

Пояснение механизма вращения фрагментов звуковых сигналов

Пытаясь разобраться в причинах несоответствия основных измеряемых параметров усилителей звуковой частоты с качеством звука главный дизайнер SOULNOTE Като представил свой взгляд на эту проблему в статье «Философия дизайна» [1].

Основная причина несоответствия по мнению Като (и не только Като, например, основателя компании Aute Acoustics Чарлес Хансена (Charles Hansen) и многих других, кто в теме тот знает) — игнорирование продуктов искажений во временной области. Стационарному синусоидальному сигналу Като приводит в качестве эквивалента прямой участок трассы спортивного автомобиля. Однако реальная трасса имеет повороты (повороты на трассе для автомобиля — не что иное как отклонение тестового сигнала от синусоиды для усилителя) и как не все спортивные автомобили могут одинаково проходить эти повороты на большой скорости, так и не все усилители имеющие малый уровень искажений на чистой синусоиде могут одинаково точно усиливать реальные звуковые сигналы. Измерение искажений с помощью спектра Фурье на стационарных сигналах эквивалентно измерению скорости автомобиля на прямой дороге. Дело в том что в спектре выделенном с помощью FFT нет информации о фазах и задержках гармоник. Поэтому обратное преобразование Фурье полученного спектра не позволяет получить продукты искажений во временной области, а именно они и определяют реальные искажения в микродинамике.

Реальные звуковые сигналы похожи на что угодно, но только не на чистую синусоиду. В звуковых сигналах непрерывно изменяется как амплитуда так и мгновенная частота фрагментов сигнала. Даже изменение только амплитуды сигнала приводит к вращению фронтов (склонов, скатов, называйте как угодно) сигнала. На рисунке 1 поясняется этот процесс.

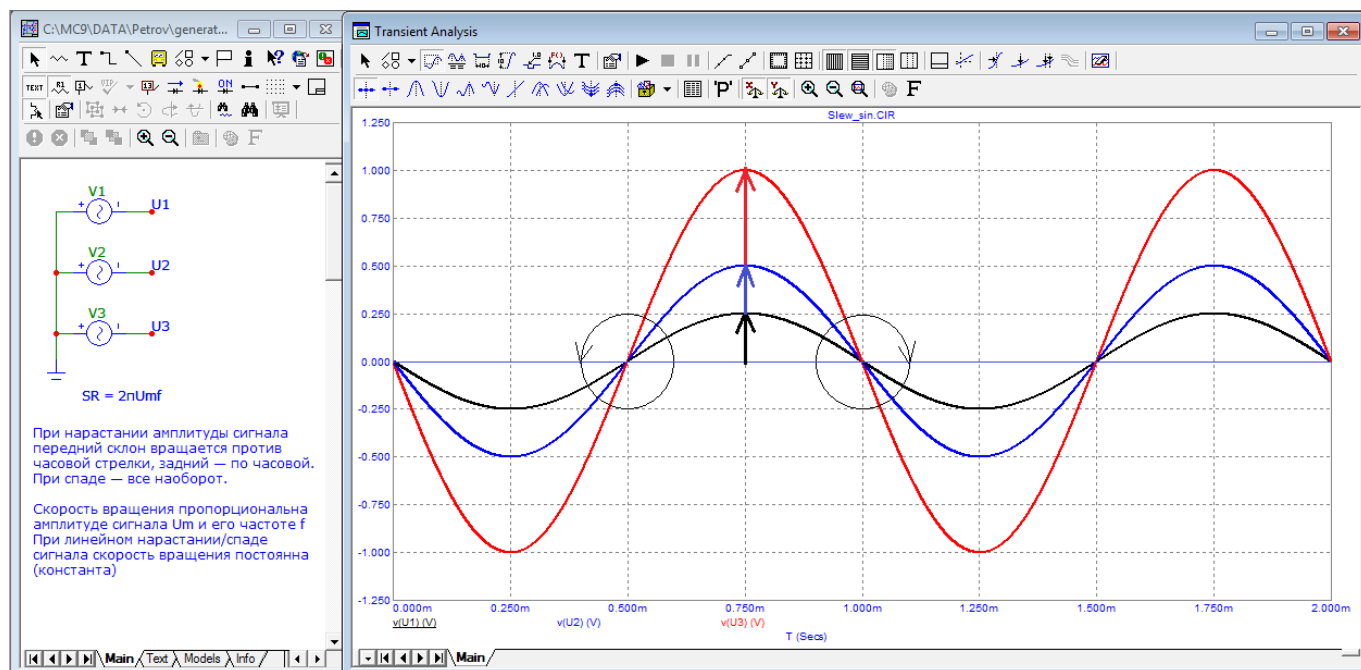


Рис. 1. Рисунок поясняющий механизм вращения фронтов (склонов) синусоидального сигнала при изменении его амплитуды.

Из рисунка видно что при увеличении амплитуды сигнала передние фронты (склоны) вращаются против часовой стрелки, а задние фронты (склоны) — вращаются по часовой стрелке. При уменьшении амплитуды процессы вращения будут происходить в обратном порядке.

Понятно что скорость вращения пропорциональна скорости изменения амплитуды сигнала. Сделано много попыток вывести определение понятия микродинамики. Во многих определениях фигурирует «скорость нарастания» напряжения, но нигде не раскрывается что речь идет не о SR, а о скорости нарастания/спада амплитуды напряжения в атаке и на участке затухания.

На следующих рисунках приведено несколько примеров.

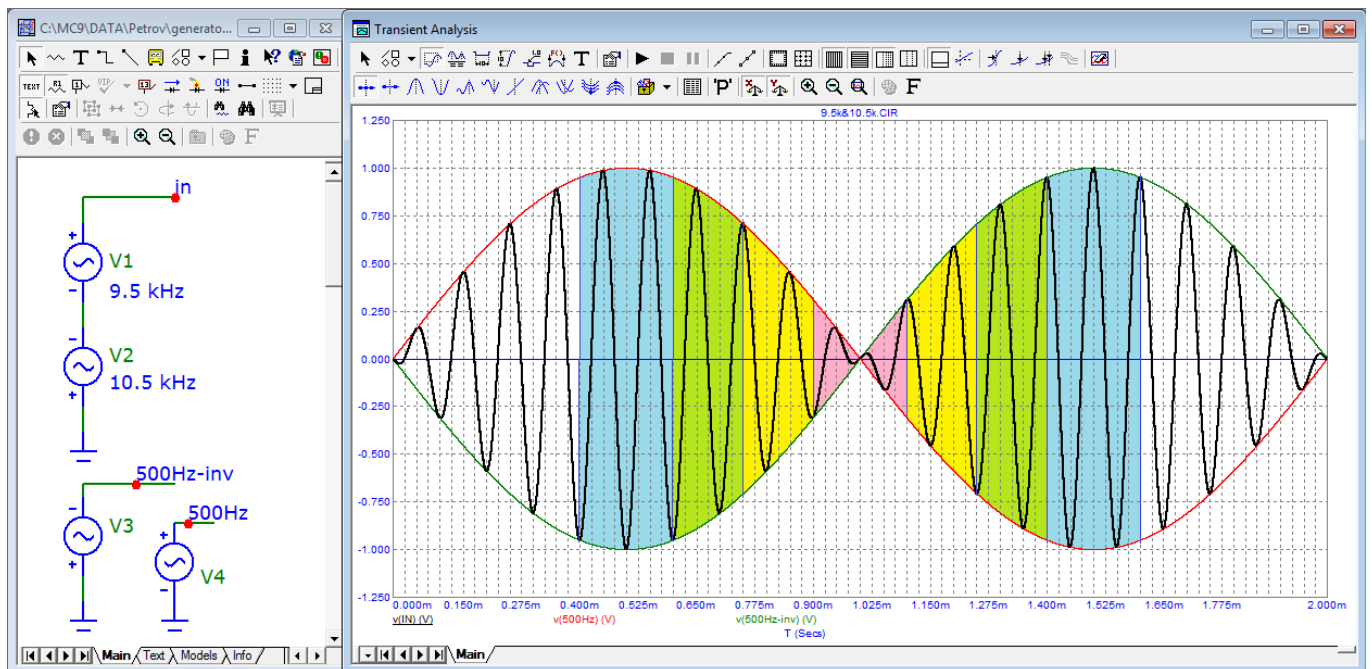


Рис. 2. Сигнал из суммы двух синусоид 9,5 и 10,5 кГц

На рис. 2 показан сигнал состоящий из суммы двух сигналов: 9,5 кГц и 10,5 кГц. Дополнительные генераторы сигналов V3 и V4 служат для подчеркивания огибающих суммарного сигнала. Понятно что максимальная скорость нарастания огибающих сигналов находится вблизи перехода через ноль. Очевидно, что именно в этих местах происходят и максимальные скорости вращения фронтов (склонов) сигнала (выделено розовым цветом). На вершинах же огибающих скорость нарастания минимальна (на самой вершине скорость нарастания равна нулю). Очевидно что и скорость вращения фронтов (склонов) синусоид также минимальна (область выделена голубым цветом).

Аналогичные процессы происходят и в амплитудно-модулированных сигналах. На рис. 3 показан сигнал частотой 20 кГц в качестве несущей, в качестве модулирующего сигнала применен сигнал частотой 1 кГц.

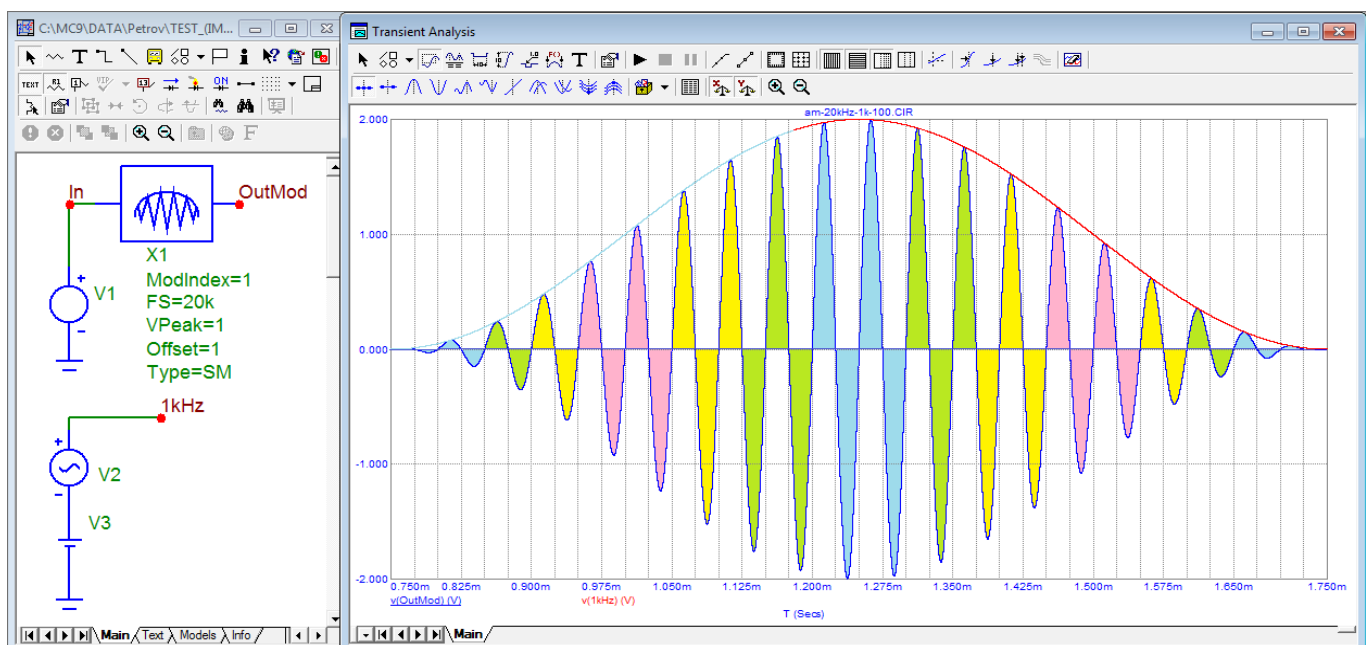


Рис. 3. АМ-сигнал

В данном случае при амплитуде сигнала 2 В максимальная скорость вращения фронтов (склонов) сигнала происходит при амплитуде сигнала 1 В $\pm 0,25$ В (выделено розовым цветом). Наименьшая скорость вращения фронтов (склонов) сигнала будет в начале и конце такого сигнала,

а также в середине (выделено голубым цветом).

Если же промодулировать сигнал так чтобы нарастание и спад амплитуд сигнала был линейным, то и скорости вращения будут иметь постоянное значение, рис. 4.

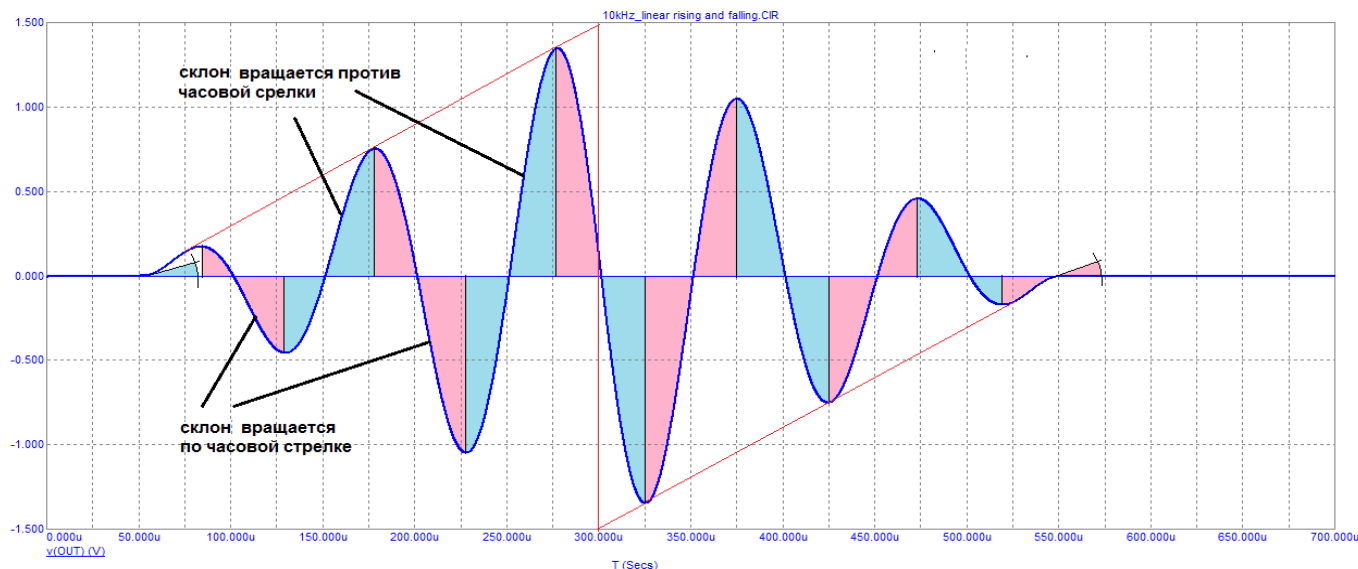


Рис. 4. Сигнал с линейным нарастанием/спадом сигнала

На рис 4 голубым цветом выделены фрагменты сигнала вращающиеся против часовой стрелки, розовым цветом выделены фрагменты вращающиеся по часовой стрелке. В середине сигнала направление вращения фронта (склона) сигнала изменяется на противоположное.

Чтобы исследовать к чему ведет вращение фронтов (склонов) сигнала соберем модель усилителя постоянного тока (УПТ), а чтобы исключить влияние нелинейных искажений в качестве усилителя используем идеальный усилитель.

Для начала обратимся к модели усилителя из AES-100 [2], рис. 5

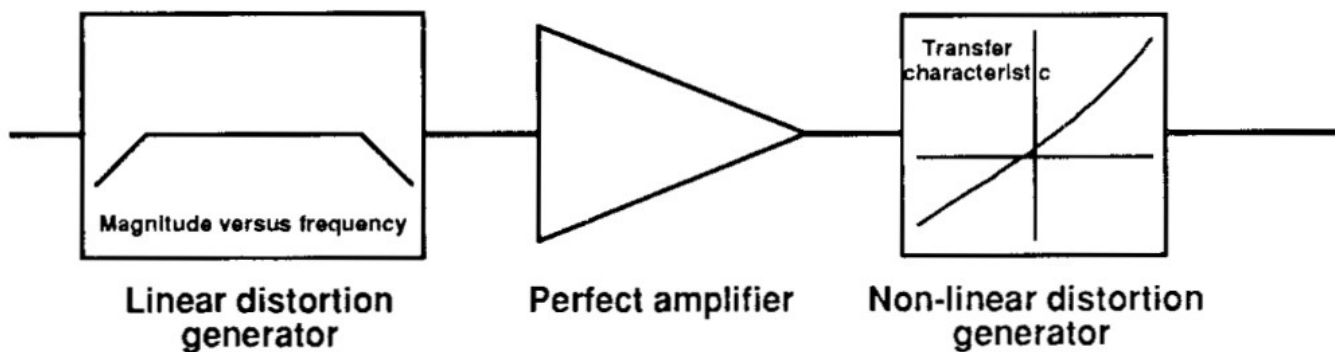


Figure 1 : The classical model of an audio amplifier

Рис. 5. Модель усилителя из AES-100

Для получения модели усилителя постоянного тока без нелинейных искажений упростим схему модели до вида рис. 6

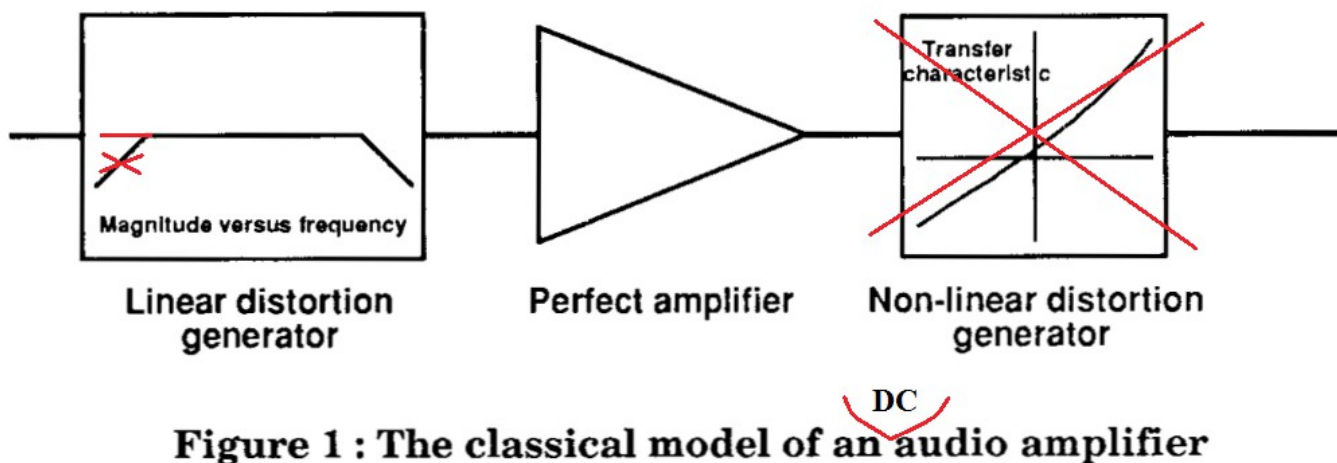


Рис. 6. Упрощенная модель усилителя постоянного тока

Диаграмма Бode модели усилителя при различных значениях ГВЗ приведена на рисунке 7

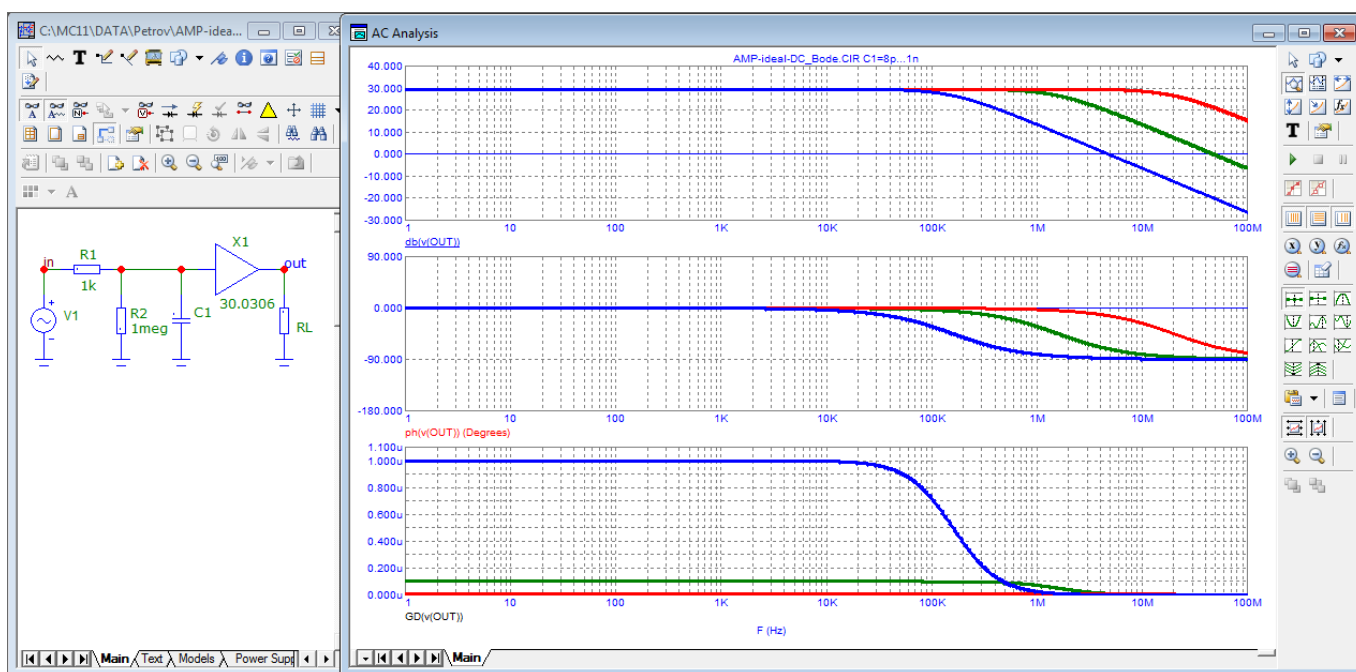


Рис. 7. Диаграмма Бode при ГВЗ равном 8 нс, 100 нс и 1 мкс

Изменение ГВЗ достигнуто изменением конденсатора C1. Только при ГВЗ = 100 нс его значение близко к постоянному значению почти до 800 кГц, далее идет плавный спад.

Подадим на вход модели сигнал с линейным нарастанием/спадом сигнала и измерим с помощью компенсационного метода продукты искажений во временной области. Для начала измерим уровень искажений при ГВЗ = 1 мкс, рис. 8

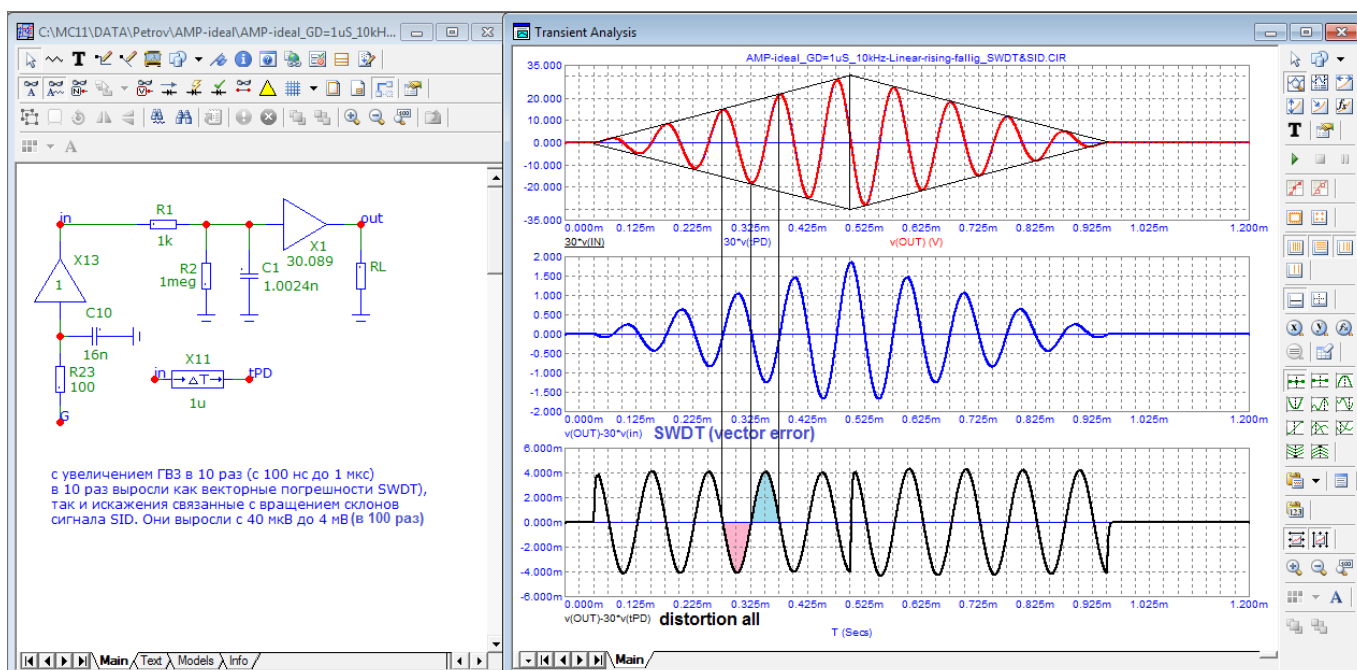


Рис. 8. Результат компенсационного метода тестирования при ГВЗ = 1 мкс.

Из рисунка 8 видно что на всем протяжении сигнала независимо от амплитуды сигнала уровень продуктов искажений постоянен и равен 4 мВ(пик). При вращении фронтов (склонов) сигнала по часовой стрелке выделяются искажения отрицательного знака (выделено розовым), а при вращении фронтов (склонов) сигнала против часовой стрелки - положительного знака (выделено голубым цветом). Продукты искажений не что иное как отставание от реального сигнала во времени, т. е. потери полезного сигнала.

Предположим что уровень сигнала равен 30 мВ (-60 дБ). Тогда уровень искажений на уровне микродинамики будет составлять более 13 %.

Уменьшим время ГВЗ до 100 нс и снова проведем тест, рис. 9

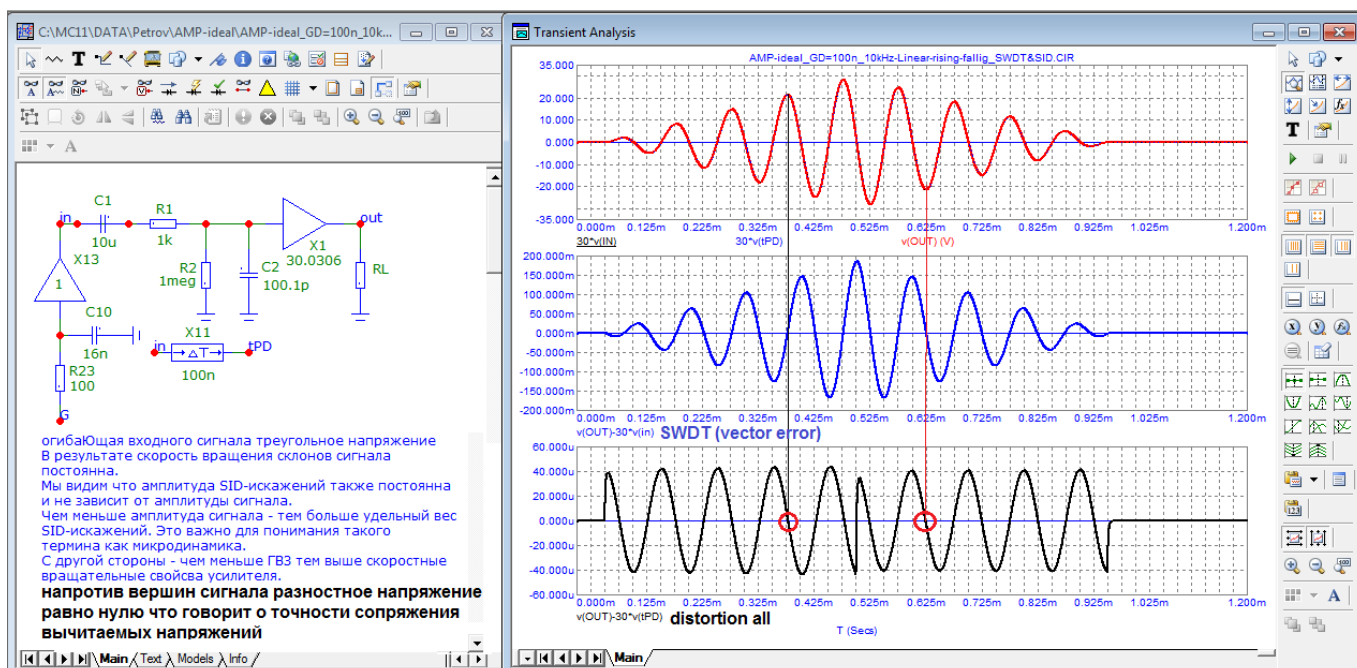


Рис. 9. Результат компенсационного метода тестирования при ГВЗ = 100 нс.

Из рисунка 9 видно что с уменьшением ГВЗ уменьшились и продукты искажений с 4 мВ до 40 мкВ (в 100 раз!). При этом на уровне микродинамики уровень искажений будет всего 0,13%.

Вставим между участком нарастания сигнала (атакой) и участком спада участок с постоянной амплитудой (сустейн) и проведем компенсационный тест, рис. 10

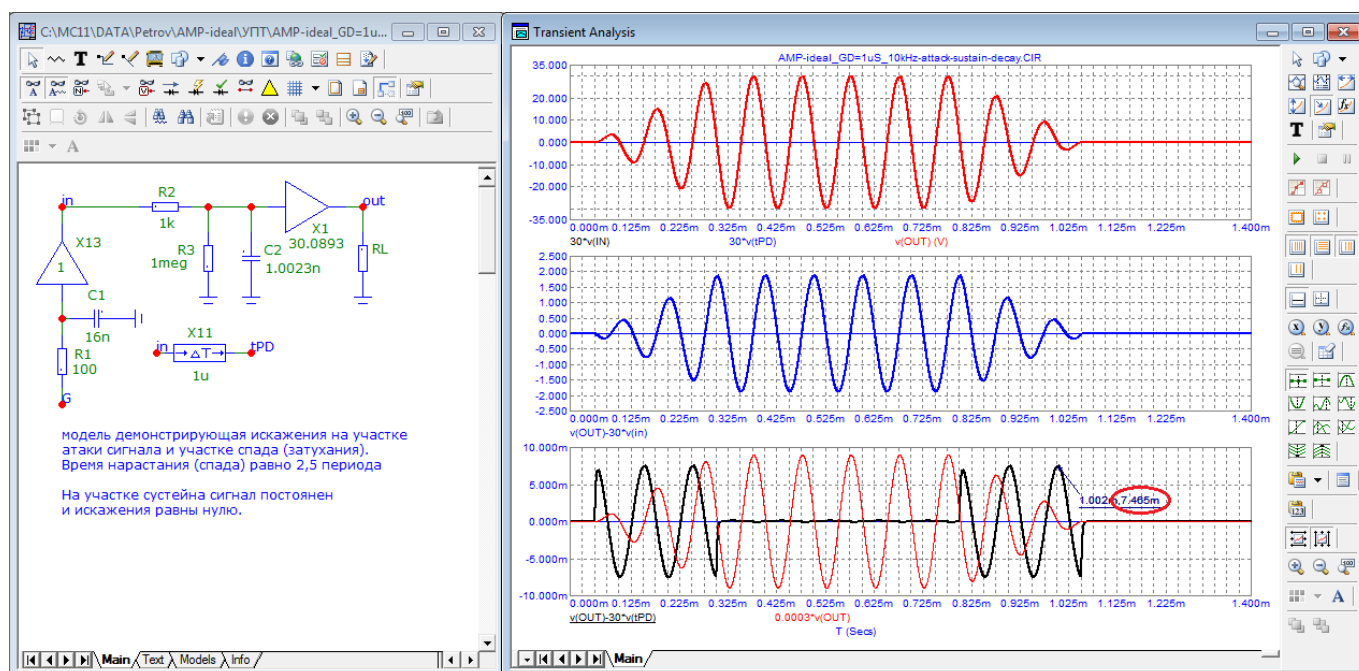


Рис. 10. Тест с упрощенным сигналом имитирующим сигналы музыкальных инструментов

Человеческий мозг наибольшим образом реагирует на изменения сигналов, т. е. на сигналы в атаке и на участке спада. Как видим, именно на этих участках и происходят искажения во временной области.

Замедлим скорость нарастания напряжения увеличив продолжительность атаки/спада, рис. 10а)

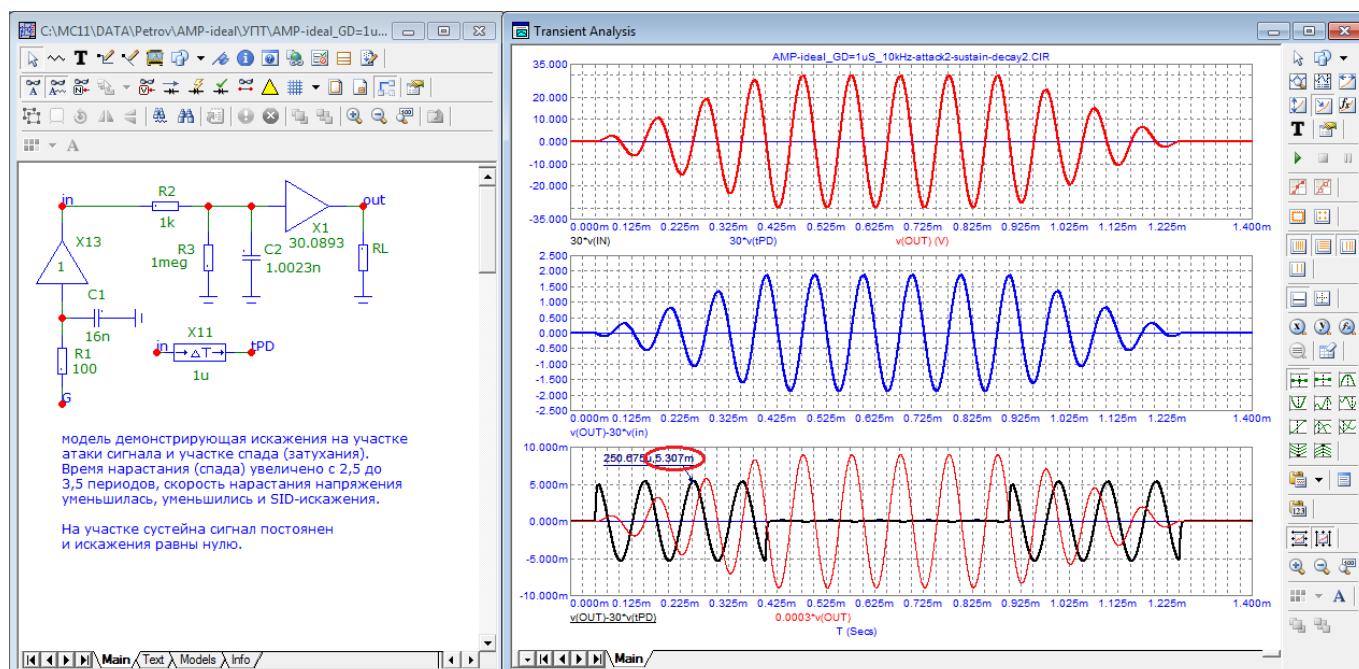


Рис. 10а) Тест бурста с уменьшенной скоростью нарастания/спада напряжения

Сократим участок атаки и спада на 1 период, рис. 10б)

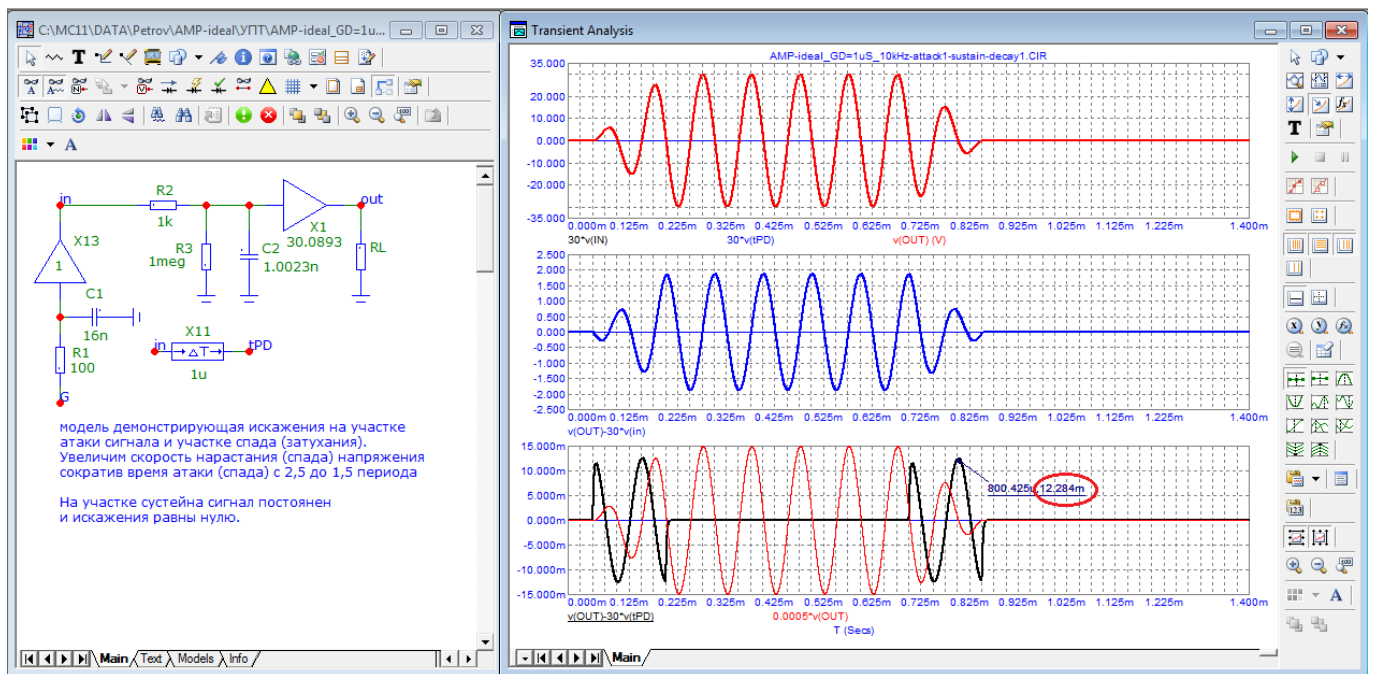


Рис. 10б) Тест бурста с увеличенной скоростью нарастания/спада напряжения

На рисунках 10, 10а) и 10б) наглядно показана зависимость искажений связанных с вращением фронтов сигнала типа SID от скорости нарастания/спада напряжения — это то что упоминается в некоторых определениях понятия микродинамика.

Проведем аналогичные тесты с амплитудно-модулированным сигналом, рис. 11 и 12.

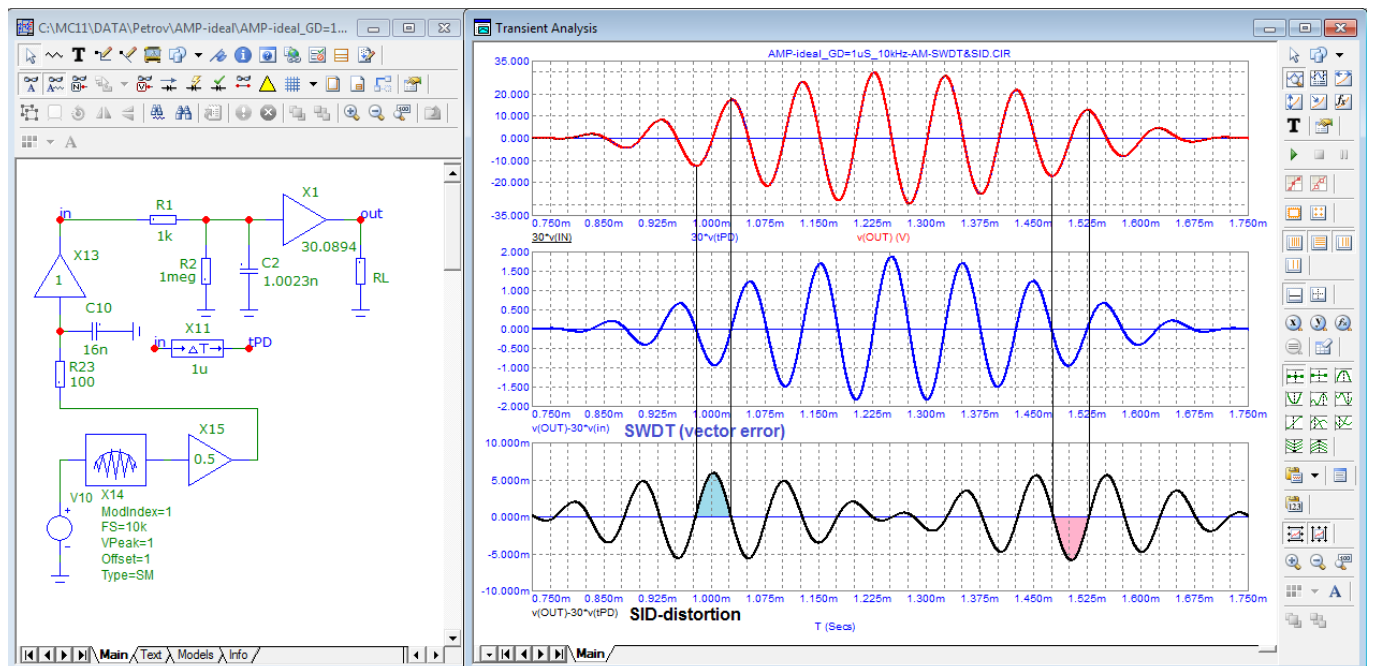


Рис. 11. Результат компенсационного метода тестирования при ГВЗ = 1 мкс.

В данном случае скорость вращения сигнала распределяется в соответствии с рис. 3. Отсюда и такое распределение продуктов искажений.

При снижении ГВЗ до 100 нс продукты искажений также снижаются, рис. 12

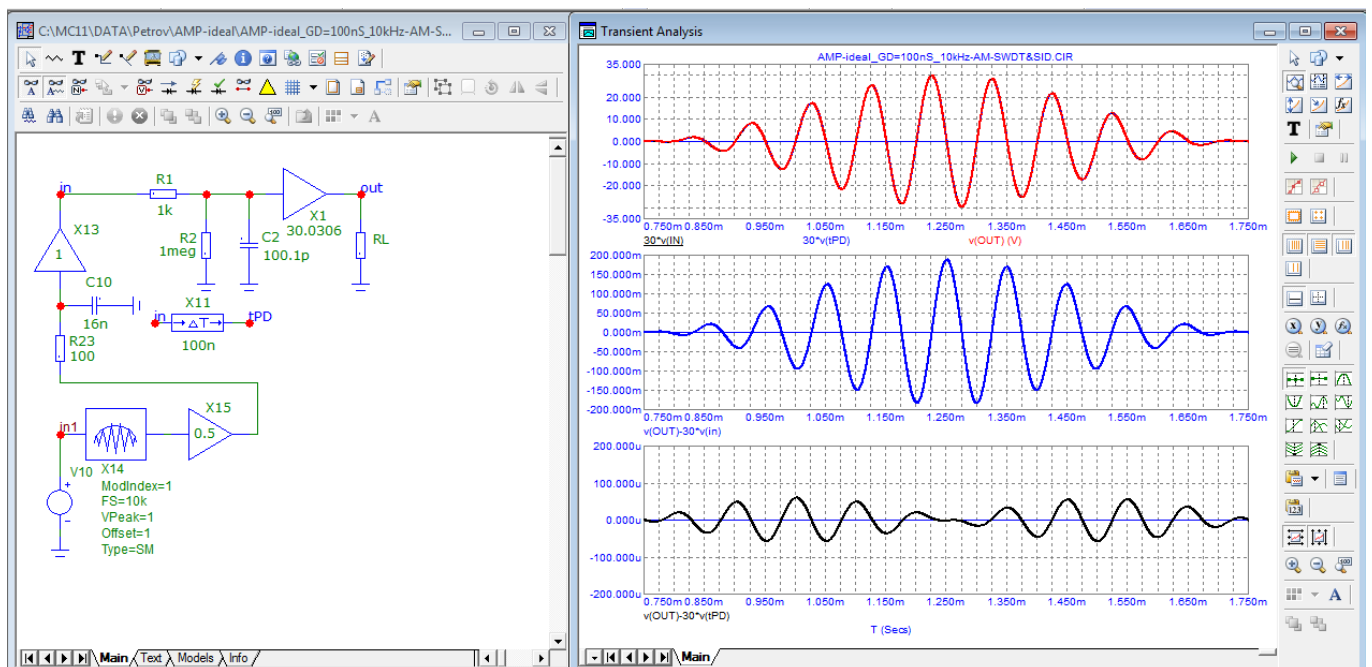


Рис. 12. Результат компенсационного метода тестирования при $ГВЗ = 100$ нс.

Дополнительно рассмотрим что будет происходить при частотной модуляции сигналов.

Понятно что при неизменной амплитуде сигнала при повышении частоты передние склоны (фронты) сигнала вращаются против часовой стрелки, а при снижении частоты — по часовой. Соответственно с задними склонами (фронтами) все происходит ровным счетом наоборот. Следует отметить что при частотной модуляции скорость вращения фронтов (склонов) сигнала значительно меньше чем при амплитудной модуляции. В таких сигналах (особенно при большой девиации частоты) на первый план могут выходить продукты искажений связанные с неравномерностью АЧХ (амплитудно частотные искажения).

Далее приведен пример искажений сигнала частотой 10 кГц с частотной модуляцией 1 кГц при ГВЗ равном 100 нс и 1 мкс, рис. 13 и 14.

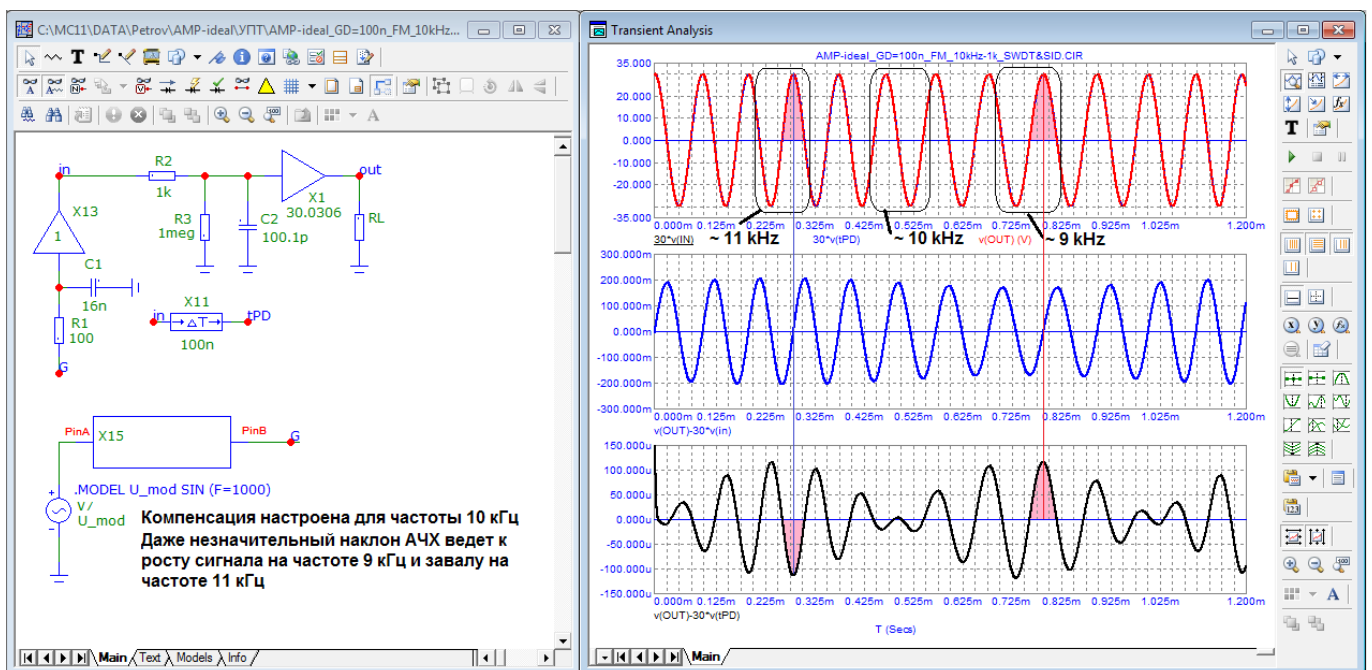


Рис 13. Результат теста частотно модулированного сигнала при несущей 10 кГц и частоте модуляции 1 кГц при ГВЗ = 100 нс

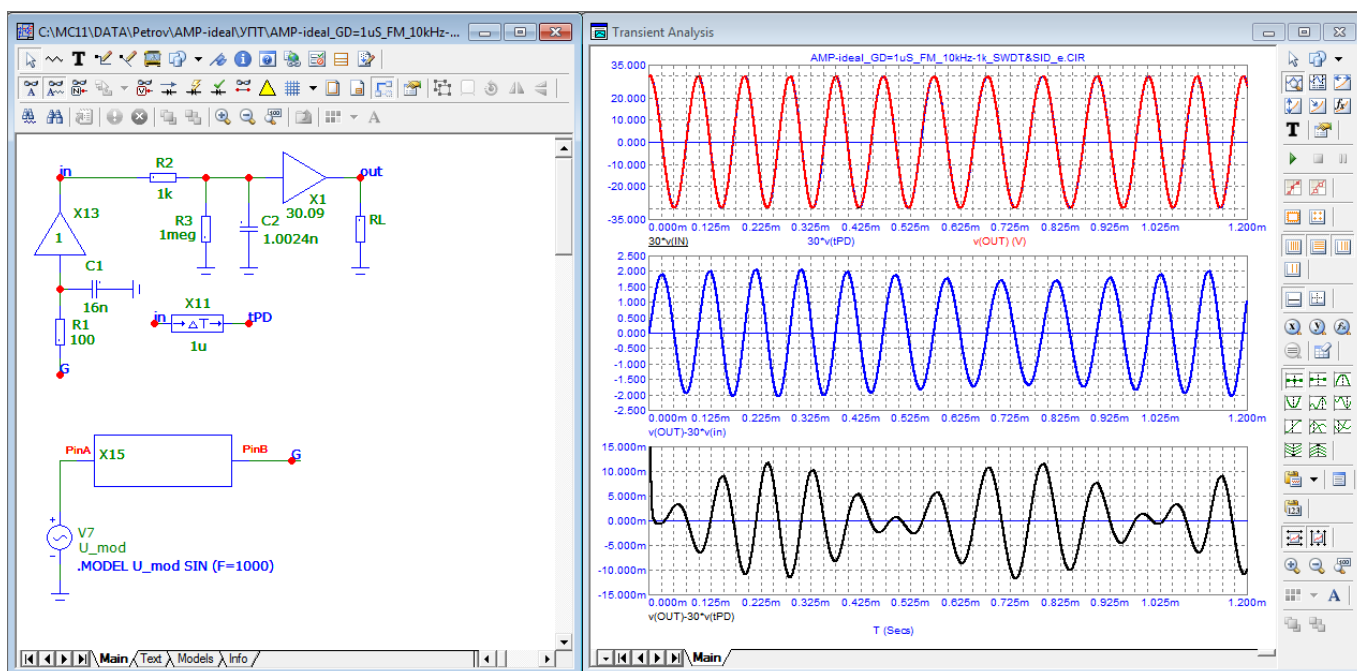


Рис 14. Результат теста частотно модулированного сигнала при несущей 10 кГц и частоте модуляции 1 кГц при ГВЗ = 1 мкс

В приведенных тестах максимальное подавление продуктов искажений настроено на центральной частоте, т.е. на частоте 10 кГц. Вблизи крайних частот 9 и 11 кГц мы наблюдаем максимальный уровень амплитудных искажений. Снижение ГВЗ с 1 мкс до 100 нс (в 10 раз) приводит к снижению амплитудных искажений в 100 раз.

Уровень искажений растет как с ростом ГВЗ, так и с ростом частоты модуляции. Дело в том что для передачи сигнала с точностью 0,01% по амплитуде полоса пропускания должна быть 71 f [3]. Таким образом для средней частоты 10 кГц полоса пропускания должна быть 710 кГц.

При ГВЗ = 100 нс полоса равна 1,6 МГц, а при ГВЗ = 1 мкс — имеем всего 160 кГц.

Таким образом к искажениям связанным с вращением склонов (фронтов) сигнала добавляются еще и существенные амплитудно частотные искажения.

Получается что даже незначительные отклонения от частоты (от прямой дороги применительно к гоночному автомобилю по ассоциации главного разработчика Като из SOULNOTE) возникают существенные искажения. Чем меньше ГВЗ — тем меньше и вносимые искажения во временной области.

Не удивительно что некоторые усилители с ООС плохо работают с шумовыми сигналами (в них хаотически меняется как амплитуда, так и частота), в том числе и с сигналами типа аплодисменты. Эти сигналы превращаются в капли дождя по подоконнику. Эти проблемы часто приписывают коммутационным искажениям, хотя усилители класса АВ (которых подавляющее большинство) при таких уровнях сигнала еще работают в классе А. А причина кроется в ГВЗ, и связанным с ним быстродействием ОС.

В реальных усилителях ГВЗ носит более сложный характер чем в простой RC-цепи которая была использована для моделирования усилителей. Поэтому и звуковой подчёрк усилителей с одинаковым Кг, но с существенно отличающимися ГВЗ также будет существенно отличаться.

Мне могут возразить, мол тестировались модели с упрощенным формированием time Propagation Delay с помощью RC-цепи.

Хорошо, возьмем к примеру модель усилителя Sokol-3P [4] и проведем тест на искажения в атаке, сустейне и на спаде, рис. 15

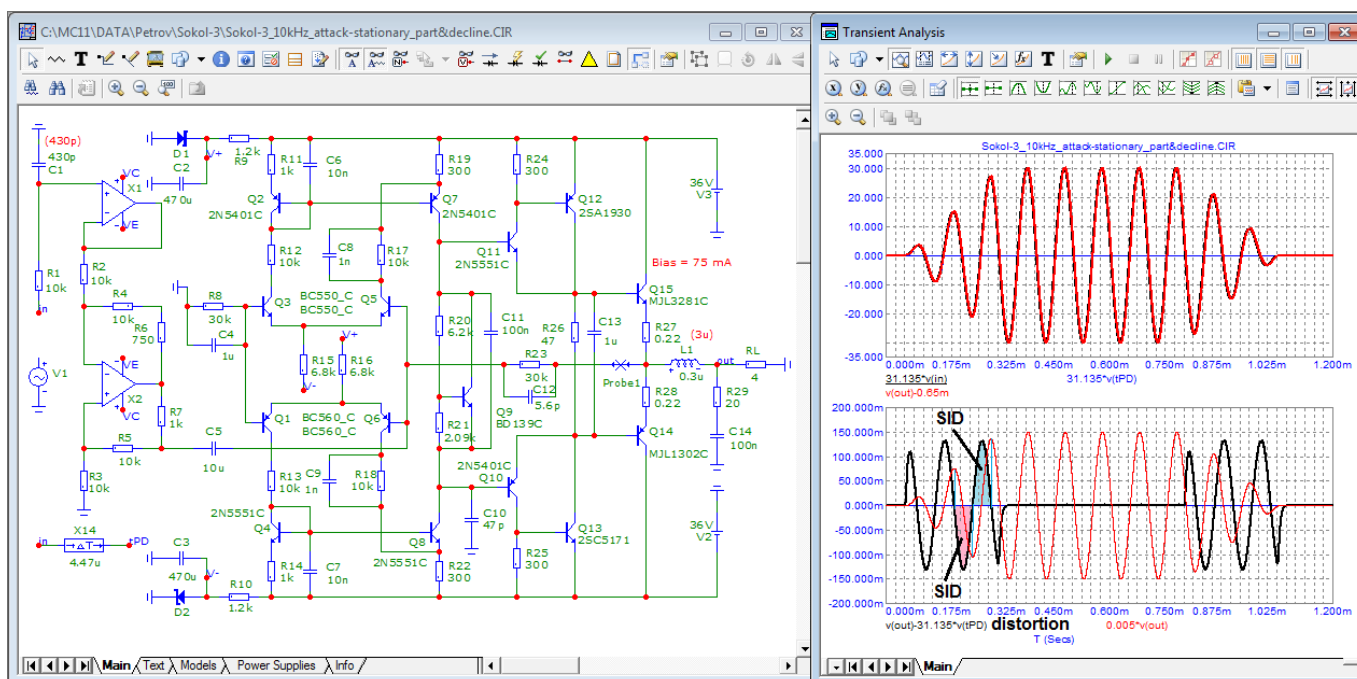


Рис. 15. Результат тестирования компенсационным методом модели Sokol-3P

Как показал тест, продукты искажений на участках атаки и спада равны и практически не зависят от амплитуды сигнала. На самом деле уровень подобных искажений зависит от частоты сигнала и скорости нарастания/спада его амплитуды.

Что мы имеем на уровне микродинамики? Предположим за уровень микродинамики взят сигнал уровнем -50 дБ ($1/300$ от $30\text{ В} = 0,1\text{ В} = 100\text{ мВ}$). Получается что при уровне полезного сигнала 100 мВ продукты искажений равны 130 мВ , т. е. выше полезного сигнала. **Потом удивляемся, почему звучание тарелочек, треугольника или фортепьяно не такое как в реальности или аплодисменты звучат в виде «шлепков» дождя по подоконнику.**

Как применить этот метод в железе, надеюсь понятно расписано в статье по компенсационному методу измерения искажений.

Литература:

1. Kato, Design Philosophy, https://www.soulnote.co.jp/eu_sn_philosophy-en.html
2. Gérard PERROT, Measurement of a Neglected Circuit Characteristic, AES-100, may 1996
3. Operational Amplifiers by Jiri Dostal_1993_p.211
4. А.Соколов, Ультранинейный УНЧ Sokol-3P <https://ldsound.club/threads/ultralinejnyj-unch-povyshennoj-moschnosti-sokol-3p.2129/>

Александр Петров
03.12.2024