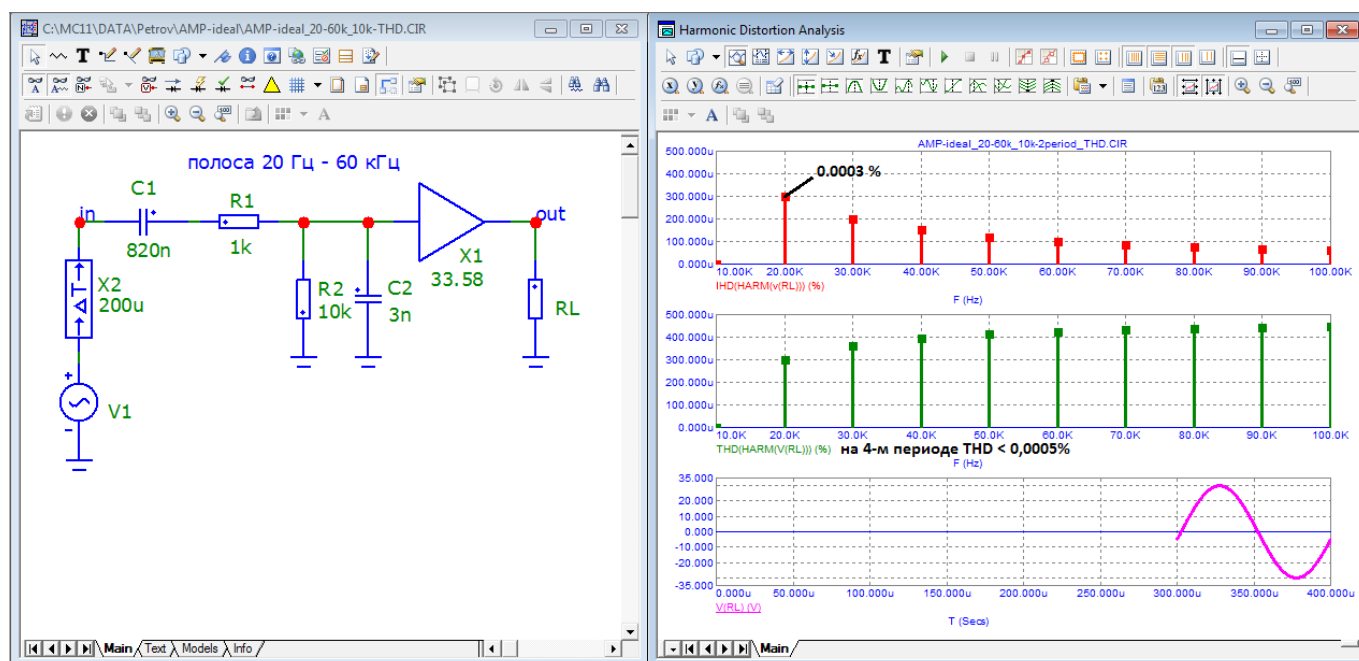


Рис. 9. Тест модели на 2-м периоде.

На 2-м периоде (и ближайших последующих) 2-я гармоника имеет уровень 0,0003 % а суммарный THD до 10-й гармоники равен 0,00045 %. От уровня 30 В(пик) это составляет 0,00009 В или 0,09 мВ. Поэтому не удивительно что мы не увидели их на рис. 6. Мы не можем видеть искажения сигнала с таким уровнем гармоник на экране осциллографа, в лучшем случае несколько процентов.

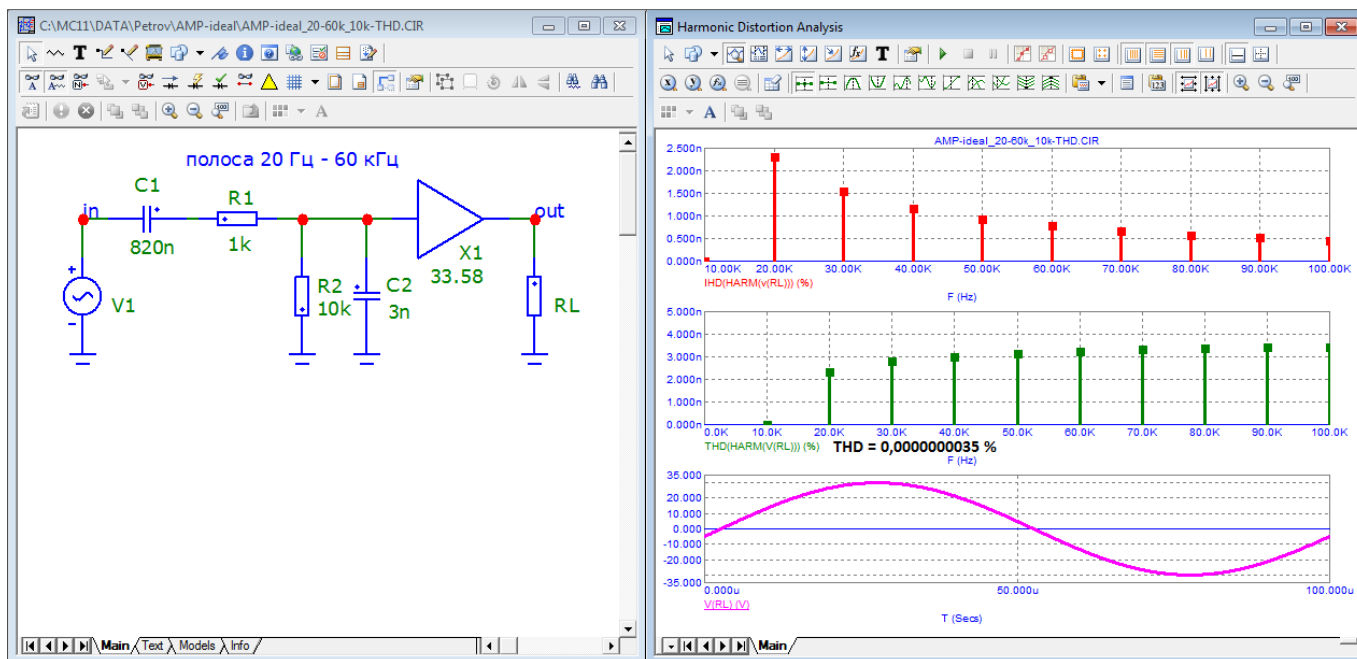


Рис. 10. Тест на THD в установившемся режиме предусмотренном программой

В автоматическом режиме (стоит птичка в графе «Periodic Steady State») программа сама определяет окончание переходных процессов и как видим уровень искажений ничтожно мал (на самом деле в установившемся режиме они равны нулю, ведь усилитель идеальный).

Известно что линейные искажения пассивных цепей могут носить обратимый характер если выполнить их характеристики абсолютно зеркальными как в грамзаписи, рис. 11.

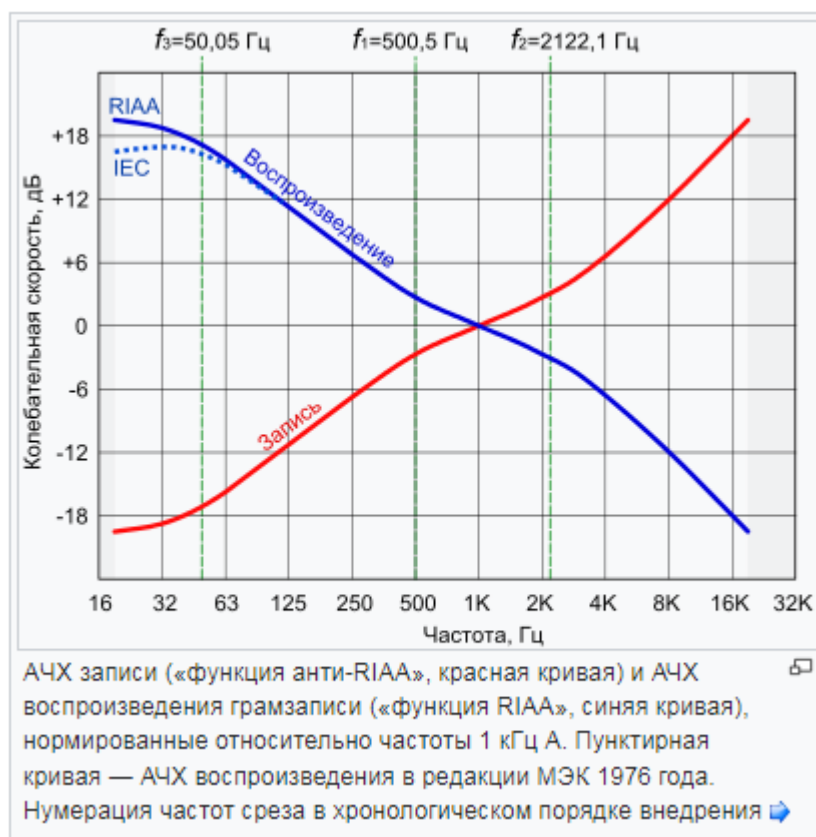


Рис. 11. АЧХ записи и АЧХ воспроизведения грамзаписи

Проверим это на практике воспользовавшись схемой anti-RIAA [5]. С помощью

такой приставки можно идеально настроить АЧХ усилителя-корректора (УК). Подадим со схемы anti-RIAA сигнал на УК выполненный на пассивных цепях коррекции и идеальных усилителях X1 — X3, рис. 12.

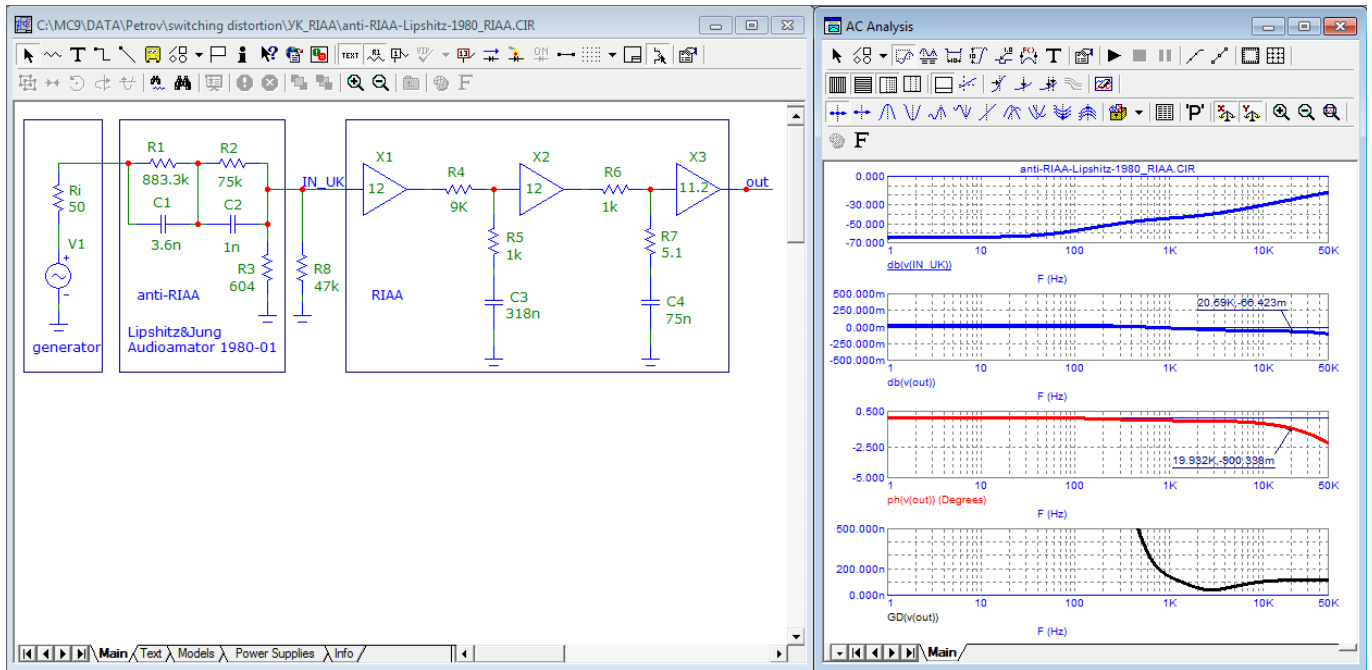


Рис. 12. Сквозная диаграмма Бode грамзаписи

Как видим можно получить сквозную характеристику с отклонениями АФЧХ не более $\pm 0,1$ дБ по амплитуде и не более 1 градус по фазе. ГВЗ при этом на частотах выше 1 кГц не более 100 нс.

Ну а что же с искажениями сквозного тракта. Измерим их на первом периоде (ненавистном многим троллям) рис. 13, где как правило наибольшие SID-искажения и искажения связанные с переходными процессами.

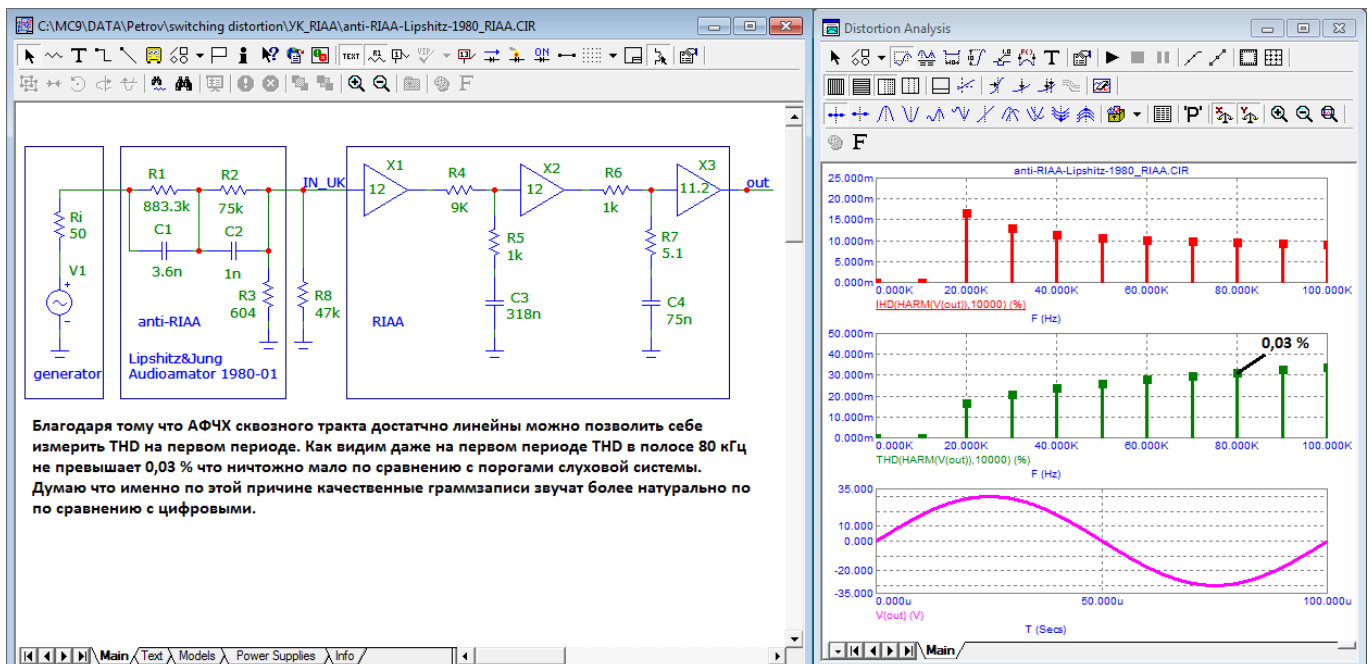


Рис. 13. THD сквозного тракта грамзаписи (без учета искажений вносимых реальными усилителями и механическими узлами) на первом периоде входного сигнала.

Как видим и здесь все в порядке. Но это имеет место только в сквозном тракте где отдельные узлы (записи и воспроизведения) имеют зеркальные характеристики. В реальных УМЗЧ такого нет и все выявленные искажения остаются во всей красе.

Ну а теперь вернемся к усилителю AMPZILLA II [2] и протестируем его слегка упрощенную модель. (снижено напряжение питания до +40В, убрана схема защиты, упрощен ВК). Следует отметить что схема защиты выполнена грамотно!

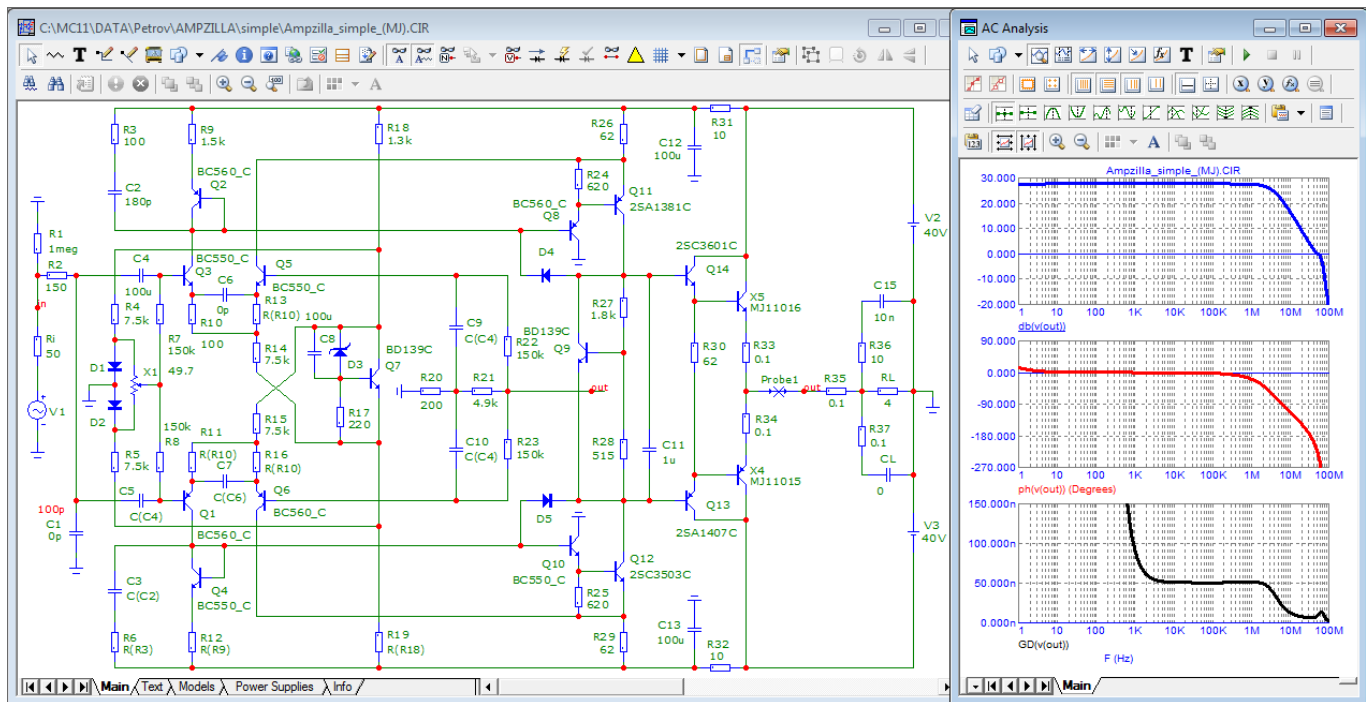


Рис. 14. Диаграмма Бode упрощенной модели усилителя AMPZILLA II

Диаграмма Бode показывает что ГВЗ чуть больше 50 нс и постоянно от нескольких кГц до нескольких МГц.

Проверим петлевое усиление и запасы устойчивости на реактивной нагрузке, рис. 15.

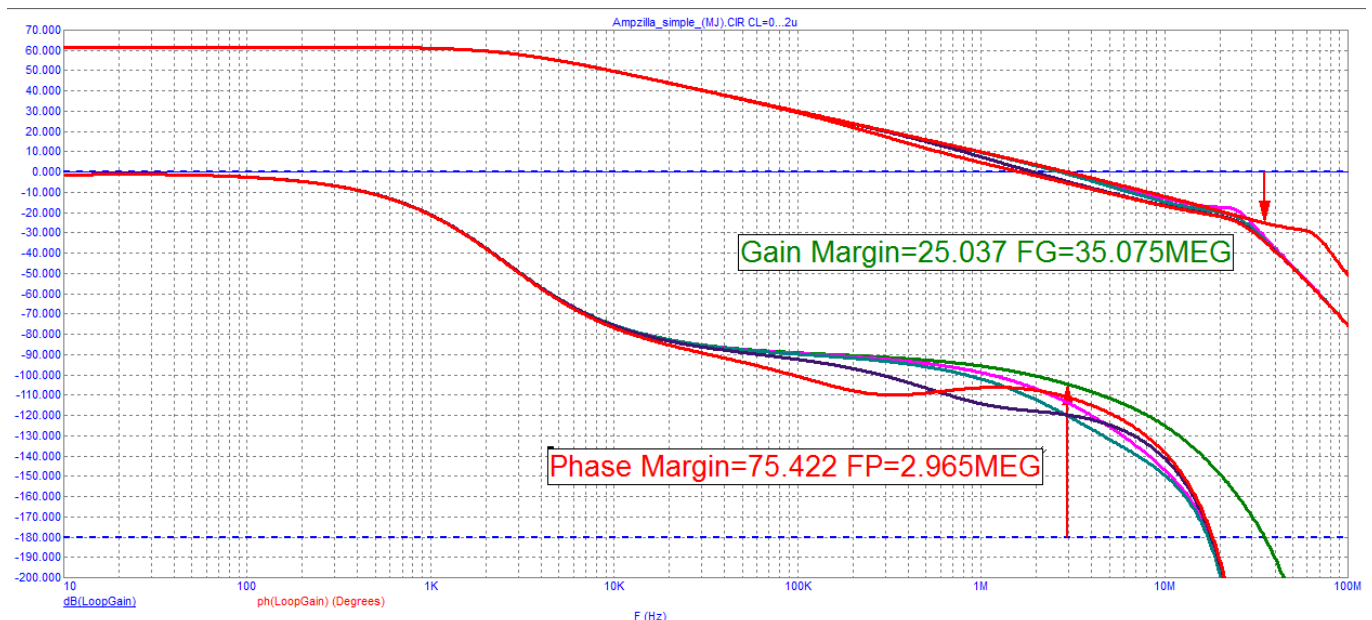


Рис. 15. Петлевое усиление на реактивной нагрузке 50 нФ....2 мкФ

Петлевое усиление на частоте 20 кГц более 40 дБ, запасы по фазе и амплитуде на реактивной нагрузке также ведут себя красиво, устойчивость гарантирована без индуктивности на выходе.

Измерим продукты искажений с помощью режекторного фильтра, рис. 16.

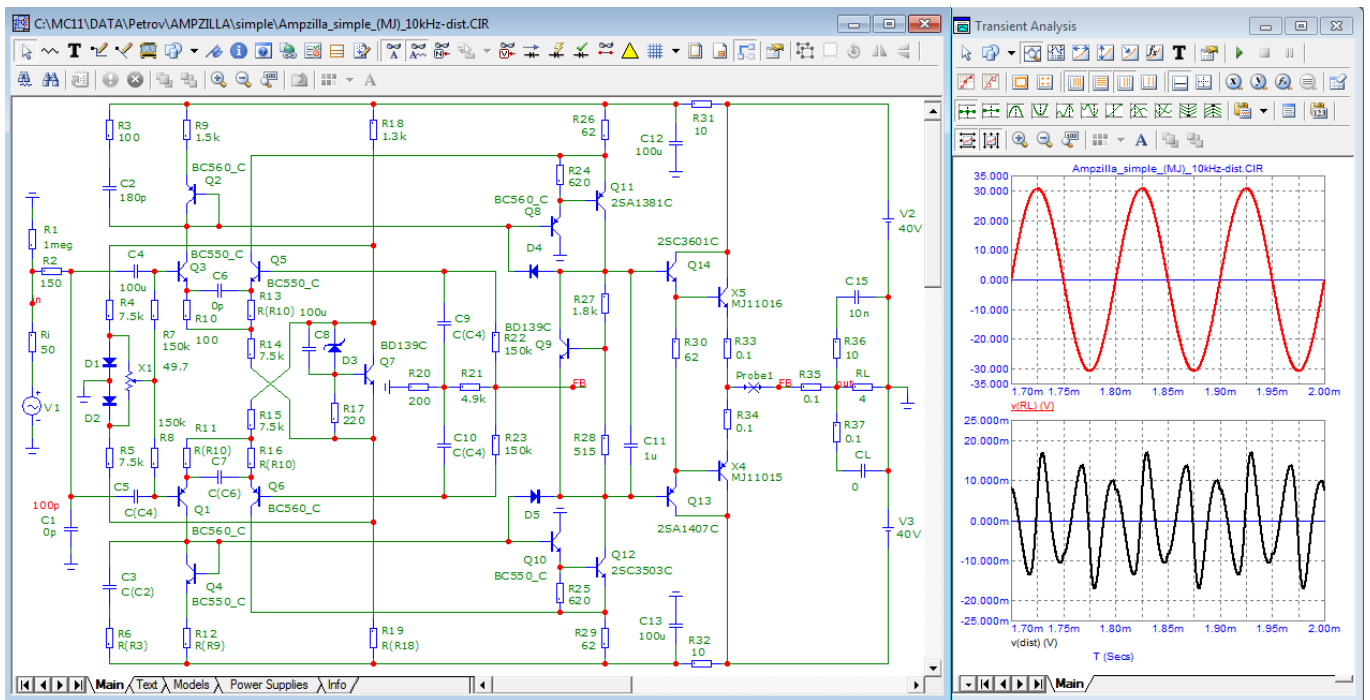


Рис. 16. Продукты искажений сигнала частотой 10 кГц

Режекторный фильтр на 10 кГц выявил в основном одну 3-ю гармонику, при токе покоя 100 мА коммутационные искажения отсутствуют.

Измерим искажения с помощью компенсационного метода, рис. 17.

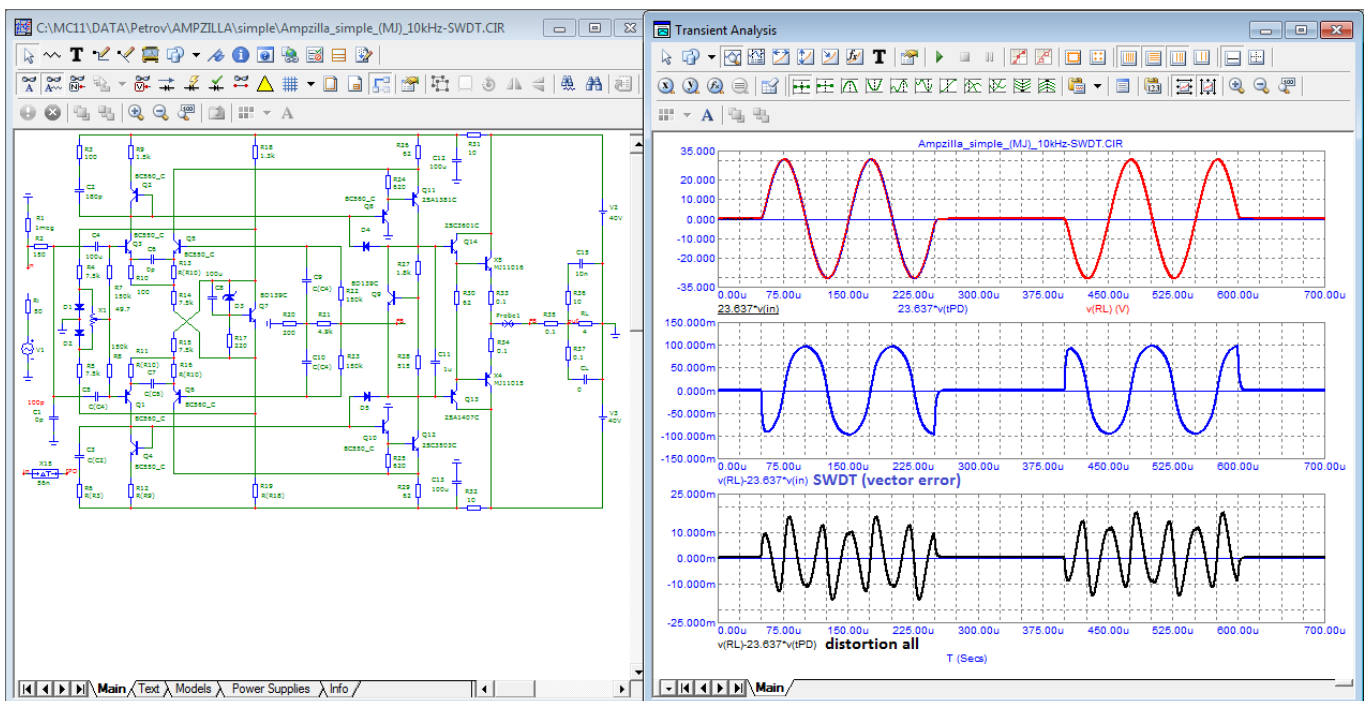


Рис. 17. Результат тестирования компенсационным методом

Как показал тест продукты искажений точно в точь как на выходе режекторного фильтра. SID-искажения в начале и конце бурстов полностью отсутствуют.

В природе нет идеальной линии задержки (конечно можно попытаться использовать для этой цели телевизионный кабель имеющий задержку сигнала около 5 нс на погонный метр как предложил коллега misha88). Но если ГВЗ не превышает 100 нс, то можно сделать проще заменив идеальную линию задержки простой RC-цепочкой, рис. 18

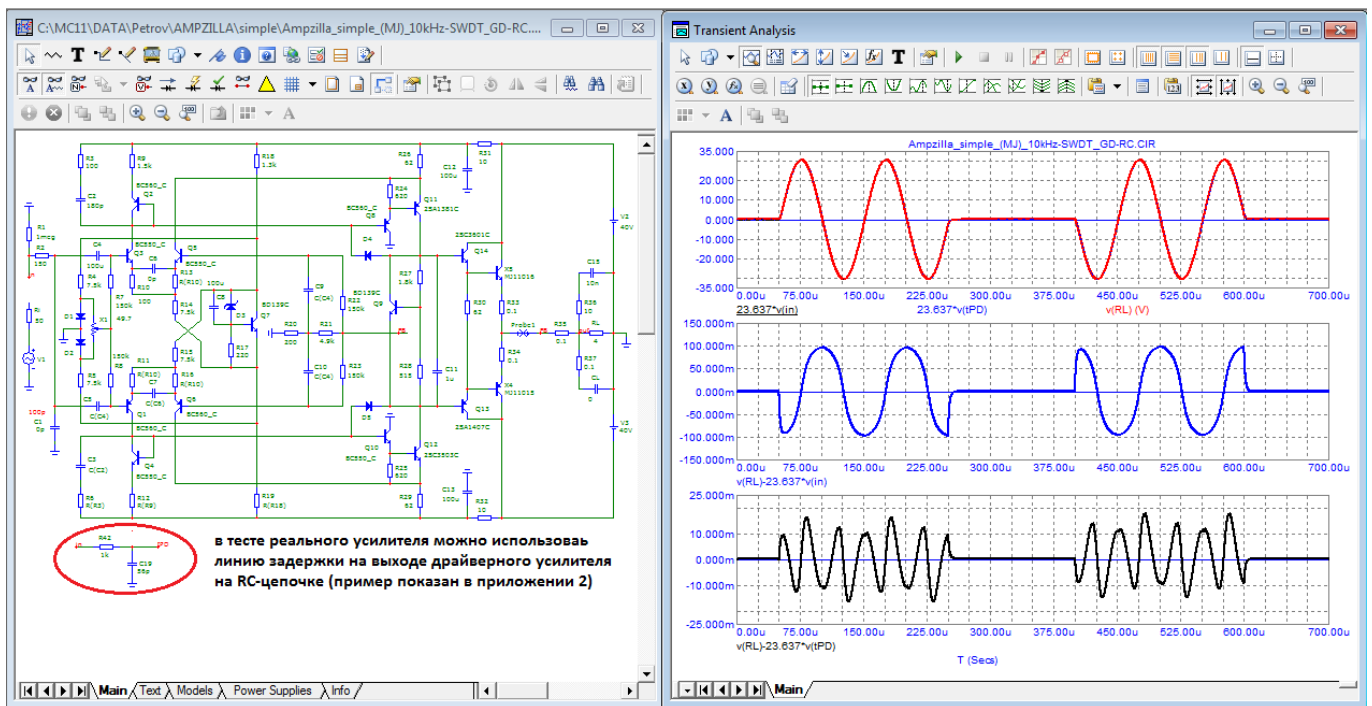


Рис. 18. Результат тестирования компенсационным методом с задержкой на RC-цепочке.

Как видим и с задержкой на RC-цепочке результат тот же.

Растянем начальный участок бурста чтобы убедиться что там происходит, рис. 19.

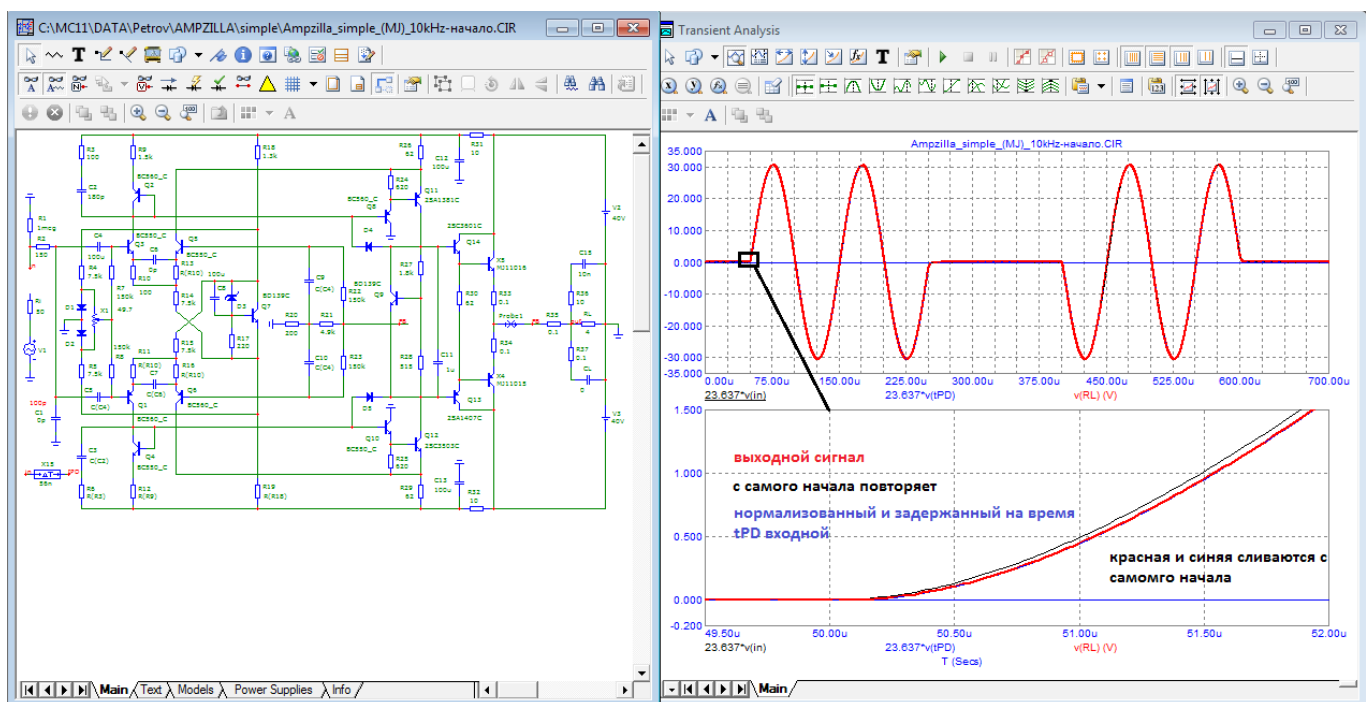


Рис. 19. Усиление начала бурста в растянутом виде

Начало бурста в растянутом виде также не выявляет признаков СИД-искажений, выходное напряжение повторяет нормализованное входное напряжение задержанное на время прохождения сигнала t_{PD} (ЭТАЛОН, см. статью)

Многие разработчики придают большое значение усилению первого Ватта, рис. 20

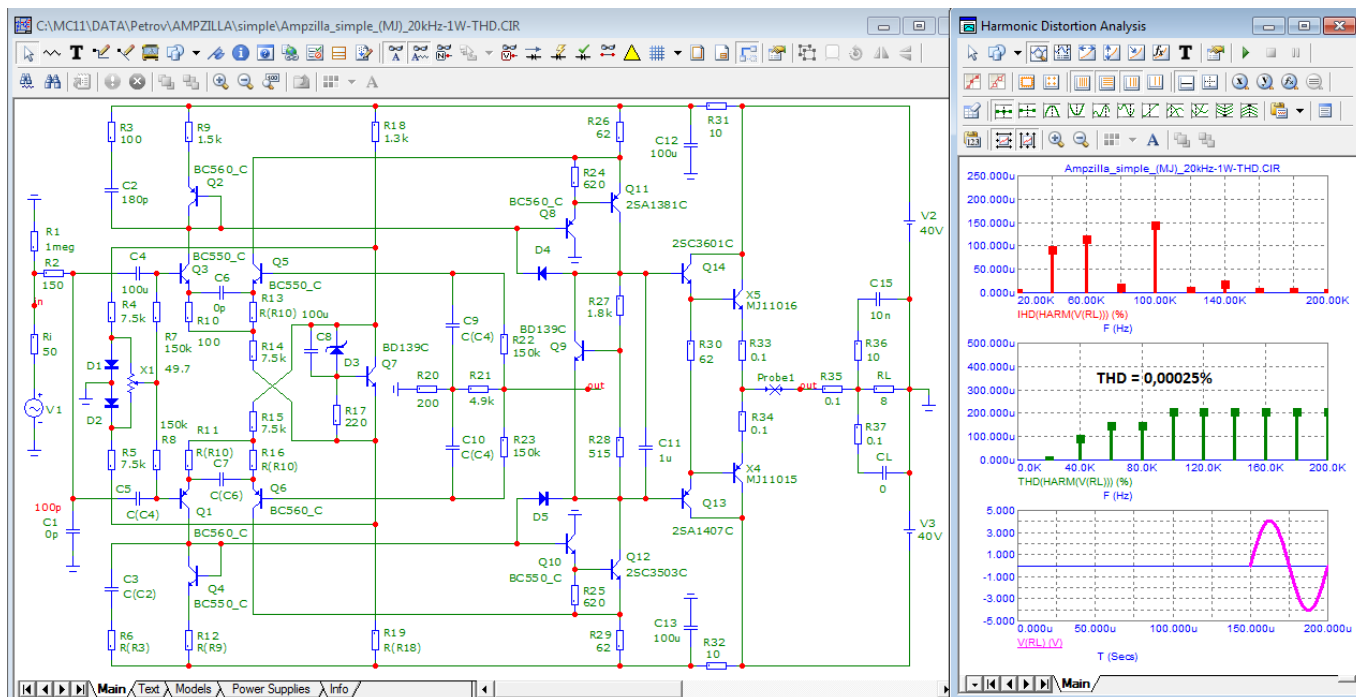


Рис. 20. Спектр и THD при выходной мощности 1 Вт.

Как и следовало ожидать с усилением первого Ватта все в порядке. Спектр короткий, заканчивается 5-й гармоникой небольшой величины. В полосе до 80 кГц THD = 0,00015%

Посмотрим режим клиппирования, рис. 21

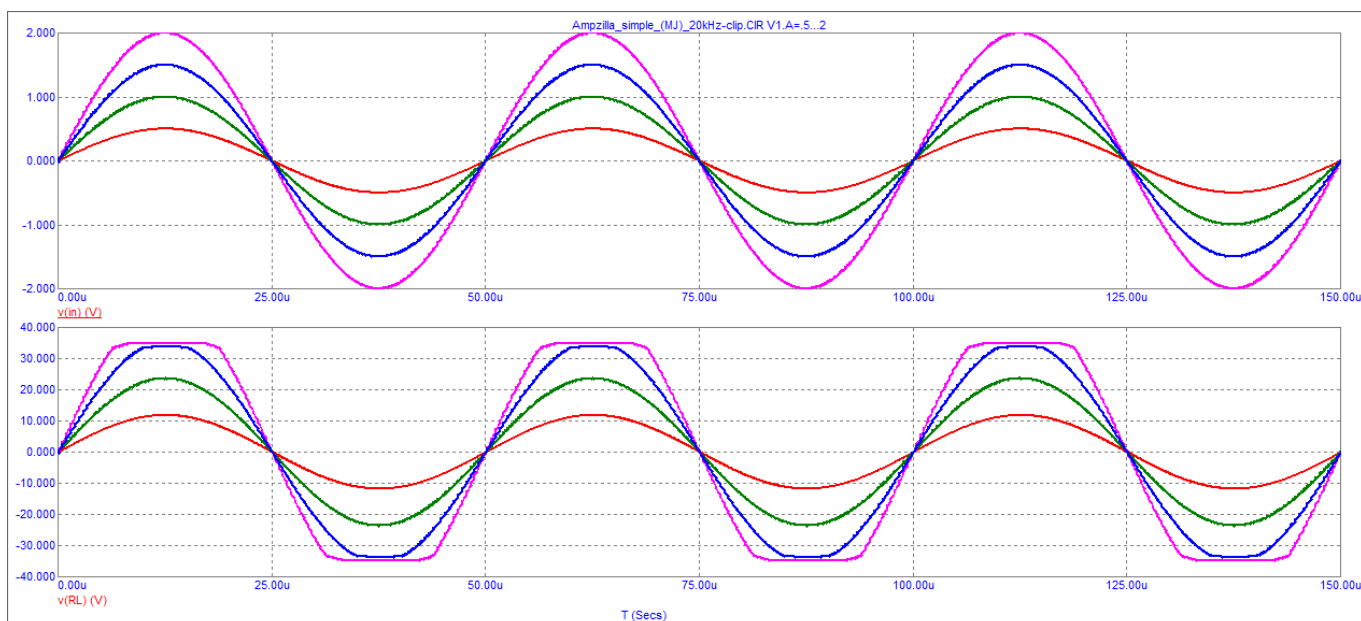


Рис. 21. Клиппирование сигнала

Клиппирование сигнала частотой 20 кГц мягкое! Редко какой усилитель обладает такими свойствами без применения специальных примочек.

И наконец проверка работы в малосигнальном режиме - тест на скорость усиления малых сигналов на фоне больших (своеобразный тест на микродинамику), рис. 22. На вход подан меандр 20 кГц и синус 1 МГц в соотношении 5:1.

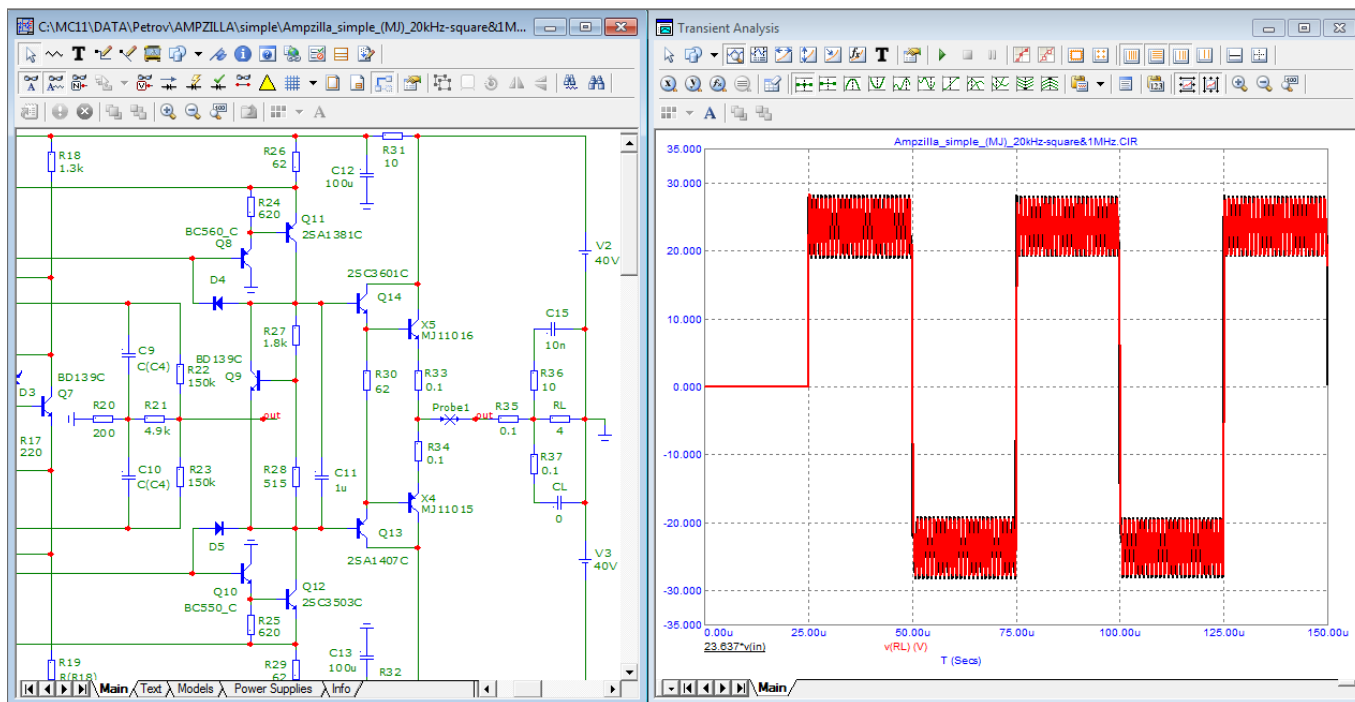


Рис. 22. Усиление сигнала частотой 1 МГц на полках меандра частотой 20 кГц

Как видим и здесь все в порядке, скорость нарастания выходного напряжения симметричная, фронты меандра достаточно крутые, сигнал частотой 1 МГц усиливается с таким же усилением как и любой сигнал звукового диапазона. Поэтому любые сигналы еще меньшего уровня отвечающие за микродинамику также будут усилены без искажений.

Вывод.

Не удивительно что этот усилитель был восторженно встречен меломанами, параметры его модели также оказались на высоте. Думаю что и сегодня он даст фору многим усилителям с несколькими нулями после запятой в Кг.

Литература:

1. Gérard PERROT, Measurement of a Neglected Circuit Characteristic, AES-100, may 1996
2. <https://www.pult.ru/articles/interesting/legendarnye-kotorye-mi-poteryali/>
3. Л.М.Финк, Сигналы, помехи, ошибки... , М, Радио и связь, 1984
4. С.Н.Кризе, Усилительные устройства, Связьиздат 1958
5. P.Lipshitz and Walt Jung, A High Accuracy Inverse RIAA Network, Audio Amateur 1980 - 01

Александр Петров