

## Влияние характеристики ГВЗ на параметры УМЗЧ

Для начала обратимся к высказыванию одного авторитетного радиолюбителя

<https://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=29546&p=1008876&viewfull=1#post1008876>

### Усилитель просто с высокими параметрами

krulfa

Чем больше я продвигаюсь вперед, тем больше прохожу к мнению, что **отсутствие именно фазовых искажений определяет естественность звучания, эмоциональность и эффект присутствия**. В одноконтурных и усилителях без ООС все легко, поскольку в диапазоне ЗЧ ФЧХ стабильна. А в усилителях с ООС ой как все непросто... И **речь не идет об 5% или 10% фазовых искажений, а о сотых и тысячных**, то есть тех же цифрах, как мы привыкли видеть для КНИ.

**Примечание.** Очевидно автор этих строк понимает под процентами фазовых искажений отклонение от 360 градусов периода.

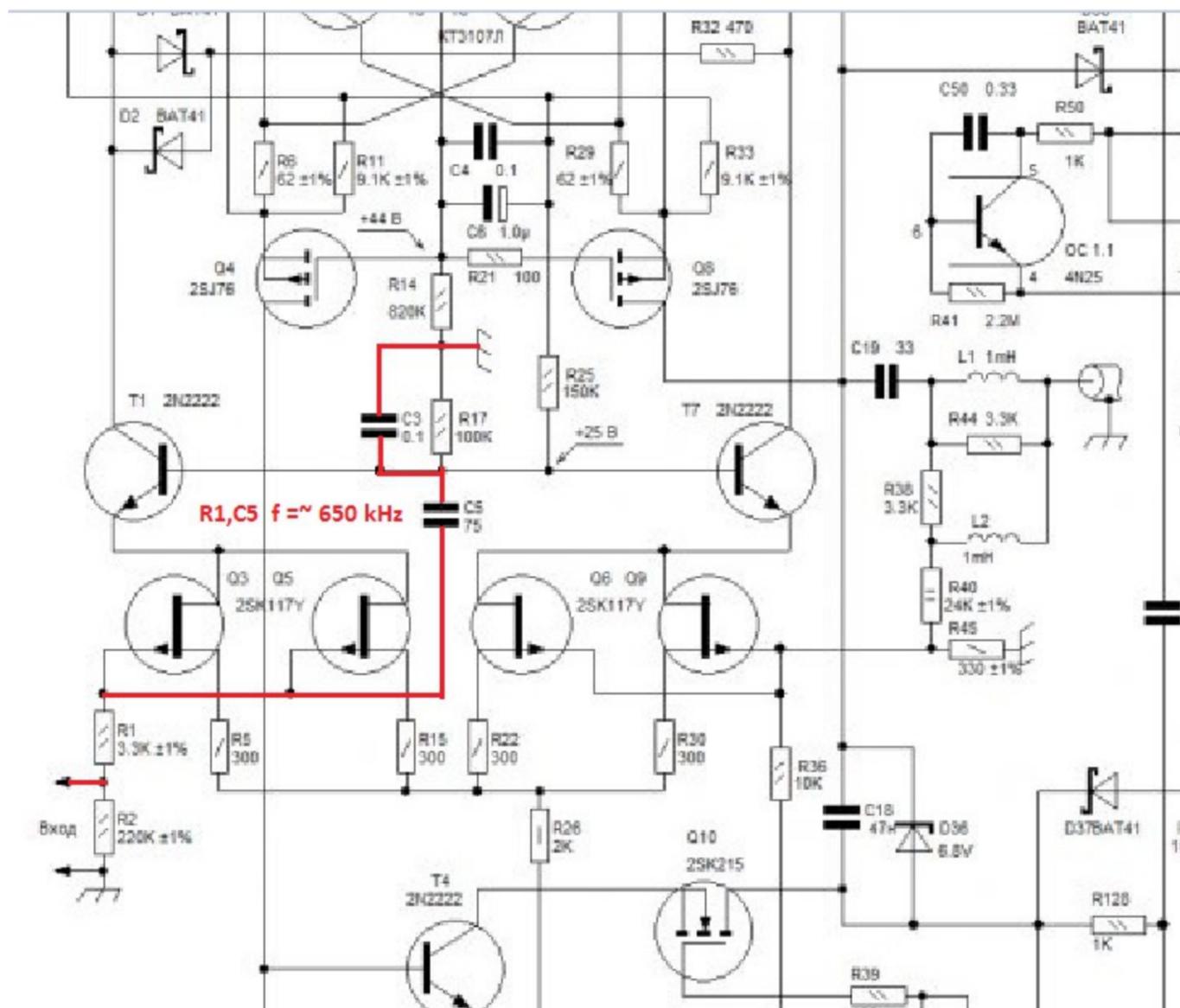


Рис. 1

<https://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=29546&p=1018346&viewfull=1#post1018346>

Попробовал уменьшить входную емкость C5 до 47 пФ. Результат: верх "открылся", стало слышно абсолютно все, но субъективно такой звук стал менее естественным, так как на большом количестве разнообразных звуков появилась некая высокочастотная "окантовка", которой, конечно же, нет у живого инструмента.

#### Примечание.

Исходно емкость C5 равна 75 пФ и частота среза входного фильтра R1C5 примерно 650 кГц против традиционного фильтра 1кОм, 1нФ с частотой среза 160 кГц.

Уменьшение емкости в 1,5 раза подняло частоту среза примерно до 1 МГц. Изменение звука говорит о тонком взаимодействии ГВЗ входного фильтра и ГВЗ самого усилителя. При выделении продуктов искажений компенсационным методом часто приходится ловить точное значение ГВЗ в пределах +-1 нс (а то и доли нс). В качестве эталона использую продукты искажений выделенные с помощью режекторного фильтра в установившемся режиме.

Теперь обратимся с тесту SWDT Д. Хафлера, для выполнения которого задержка прохождения сигнала на частоте 10 кГц должна быть равна 8 нс!

Для простых усилителей с однополюсной характеристикой (близкой к характеристике RC-цепи)

этому условию удовлетворяет полоса пропускания 20 МГц (что нереально выполнить в УМЗЧ) и фазовый сдвиг 0,03 градуса, рис. 2.

Если перевести фазовый сдвиг в проценты от 360 градусов то это составит те сотые и даже тысячные процента о которых говорит Федор Круль:  $(0,03/360)*100 = 0,0083\%$ .

Но это речь о допустимых фазовых искажениях в установившемся режиме, т. е. о допустимых линейных искажениях. Выполнение этого требования не срабатывает если имеет место рост ГВЗ за пределами звукового диапазона. Характерный пример усилитель Д.Хафлера Hafler XL-280 Excelinear.

Диаграмма Бодэ этого усилителя приведена на рис. 3

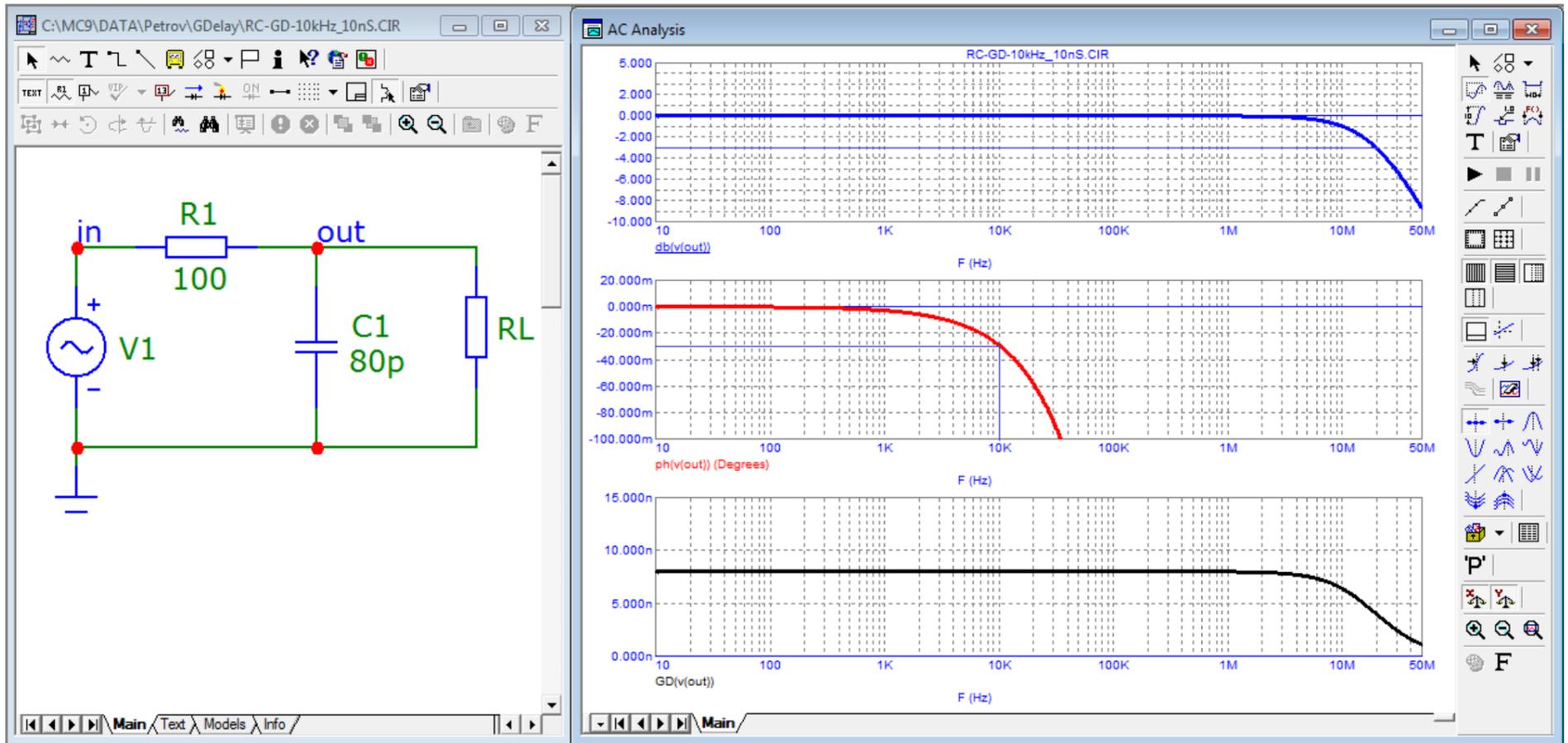


Рис. 2

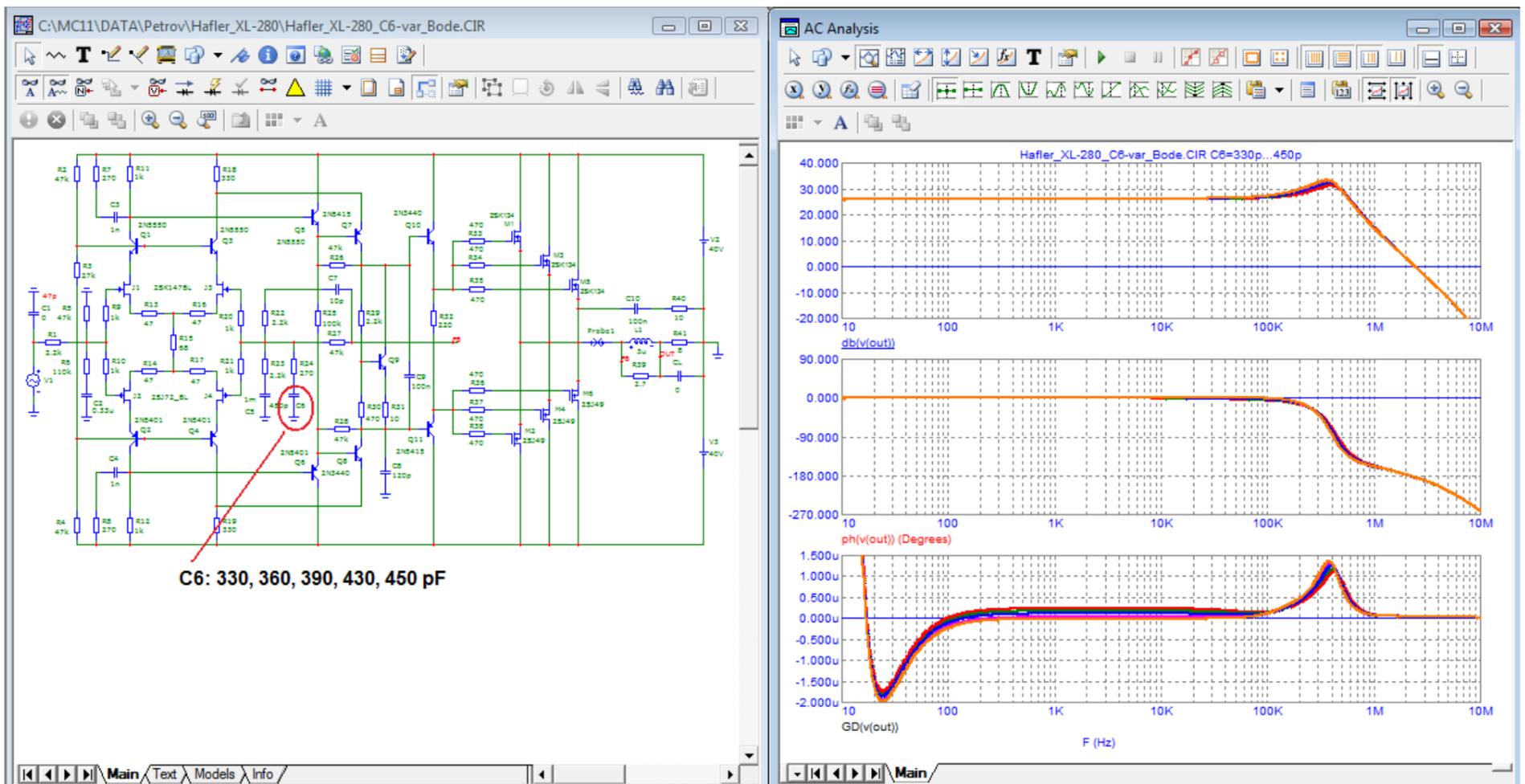


Рис. 3. Диаграмма Бодэ легендарного усилителя Д.Хафлера XL-280

Из диаграммы видно что можно получить регулируемое ГВЗ (примерно постоянного значения) почти во всем звуковом диапазоне в широких пределах, в том числе близкое к нулю и даже небольшое отрицательное значение. Однако подъем ГВЗ почти до 1,5 мкс выше 100 кГц сводит на нет эффект снижения векторных погрешностей до -60 дБ на стационарном сигнале, рис. 4.

Джон Керл (John Curl) в одной из веток на diyradio отметил что многие радиолюбители дорабатывали этот усилитель добиваясь реального улучшения качества его звучания. Очевидно доработка заключалась в устранении выброса ГВЗ.

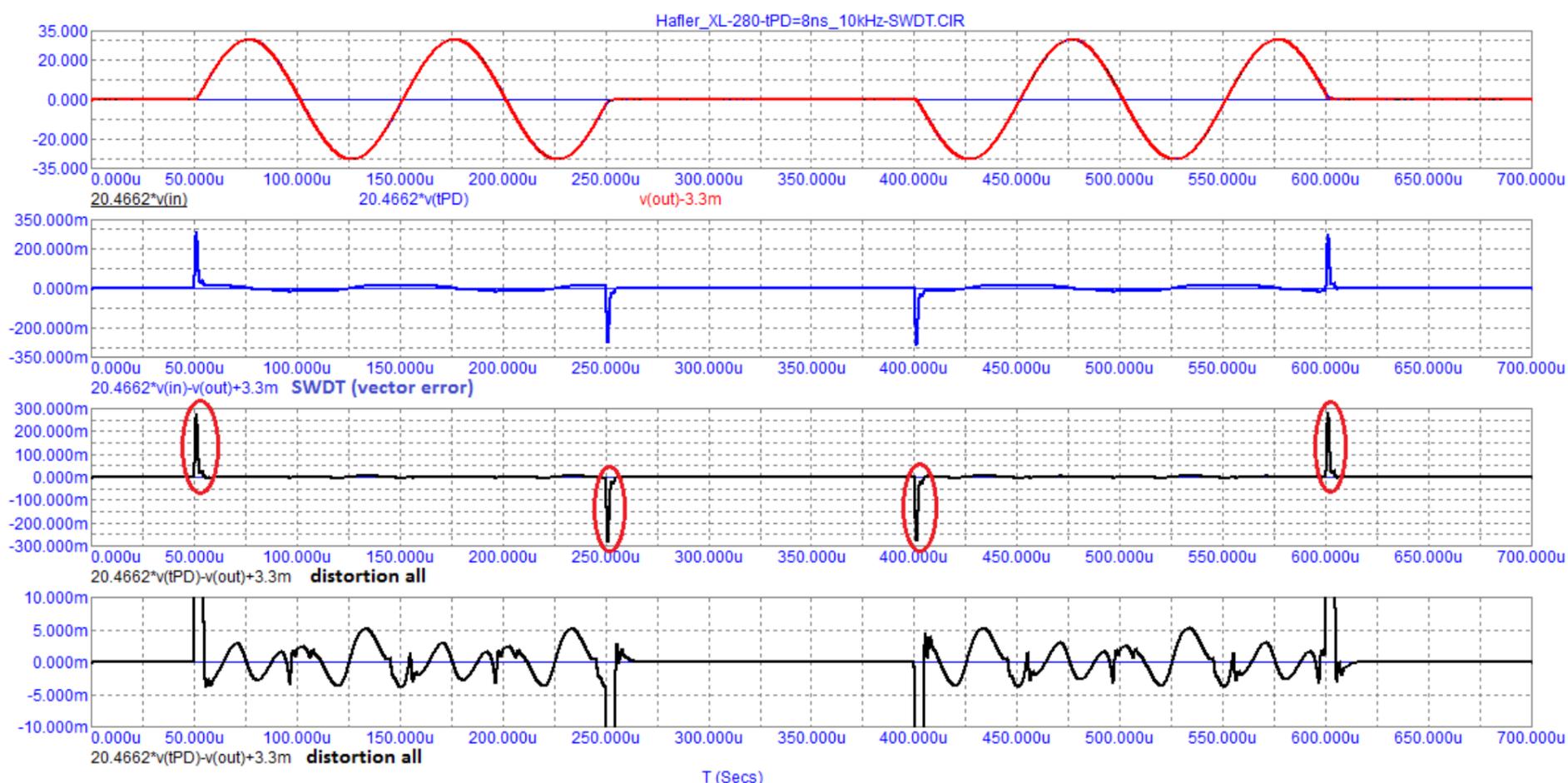


Рис. 4. Результат теста SWDT бурстами 10 кГц усилителя Д.Хафлера XL-280.

Мы видим что в установившемся режиме векторные погрешности (второй синий график) малы, а в начале и конце бурстов имеют место значительные всплески.

На третьем графике представлен результат компенсационного теста с использованием идеальной линии задержки. Из него видно что основной вклад в искажения вносят динамические продукты искажений в начале и конце бурстов.

Четвертый график — тот же третий, только в растянутом виде. Здесь можно увидеть не только гармонические составляющие, но и коммутационные искажения напротив переходов сигнала через ноль.

Сверим продукты искажений с эталоном полученным с помощью режекторного фильтра, рис. 5.

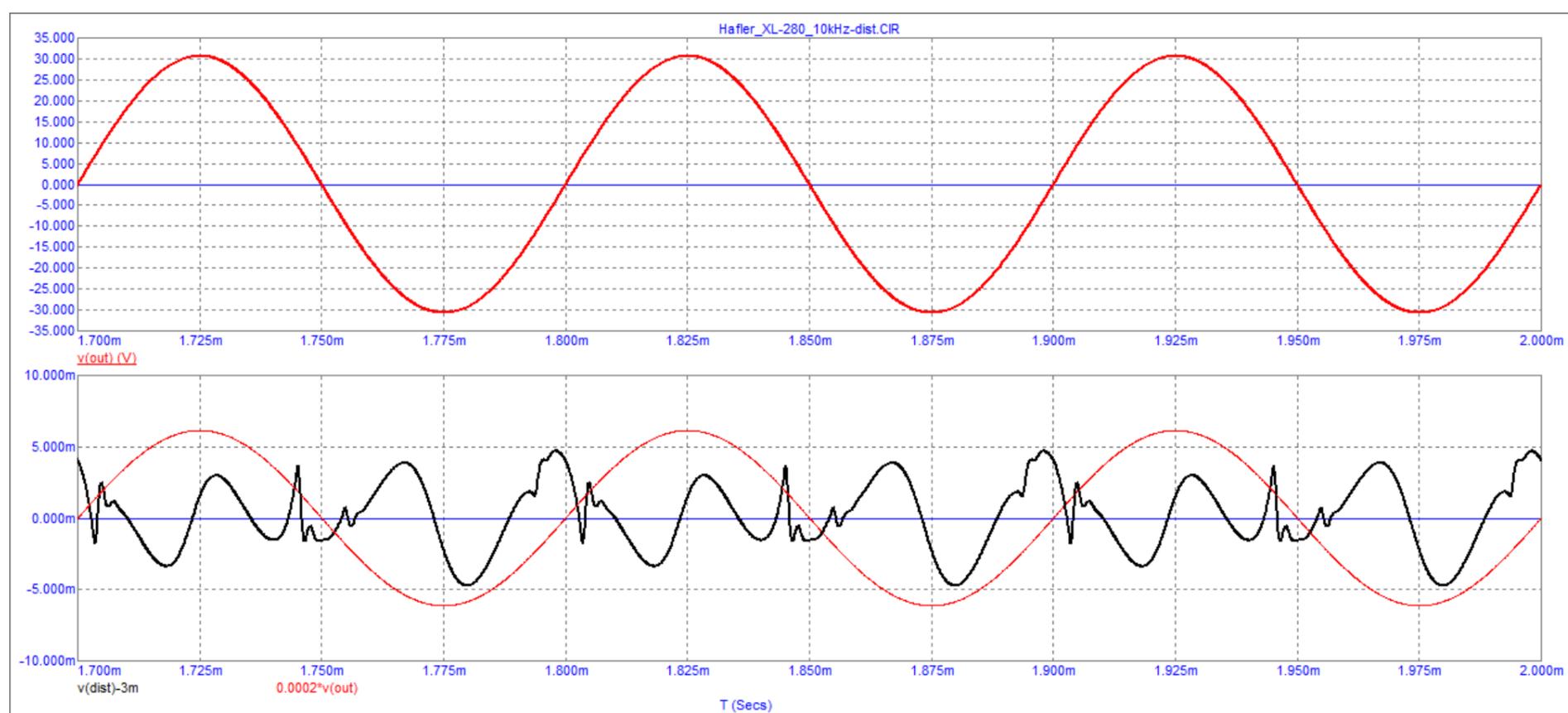


Рис. 5. Продукты искажений на частоте 10 кГц с выхода режекторного фильтра

Аналогичные всплески динамических искажений (как на рис. 4) можно увидеть и напротив вершин треугольного сигнала частотой 10 кГц.

Что касается композитных усилителей позволяющих получить высокое значение петлевого усиления (и соответственно низкие значения КНИ в установившемся режиме), то в них затруднительно получить низкое значение ГВЗ и его постоянное значение до нескольких сот кГц.

Положение усугубляется необходимостью применения индуктивности на выходе, которая существенно увеличивает ГВЗ и создает его спад сразу за звуковым диапазоном.

Например, в одной из последних разработок BB2021 фазовый сдвиг на частоте 20 кГц имеет 2,54 градуса, что в процентах составляет  $(2,54/360) \cdot 100 = 0,7\%$ , что в десятки раз превышает значение оговоренное Федором Крулем приведенное в начале.

Если говорить о ГВЗ, то на выходе модели оно равно 150 нс, а на нагрузке почти 400 нс вместо 8 нс требуемых для выполнения требования теста SWDT.

Следующие модификации VBB2022-160dB и VBB2022-180dB также неработоспособны без индуктивности на выходе. Но даже с минимальной индуктивностью 0,2 мкГн обеспечивающей работоспособность время задержки прохождения сигнала равно 200 нс.

В некоторых современных усилителях стали указывать такой параметр как ГВЗ.

Например, в спецификации усилителя GOLDMUND MIMESIS 9.2 указано:

### Group Delay

**Propagation Delay < 100 nS stable with frequency from DC to 200 kHz**

В качестве примера удачной, на мой взгляд, разработки приведу тест модели усилителя prophetmaster. Выходное сопротивление чисто активное (выходы ОУ развязаны от нагрузки резисторами 10 Ом), в индуктивности для стабилизации не нуждается. **ГВЗ равно 53 нс, постоянно от DC до 1 МГц**, рис. 6

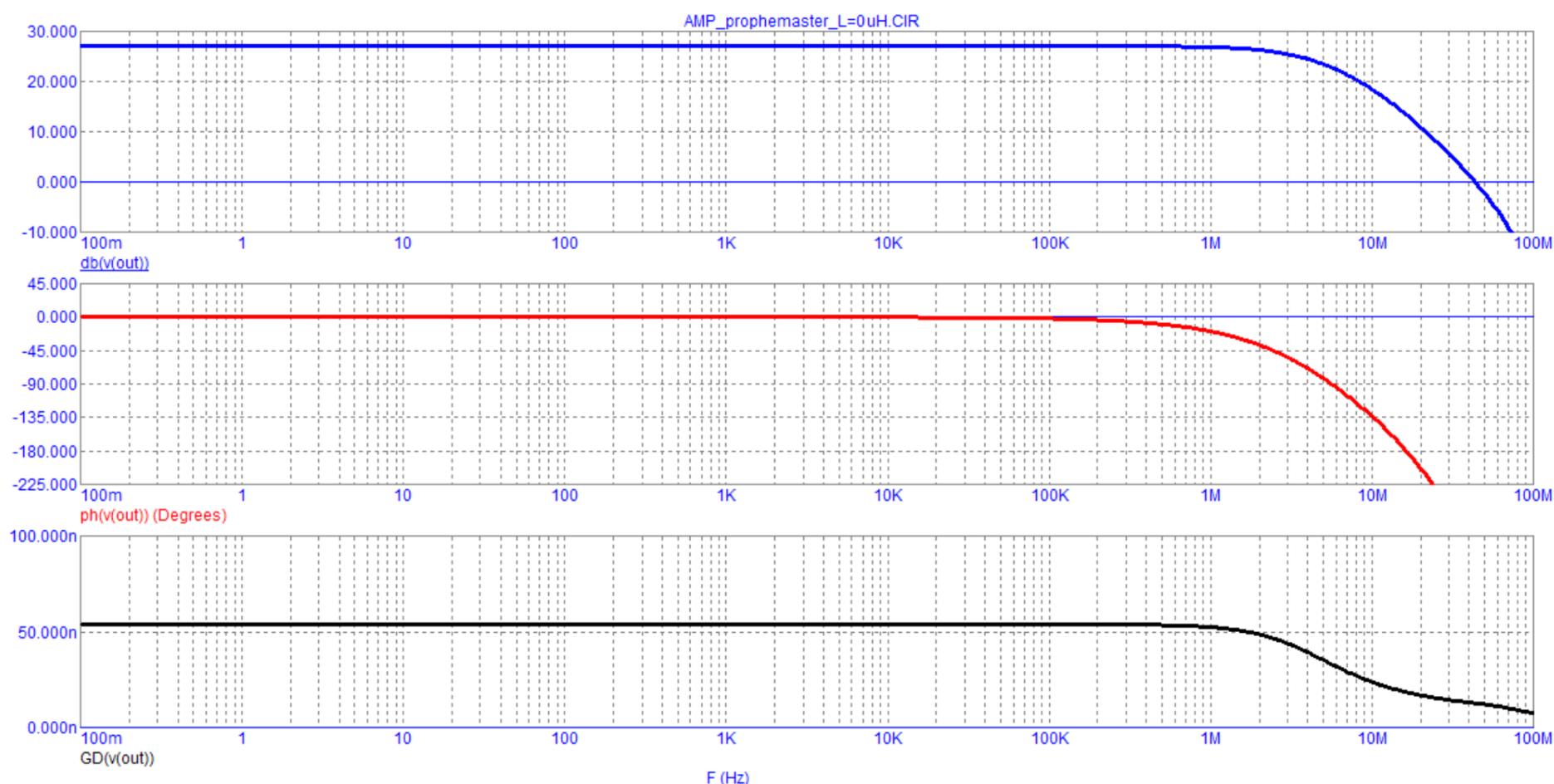


Рис. 6. Диаграмма Бодe усилителя prophetmaster

### Вывод.

Недостаточно получить ничтожно малые линейные искажения (сдвиг по фазе и изменение амплитуды) в звуковом диапазоне для стационарных синусоидальных сигналов (т. е. в установившемся режиме). Важно добиться не только малого значения ГВЗ (желательно не более 100 нс), но и его постоянства как минимум до нескольких сот кГц, лучше не менее чем до одного МГц.

Небольшой подъем ГВЗ (до 50 нс) допустим не ранее 1 МГц с последующим плавным спадом до нуля.

Индуктивность на выходе, при неизбежном применении, должна быть минимально необходимого значения. Иногда достаточно всего 0,1...0,2 мкГн. Часто необходимость в ней отпадает, так как погонная индуктивность провода диаметром 1 мм равна примерно 1 мкГн/м.

мысли вслух от

Александра Петрова