

О механизме вращения сигналов

Любое отклонение сигнала от синусоиды постоянной частоты и амплитуды (изменение амплитуды, изменение частоты или и то и другое одновременно) сопровождается его вращением в местах изменений.

Рассмотрим несколько примеров.

Для начала возьмем одну синусоиду частотой 10 кГц и амплитудой 30 В(пик), рис. 1

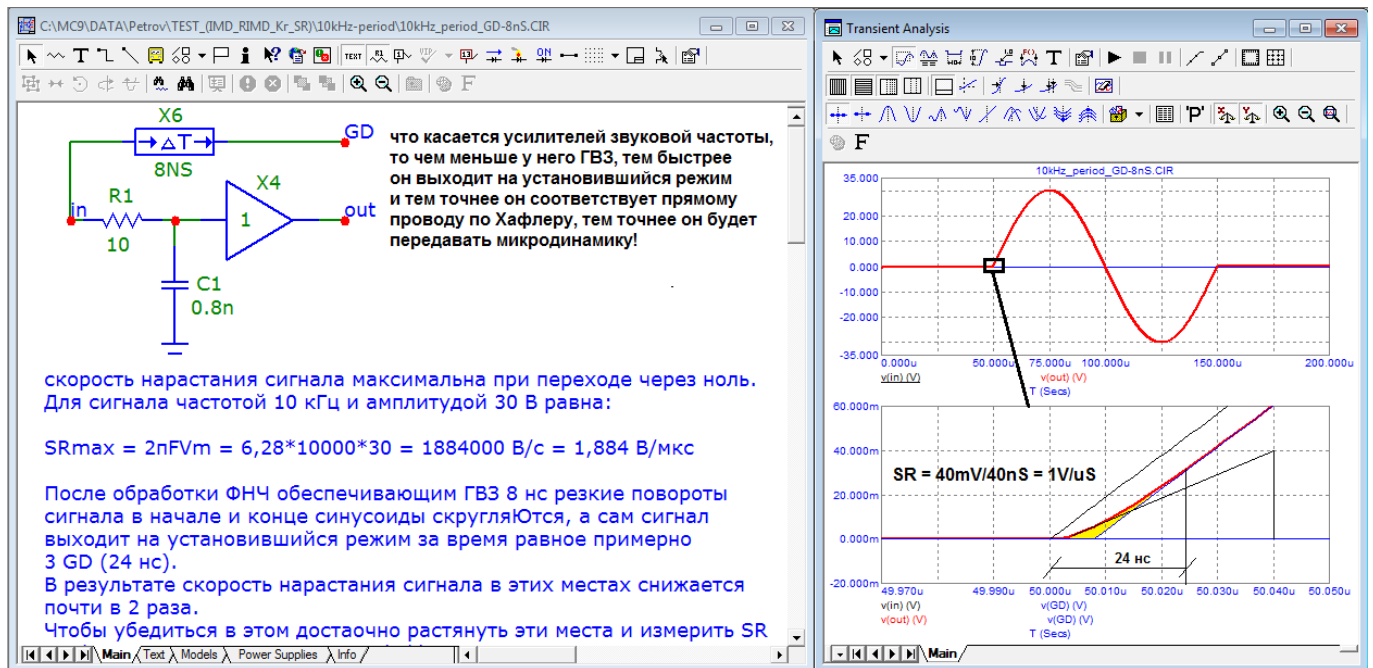


Рис. 1. Выход на установившийся режим

В момент включения синусоиды происходит поворот сигнала с горизонтального участка на синусоиду. При положительной первой полуволне вращение сигнала происходит против часовой стрелки. Сигнал без обработки фильтром в начальный момент имеет мгновенную скорость вращения. Однако уже при обработке ФНЧ с постоянной времени $\tau = RC = 10 \text{ Ом} * 0,8 \text{ нФ} = 8 \text{ нс}$ время поворота до выхода на установившийся режим составляет примерно $3\tau \sim 24 \text{ нс}$. Следует отметить что именно такое ГВЗ требуется от усилителя звуковой частоты по критерию Хафлера SWDT чтобы он соответствовал прямому проводу. Желтым цветом выделена погрешность, которая вносится в сигнал даже при обработке ФНЧ с высокой частотой среза равной

$$f = 1/2\pi\tau = 1/2\pi RC \sim 20 \text{ МГц}$$

На следующих рисунках представлены тестовые сигналы после обработки ФНЧ с частотой среза 100 кГц (в 200 раз ниже). Постоянная времени такого фильтра равна 1,6 мкс (в 200 раз больше). Такой фильтр применяется для обработки тестовых сигналов DIM-100.

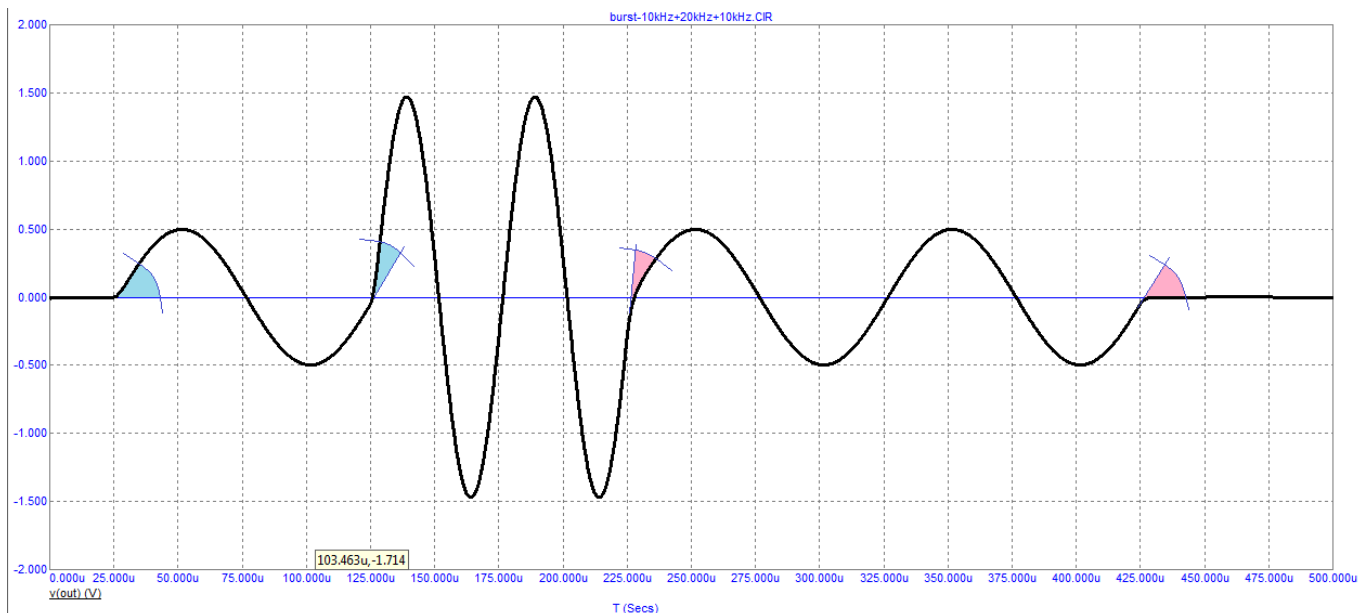


Рис. 2. Тестовый сигнал с переключением синусоиды 10 кГц на синусоиду 20 кГц в три раза большей амплитуды и обратно на исходный сигнал.

В момент включения сигнала происходит поворот сигнала с горизонтальной линии на синусоиду (в данном случае вращение против часовой стрелки). В момент переключения на сигнал в 3 раза большей амплитуды также происходит вращение сигнала против часовой стрелки. Далее показано вращение сигнала по часовой стрелке при снижении амплитуды сигнала. Вращение сигнала по часовой стрелке имеет место и по окончании сигнала. При переключениях на спадающем заднем склоне сигнала вращения будут в противоположном направлении.

Среди форм синусоидальных сигналов есть понятие затухающая синусоида — синусоида имеющая спадающий характер амплитуды с некоторого значения до нуля. В амплитудно модулированных сигналах также можно видеть участки синусоид с нарастанием и спадом амплитуды.

В амплитудно модулированных сигналах вращение сигнала происходит от начала до его конца. Вот пример линейно нарастающего/спадающего сигнала частотой 10 кГц, рис. 3.

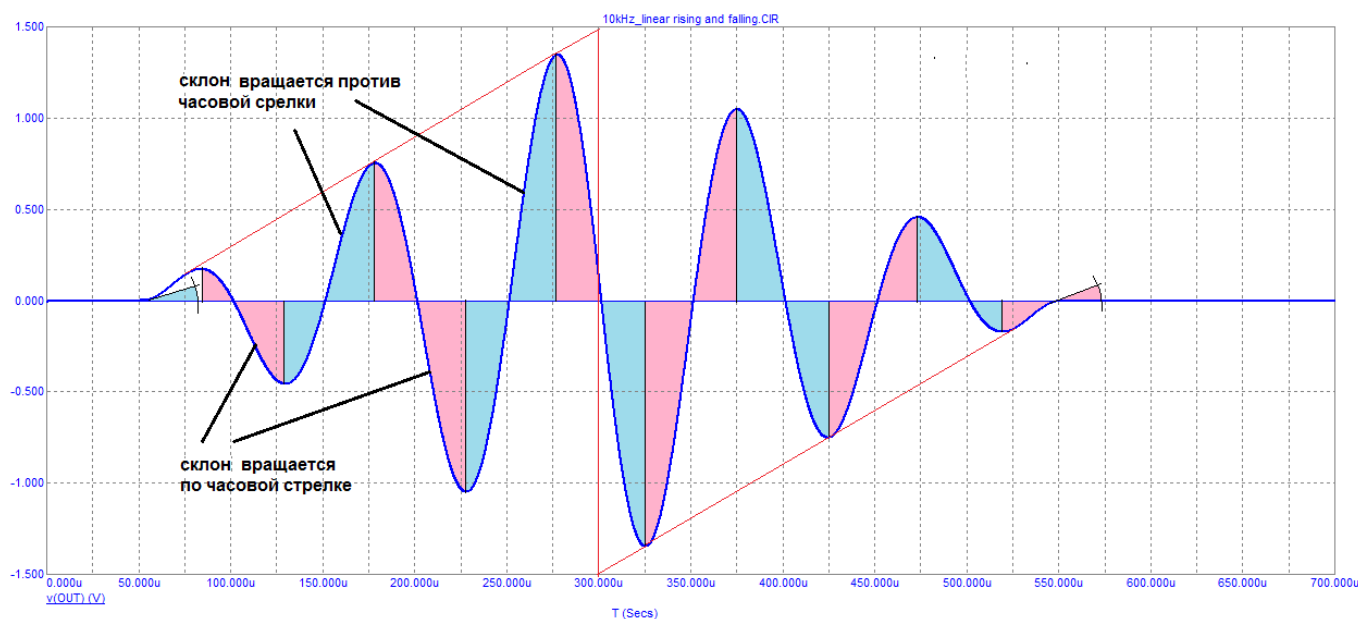


Рис. 3

В таком сигнале скорость вращения склонов сигнала постоянна (не зависит от амплитуды сигнала). В этом случае именно на малых сигналах имеют место наибольшие искажения скорости вращения (это то, что отвечает за микродинамику в звуковых сигналах).

Для лучшего понимания механизма вращения склонов сигнала добавим синусоидальный сигнал постоянной амплитуды, рис. 4.

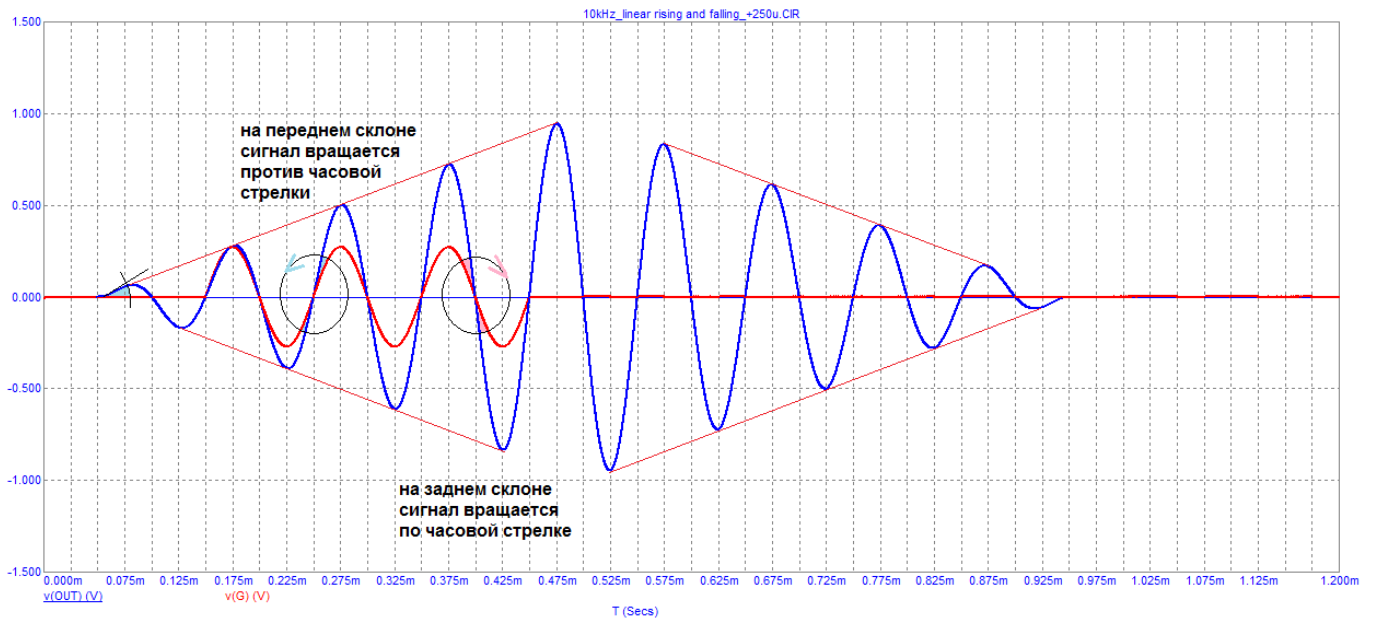


Рис. 4

Как видим нарастание/спад амплитуд синусоид сигнала по отношению к предыдущему уровню сопровождается вращением склонов.

Простейший тестовый сигнал с вращающимися склонами можно получить простым сложением двух сигналов.

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 $0,5(f_1 + f_2)$ и медленно меняющейся амплитудой с частотой $(f_1 - f_2)$. Чем выше частота биений, тем выше скорость вращения склонов сигнала.

Пример тестового сигнала из двух частот 9 и 11 кГц. Средняя частота 10 кГц, а частота биений равна 2 кГц, рис. 5.

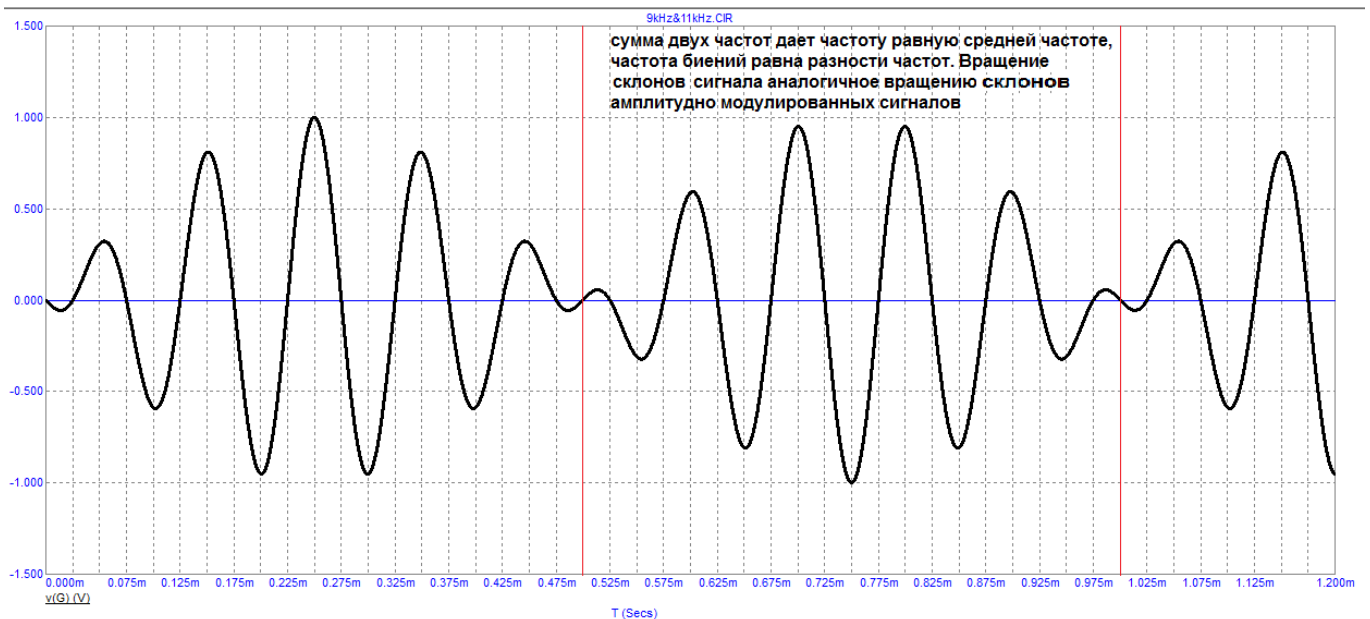


Рис. 5. Сумма двух сигналов частотой 9 и 11 кГц

В отличие от простых бурстов (пачек синусоид), которые содержат спектр высших гармоник в спектре этого сигнала всего 2 гармоники (две палки). Следует отметить что формы сигналов будут существенно зависеть от начальной фазы генераторов сигналов.

Аналогичный сигнал можно получить с помощью 100 % амплитудной модуляции несущей

10 кГц сигналом частотой 1 кГц. При этом несущая 10 кГц автоматически подавляется. Для FFT это чистые сигналы, поэтому тест ИМИ не выявляет ничего плохого, и только компенсационный метод измерения продуктов искажений позволяет выявить искажения во временной области — искажения связанные со скоростью вращения участков сигнала (SID – Slew induced distortion).

Вращение склонов сигнала аналогичное предыдущему примеру, причем максимальная скорость вращения склонов сигнала будет при малых амплитудах сигнала.

Следует отметить что в звуковых сигналах вращение сигнала — непрерывный процесс. А так как одновременно могут быть сигналы далеко разнесенные по частоте (частота биений может быть высокой), то реальная скорость вращения может быть гораздо выше чем в тестовых сигналах.

В последних примерах нарастание амплитуд сигнала напоминают атаку звуковых сигналов, а затухание — соответственно спад. Например, 1/3 октавный бурст низкой частоты применяют для имитации удара барабана.

В 1/3 октавных бурстах скорость вращения склонов сигнала будет максимальна в начале и конце бурста, а в середине, где скорость нарастания/спада амплитуд синусоид минимальна — минимальна и скорость вращения склонов.

Что понимать под искажениями во временной области?

Это не что иное как искажения формы сигнала, в первую очередь это искажения SID (Slewing Induced Distortion) связанные со скоростью поворота 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).

Чем больше ГВЗ усилителя (со входа до нагрузки) — тем ниже скоростные характеристики отвечающие за точность усиления сигналов в местах его вращения, тем хуже усилитель будет передавать нюансы звукового материала (микродинамику).

Среди радиолюбителей популярен тест ИМИ частотами 19 и 20 кГц.

Чтобы исключить влияние нелинейных искажений сформируем АФЧХ усилителя простыми RC-цепями, а усиление сигнала обеспечим с помощью идеального усилителя и проведем тест ИМИ, рис. 6.

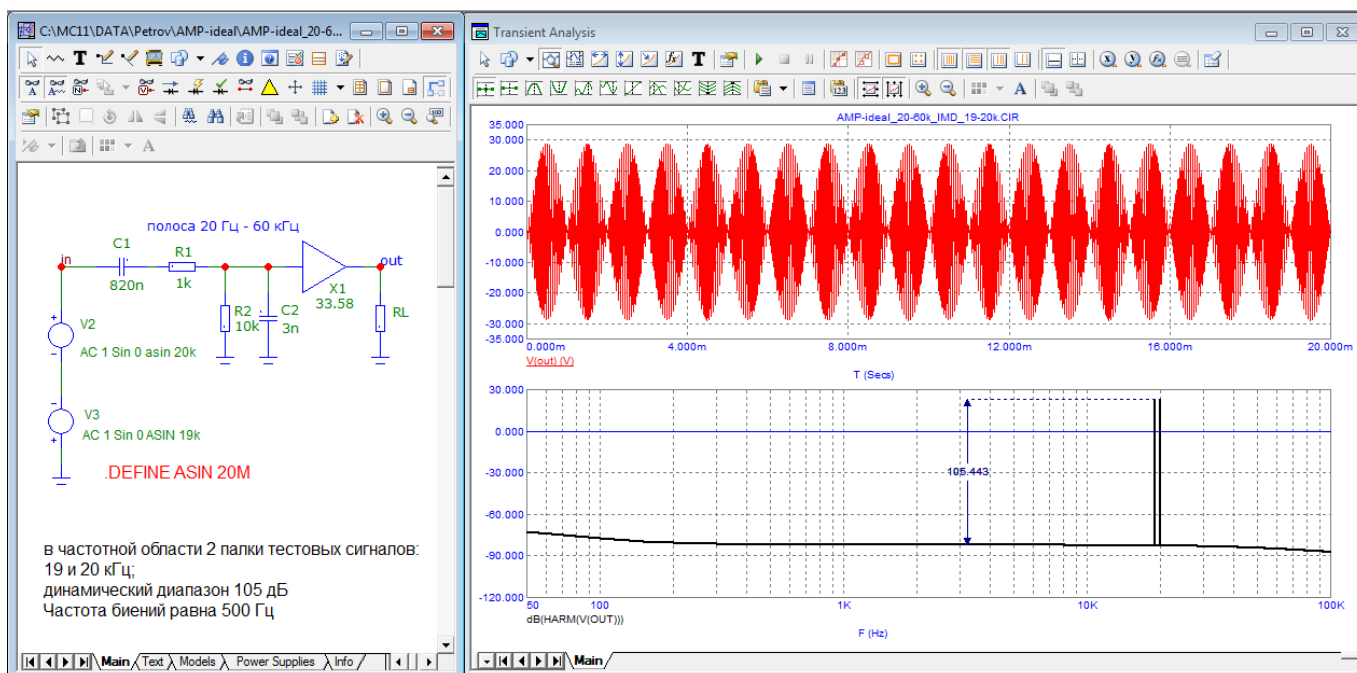


Рис. 6 Тест ИМИ частотами 19 и 20 кГц

В частотной области мы видим всего две палки и больше ничего (что и следовало ожидать). При этом динамический диапазон всего 105 дБ (а ведь усилитель идеальный! и даже без индуктивности на выходе)

Увеличим разнос частот в 4 раза, рис. 7

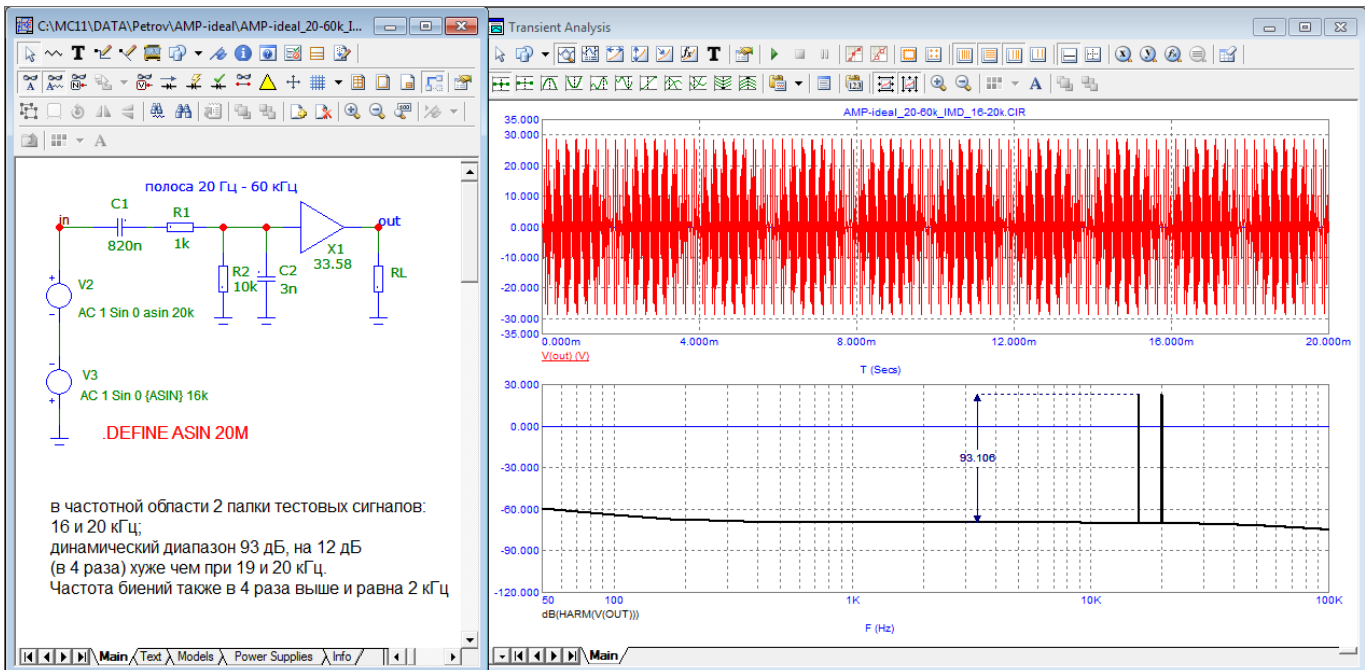


Рис. 7 Результат теста ИМИ на основе идеального усилителя сигналами 16 и 20 кГц

Увеличение разноса частот в 4 раза привело ровно к такому снижению динамического диапазона за счет роста продуктов искажений во временной области.

Увеличим разнос частот в 10 раз, рис. 8

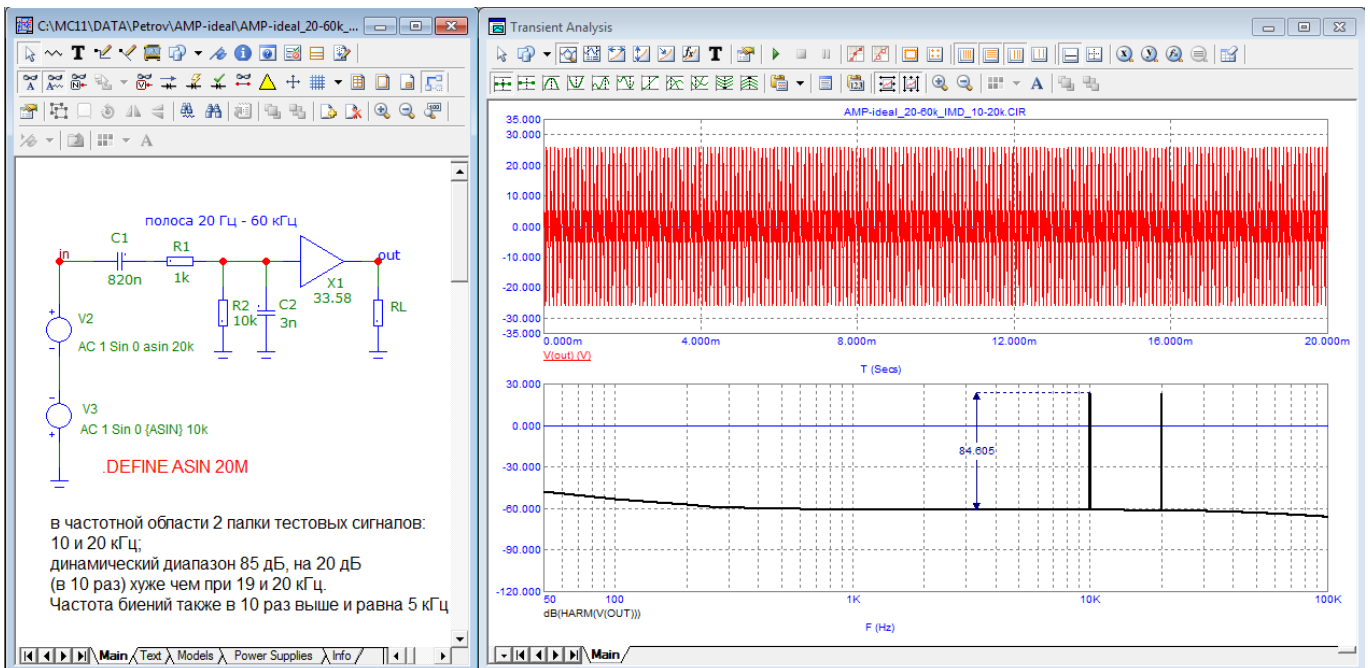


Рис. 8. Результат теста ИМИ сигналами 10 и 20 кГц

Как показывает тест динамический диапазон снизился на 20 дБ (в 10 раз) по сравнению с тестом частотами 19 и 20 кГц.

Попробуем разобраться за счет чего снижается динамический диапазон (растет шумовая подставка). Для этого сделаем тест компенсационным методом, рис. 9

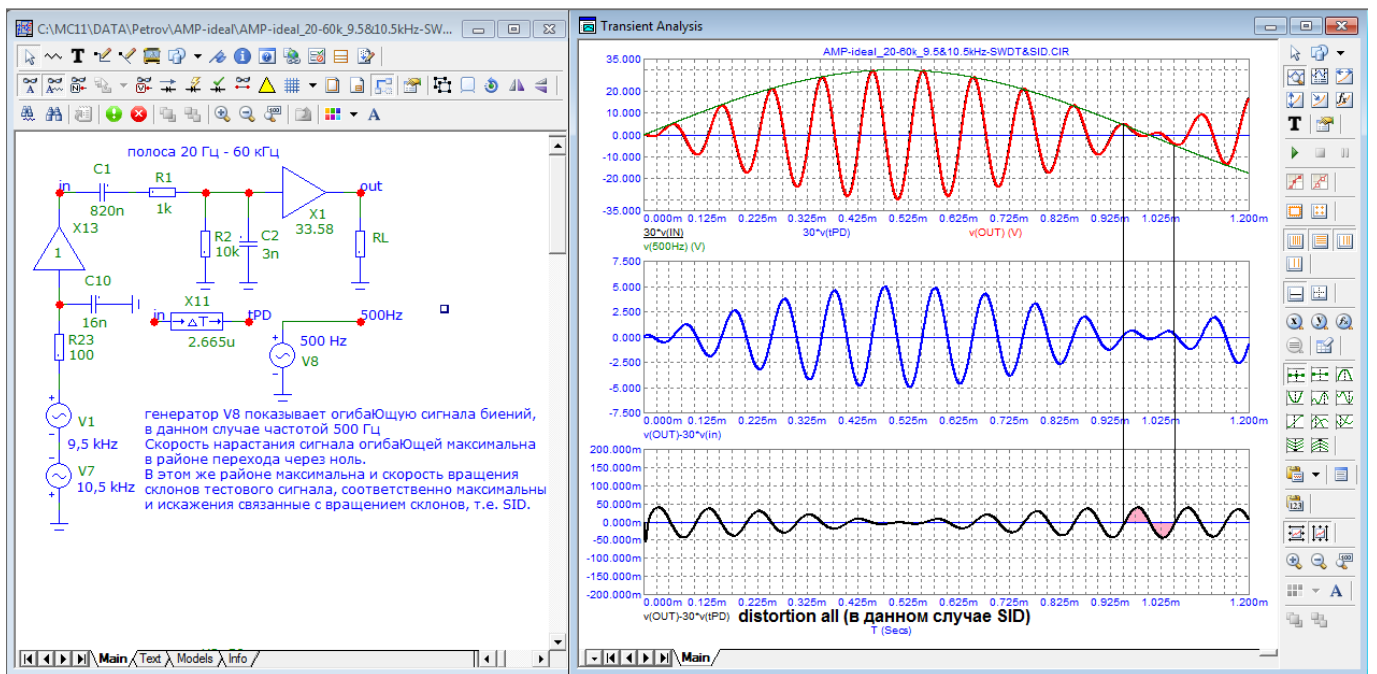


Рис. 9. Результат теста суммы двух сигналов 9,5 и 10,5 кГц

Перед подачей на вход сумма двух сигналов обработана ФНЧ 100 кГц. Выходной сигнал сдвинут во времени на время прохождения сигнала со входа до нагрузки. Если опустить вертикали с вершин входного сигнала на третий график, то можно видеть что задержанный входной сигнал и выходной сигнал равны (их разница на вершинах равна нулю). Тем не менее во временной области мы видим искажения амплитудой до 40 мВ. Причем они максимальны при минимальном входном сигнале. А на максимальных уровнях, где вращение склоном минимально, минимальны и дополнительные продукты искажений.

Увеличим разнос частот в 4 раза, рис. 10

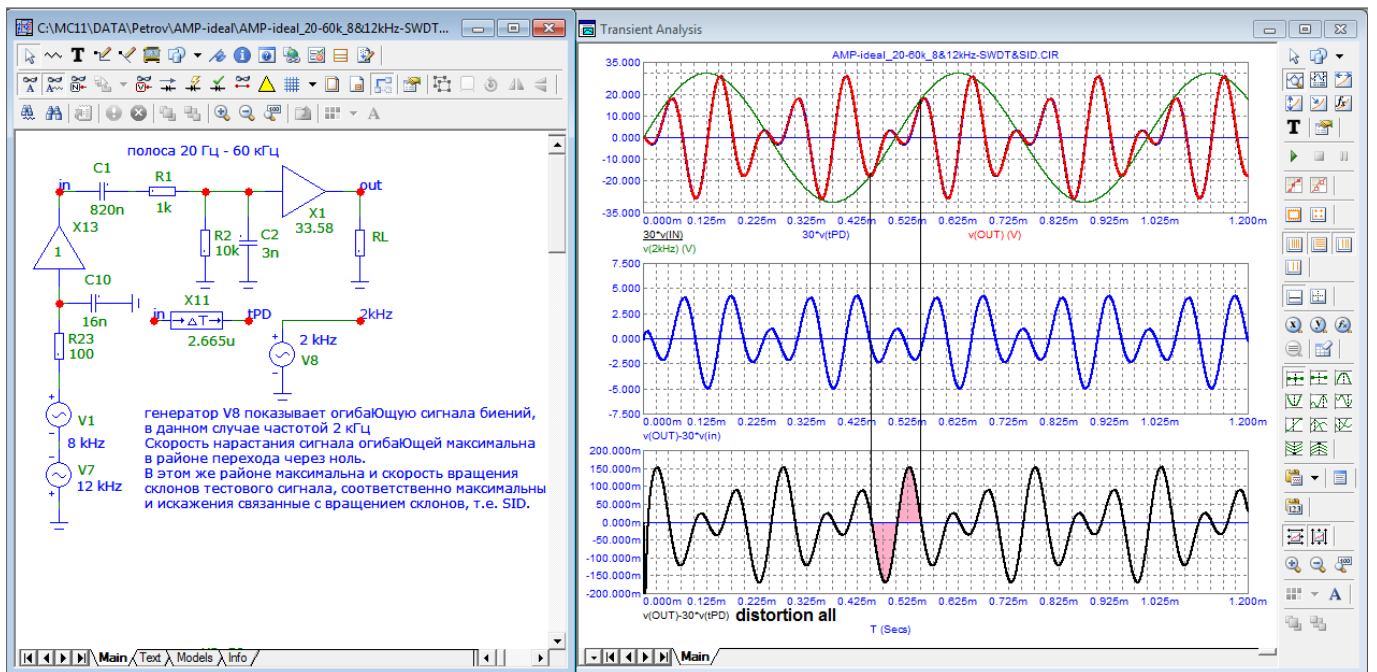


Рис. 10. Результат теста компенсационным методом частотами 8 и 12 кГц

В результате увеличения разноса частот в 4 раза выросла скорость вращения склонов сигнала, в 4 раза выросла и амплитуда SID-исажений.

Увеличим разнос в 10 раз, рис. 11

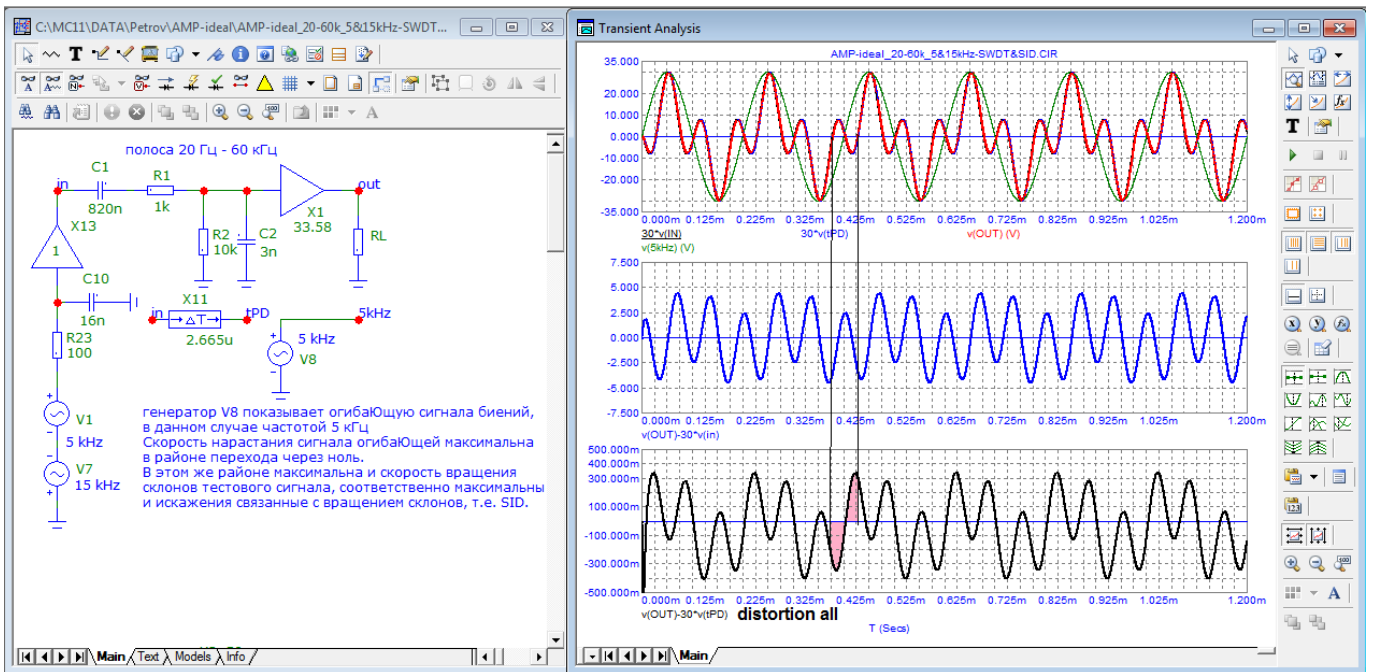


Рис. 11 Результат теста сигналами 5 и 15 кГц

В результате увеличения разности частот выросла амплитуда продуктов искажений, они стали примерно одинаковыми и почти в 10 раз большей амплитуды чем при сигналах 9,5 и 10,5 кГц.

Сделаем тест линейно нарастающим и линейно спадающим синусоидальным сигналом, рис. 12.

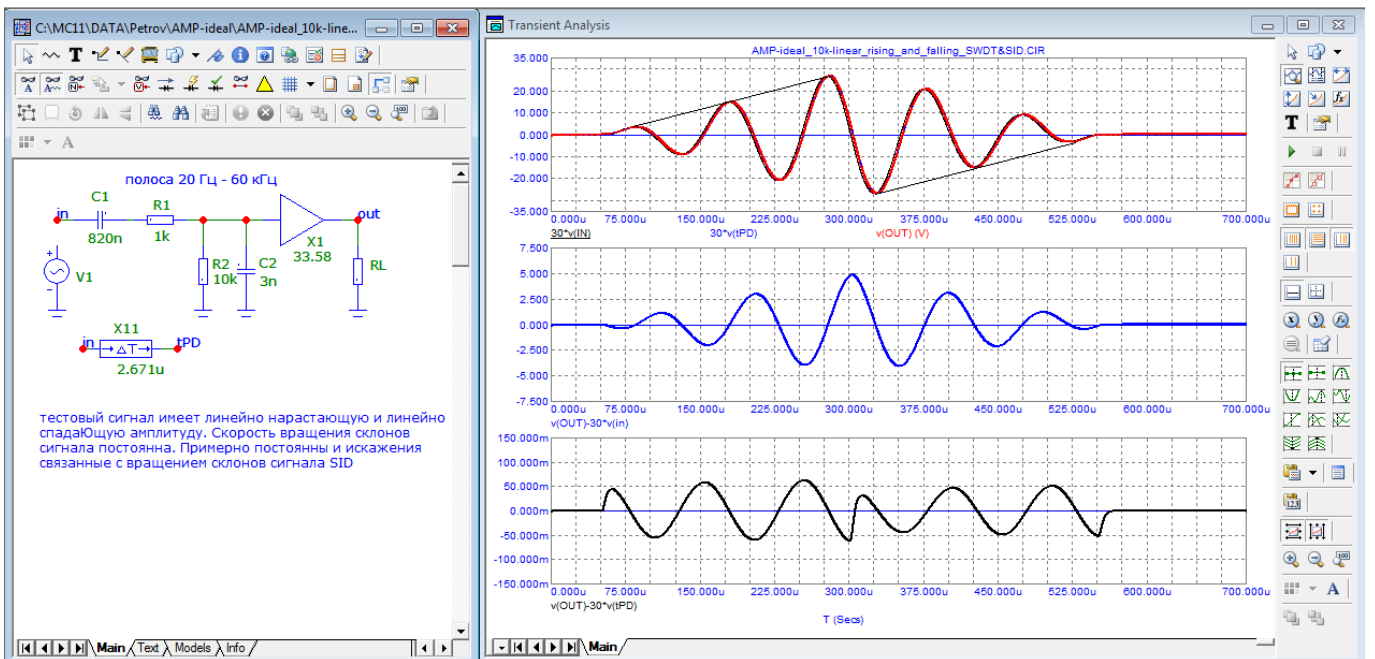


Рис. 12. Компенсационный тест сигнала частотой 10 кГц с линейно нарастающей и линейно спадающей амплитудой

При линейном нарастании/спаде сигнала скорость вращения склонов сигнала постоянна, примерно постоянна и уровень продуктов искажений. Налицо взаимосвязь уровня шумовой подставки в тесте ИМИ с уровнем SID-искажений в тесте компенсационным методом, а также уровень SID-искажений со скоростью вращения склонов сигнала.