Результат моделирования одного из усилителей И.Акулиничева.

За основу взята схема усилителя из Радио 1980-03, рис. 1

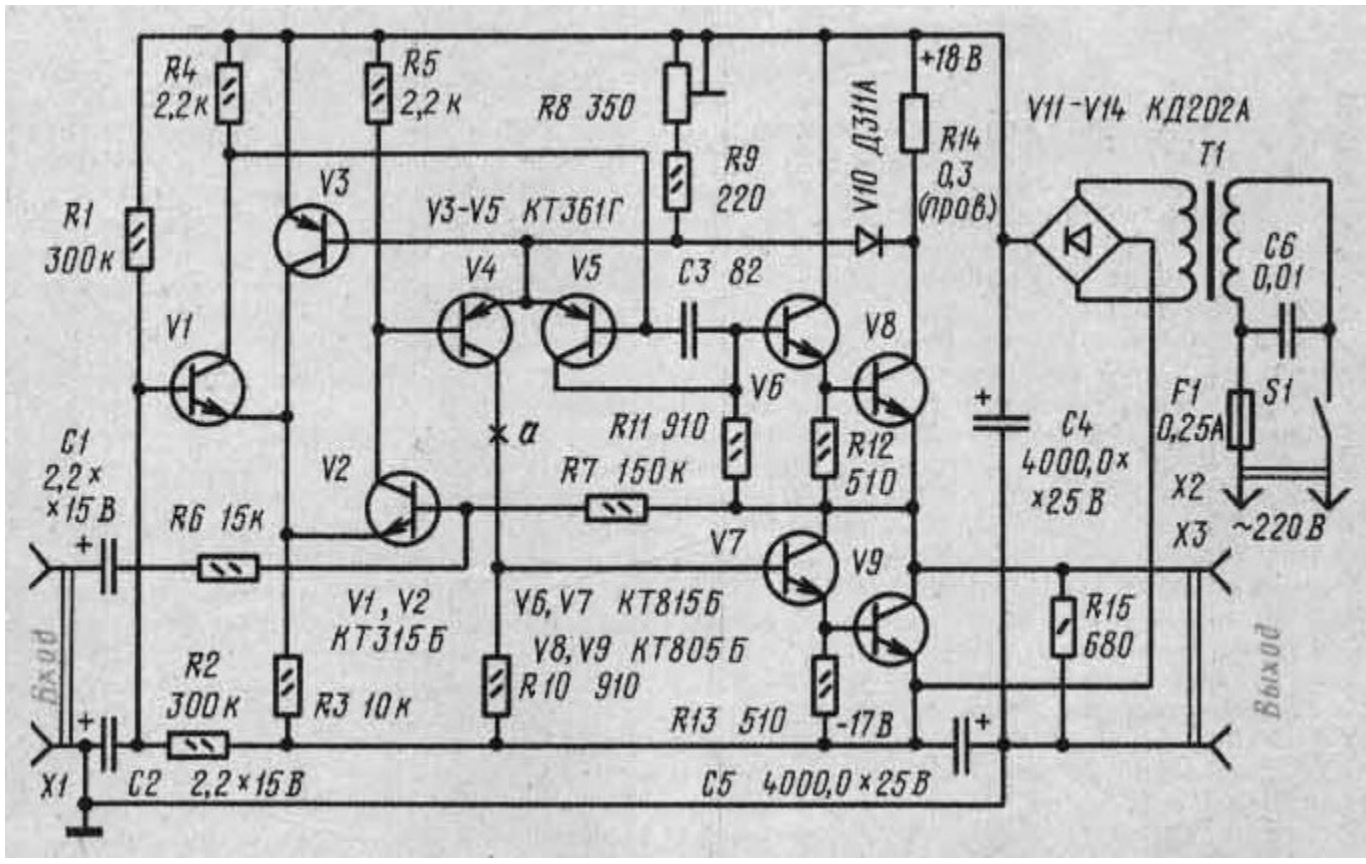
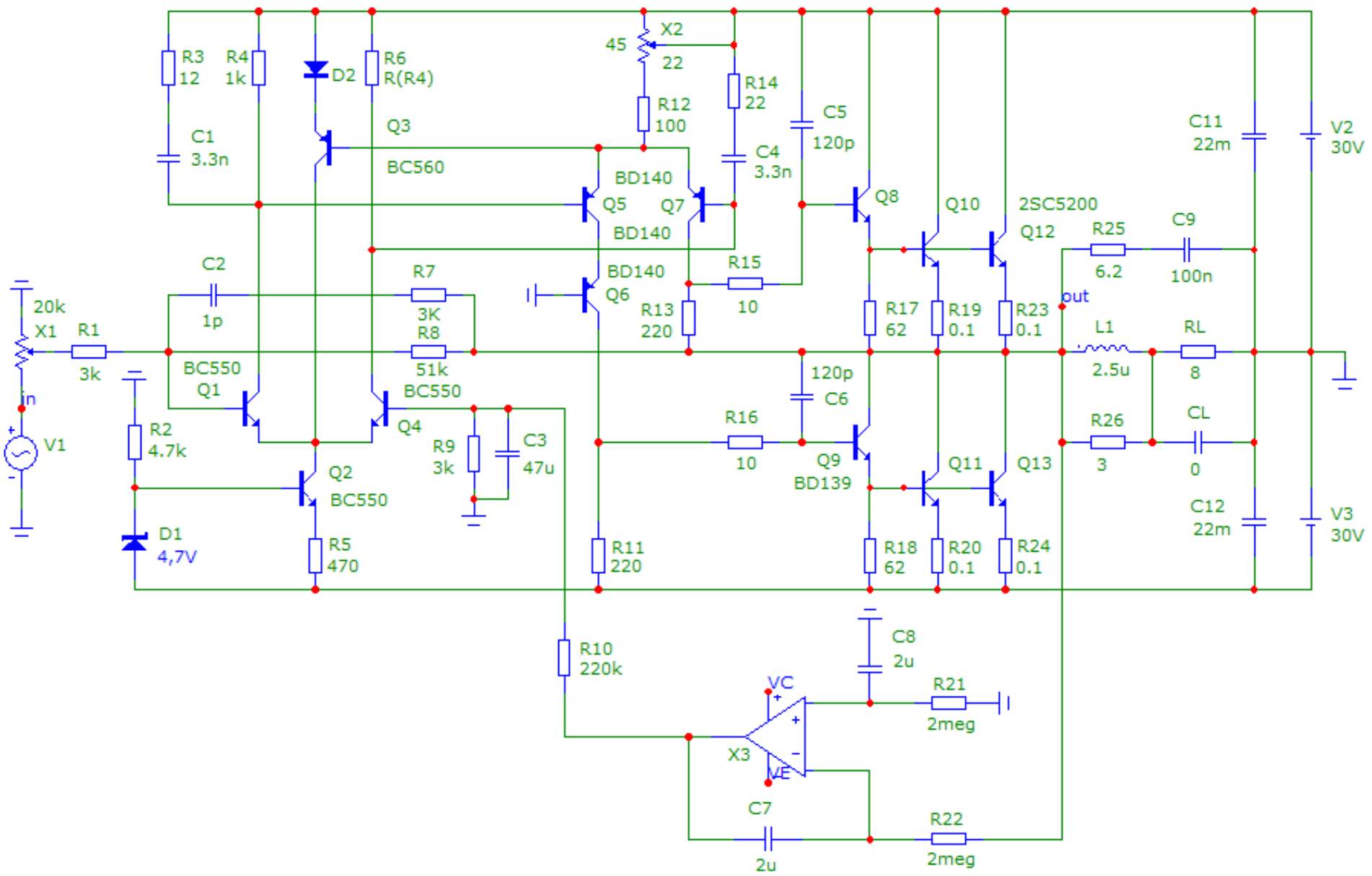


Рис. 1

Было принято решение отказаться от искусственной средней точки, поднять напряжение питания до +-(30...35) В, а для повышения нагрузочной способности использовать спаренные выходные транзисторы, рис. 2. Для поддержания нуля на выходе использован интегратор.



X1 (с линейной характеристикой) с нагрузкой 3 кОм (R1) превращается в логарифмический регулятор громкости
X2 - ток покоя (оптимальный ток одного транзистора 110 +-20 мА)

Рис. 2

В варианте с латералами в качестве выходных транзисторов дополнительная коррекция в виде конденсаторов С5, С6 не нужна. Входные емкости самих ПТ играют роль коррекции. В ВК на биполярных транзисторах эти емкости ставят в непосредственной близости БК-переходов транзисторов Q8, Q9.

Диаграмма Боде приведена на рис. 3

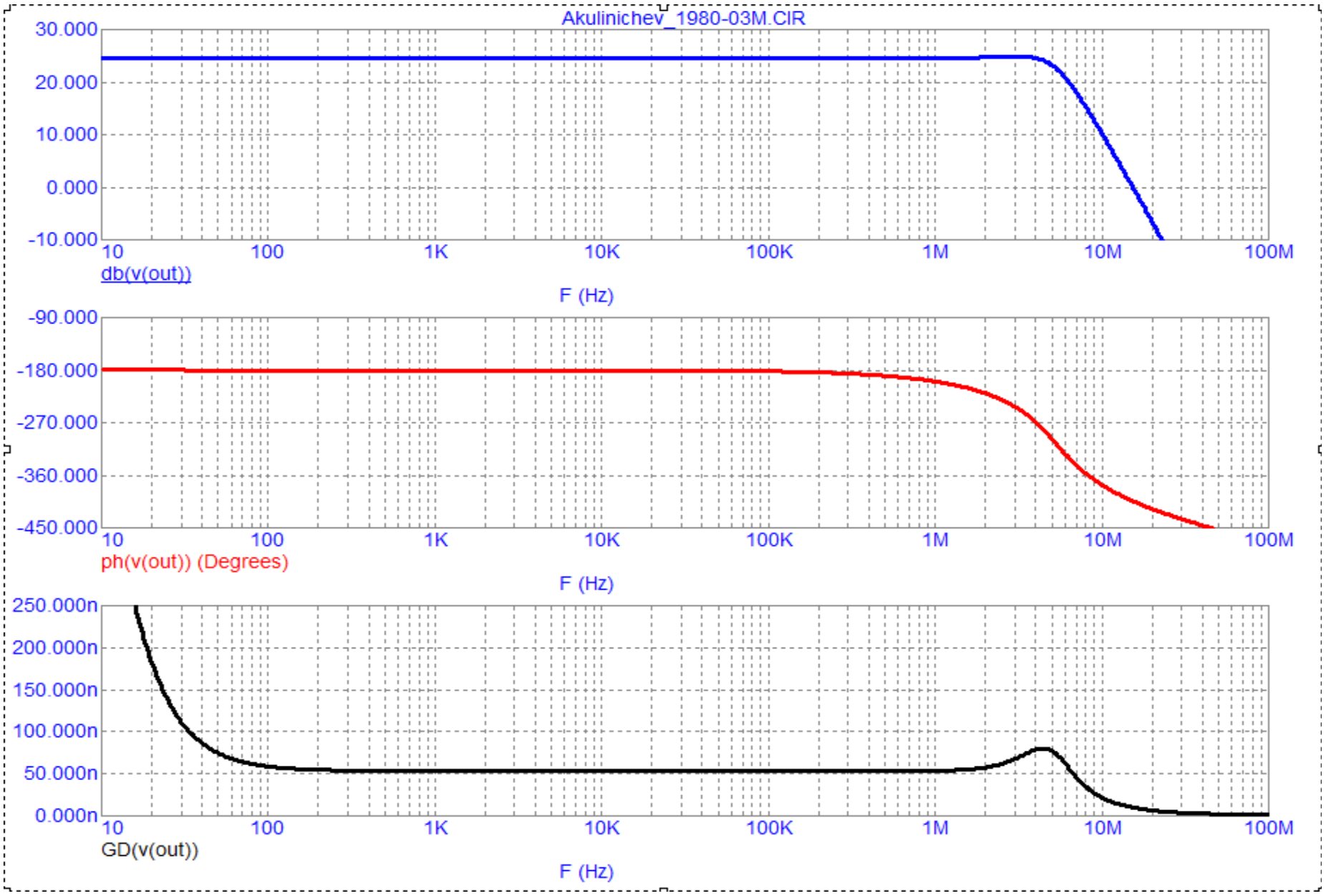


Рис. 3

Помимо АЧХ и ФЧХ на график выведен графикк ГВЗ играющего важную роль в работе усилителя и отвечающего за векторные искажения. Чем протяженнее горизонтальный участок ГВЗ без существенных «выбросов», тем лучше. Значение ГВЗ на горизонтальном участке совпадает с временем задержки прохождения сигнала и равно 53 нс. Как показывают расчеты чтобы векторные искажения были ниже порога заметности время задержки прохождения сигнала не должно превышать 80...100 нс.

Важной характеристикой отвечающей за устойчивость усилителя и глубину ООС является характеристика петлевого усиления, рис. 4

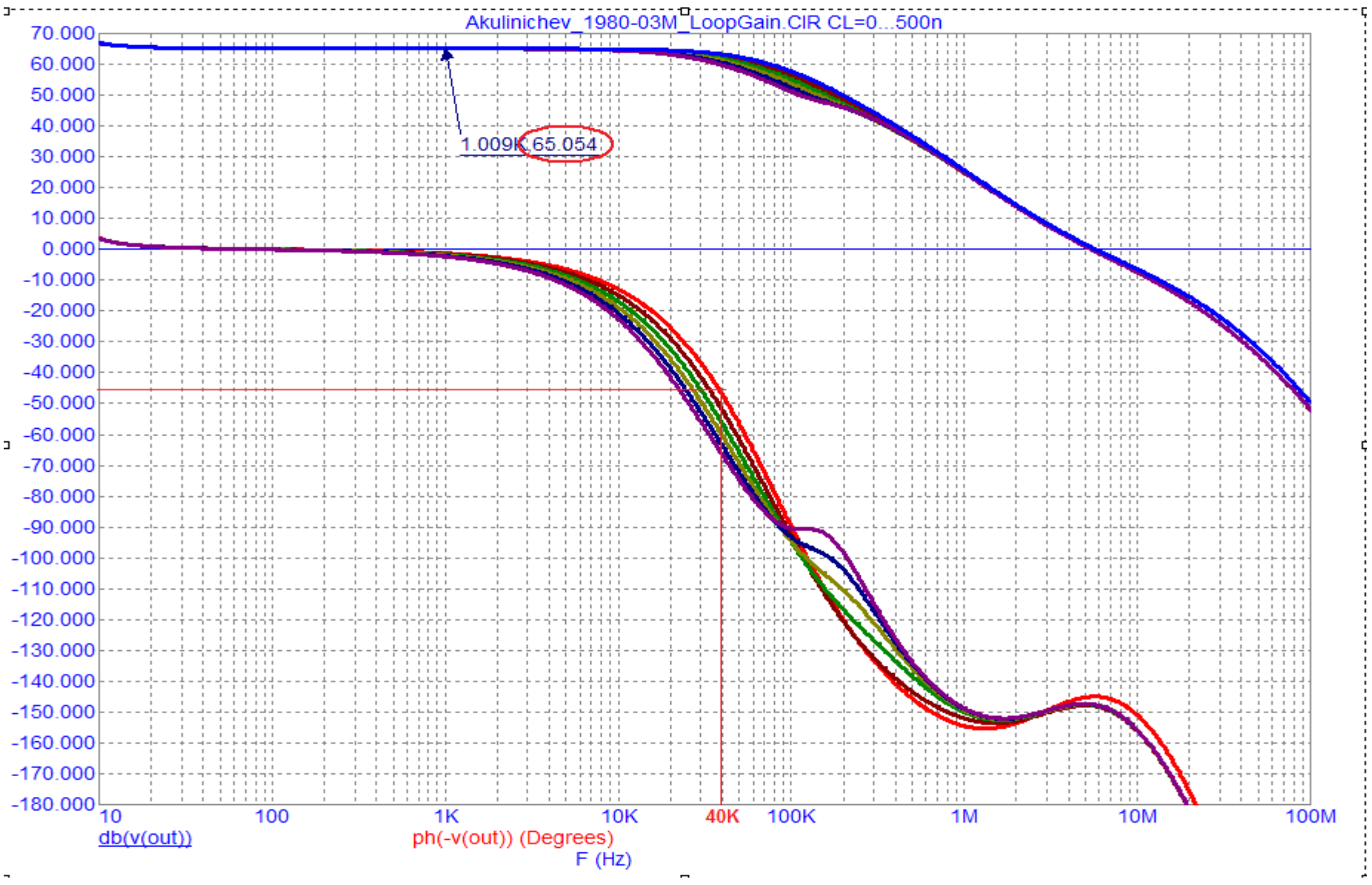


Рис. 4

Из рисунка 4 видно что частота первого полюса равна 40 кГц. Благодаря этому петлевое усиление во всей звуковой полосе постоянно и равно 65 дБ. Чтобы не делать лишние тесты график петлевого снят с реактивной нагрузкой в виде конденсатора емкостью от нуля до 500 нФ с шагом 100 нФ. Как показывает практика наиболее критичной реактивной нагрузкой является емкость 100 нФ.

Один из способов проверки влияния индуктивности на работу усилителя испытание сигналом типа меандр, рис. 5

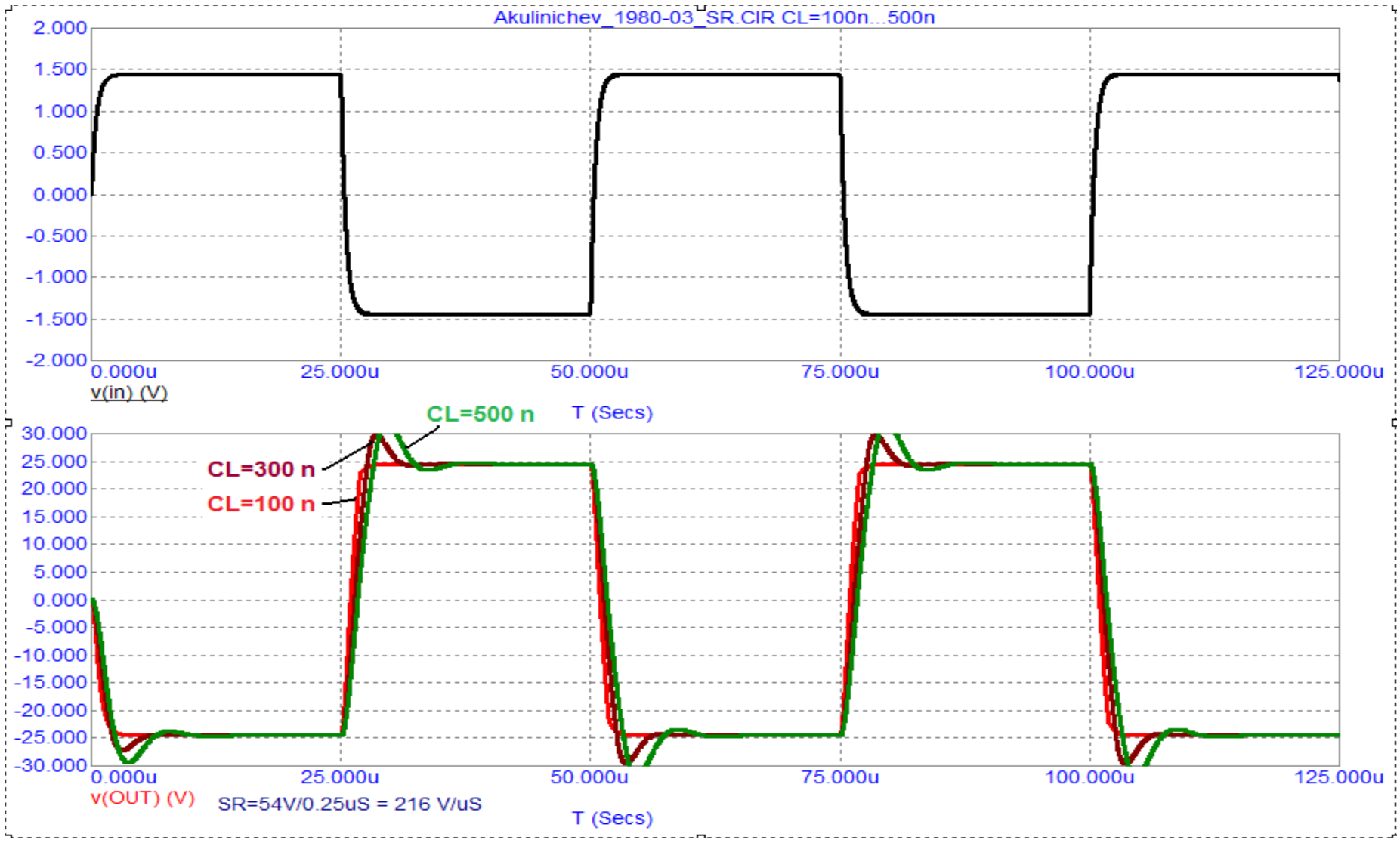


Рис. 5

Входной сигнал предварительно пропущен через фильтр НЧ с частотой среза 320 кГц. Из осциллограмм видно что нагрузка емкостью 100 нФ (красная) не оказывает существенного влияния на выходное напряжение.

До недавних пор придавали большое значение уровню нелинейных искажений. Чаще всего ограничивались измерением Кг на частоте 1 кГц не обращая внимания на спектр гармоник. Снимем Кг на частоте 20 кГц и посмотрим спектр, рис. 6

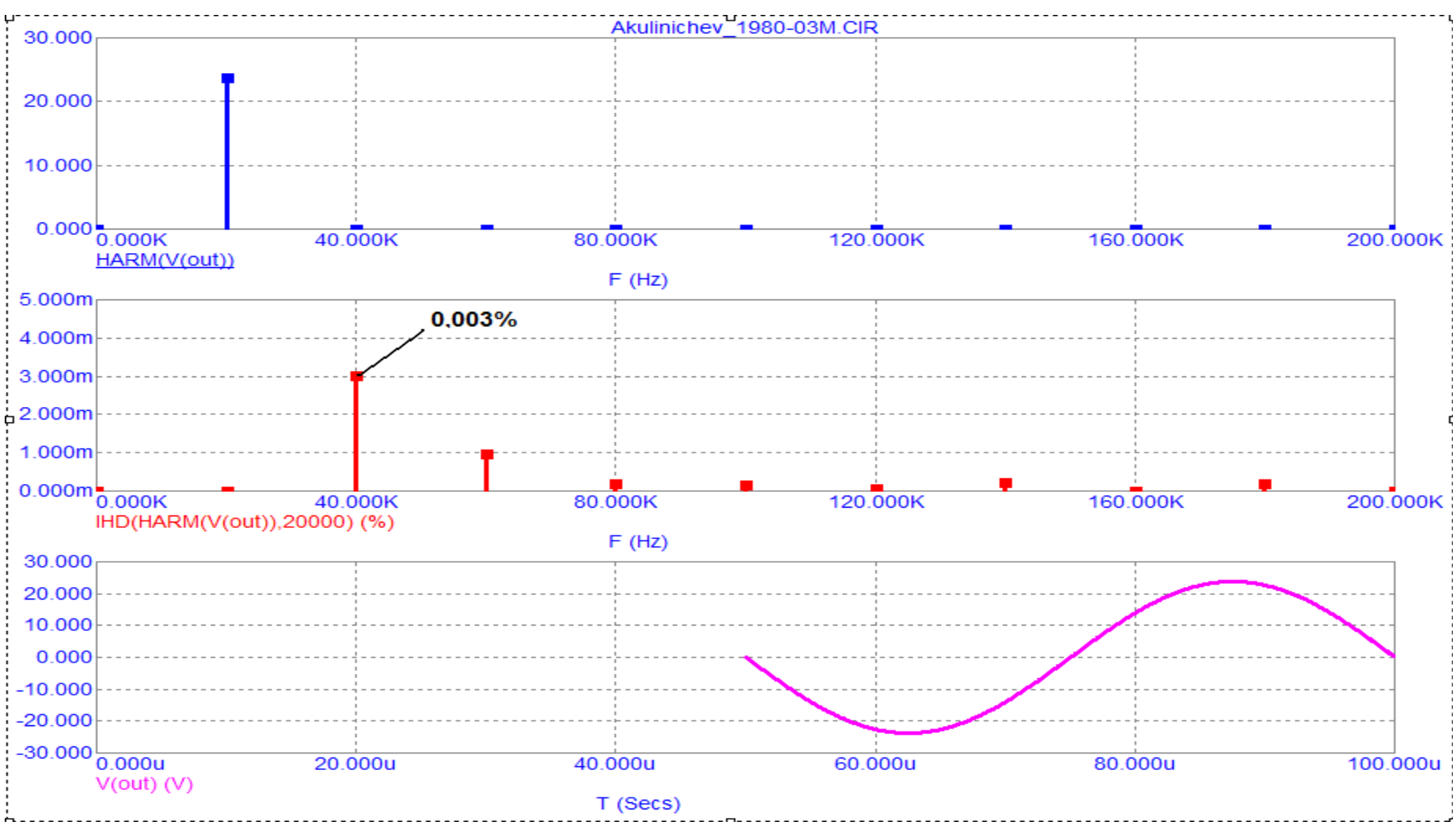


Рис. 6

В усилителях с разделительным конденсатором на входе и с конденсатором на общий последовательно с резистором ОС, а также в большинстве усилителей УПТ с системой сервоконтроля происходят переходные процессы мешающие измерить нелинейные искажения на первых периодах низкочастотных сигналов. В версиях микрокапа начиная с 10-й дополнительно введен режим Periodic Steady State, который автоматически определяет конец переходного процесса и полное выполнение условий Дирихле. Мы ведь понимаем что любые переходные искажения также негативно сказывается на качестве звука, и то что переходной процесс закончится на 100-м периоде и начиная с него будут малые искажения и на частоте 20 Гц лично меня мало утешает. Поэтому проверим THD и на частоте 20 Гц точно также как и на частоте 20 кГц, т. е. на втором периоде, рис. 7

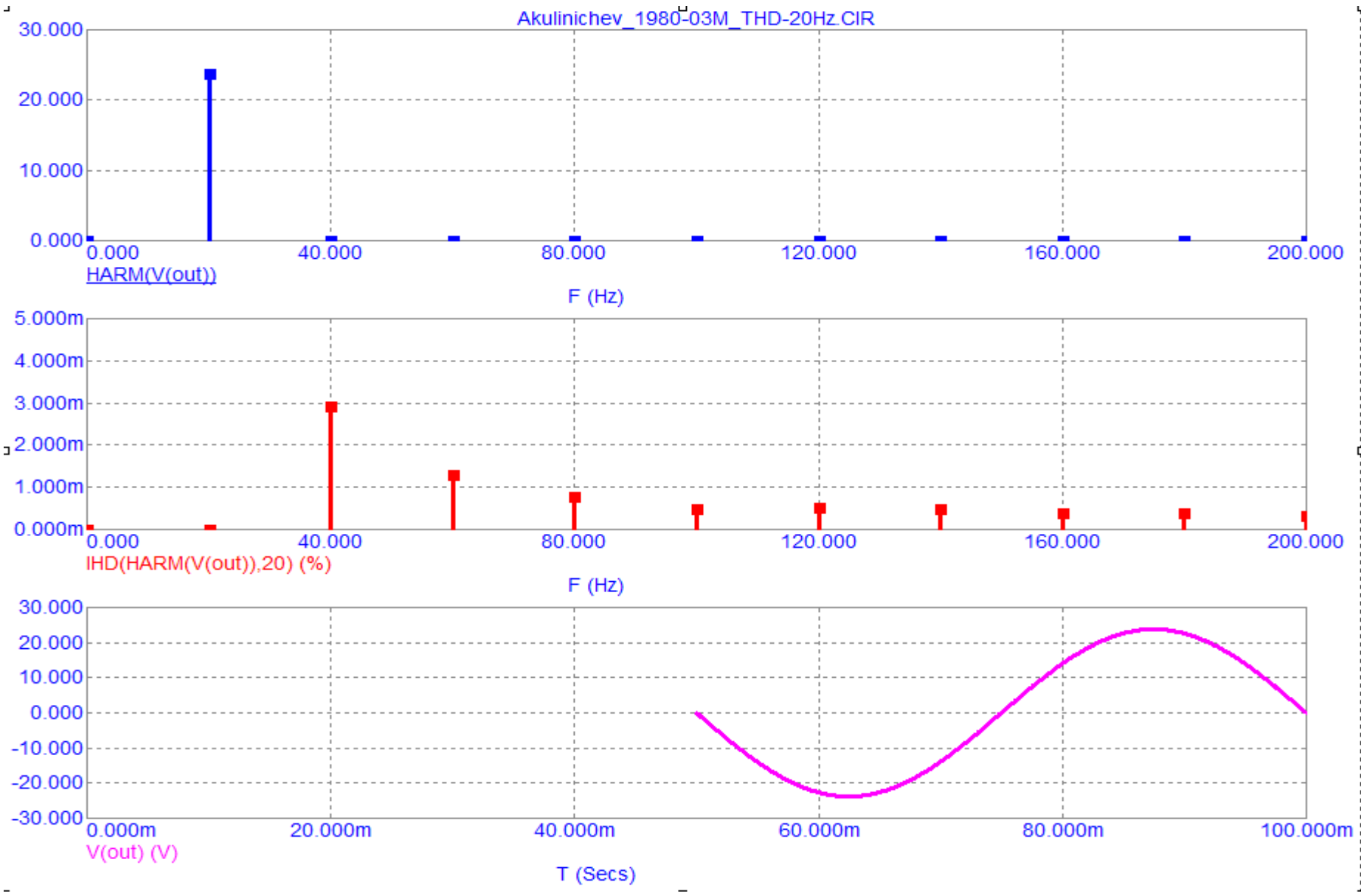


Рис. 7

Как видно из рис. 7 система сервоконтроля не вносит переходных процессов и спектры искажений благодаря постоянству петлевого усиления во всем звуковом диапазоне как близнецы.

Снимем зависимость Кг от частоты. Результат просчета показан на рис. 8

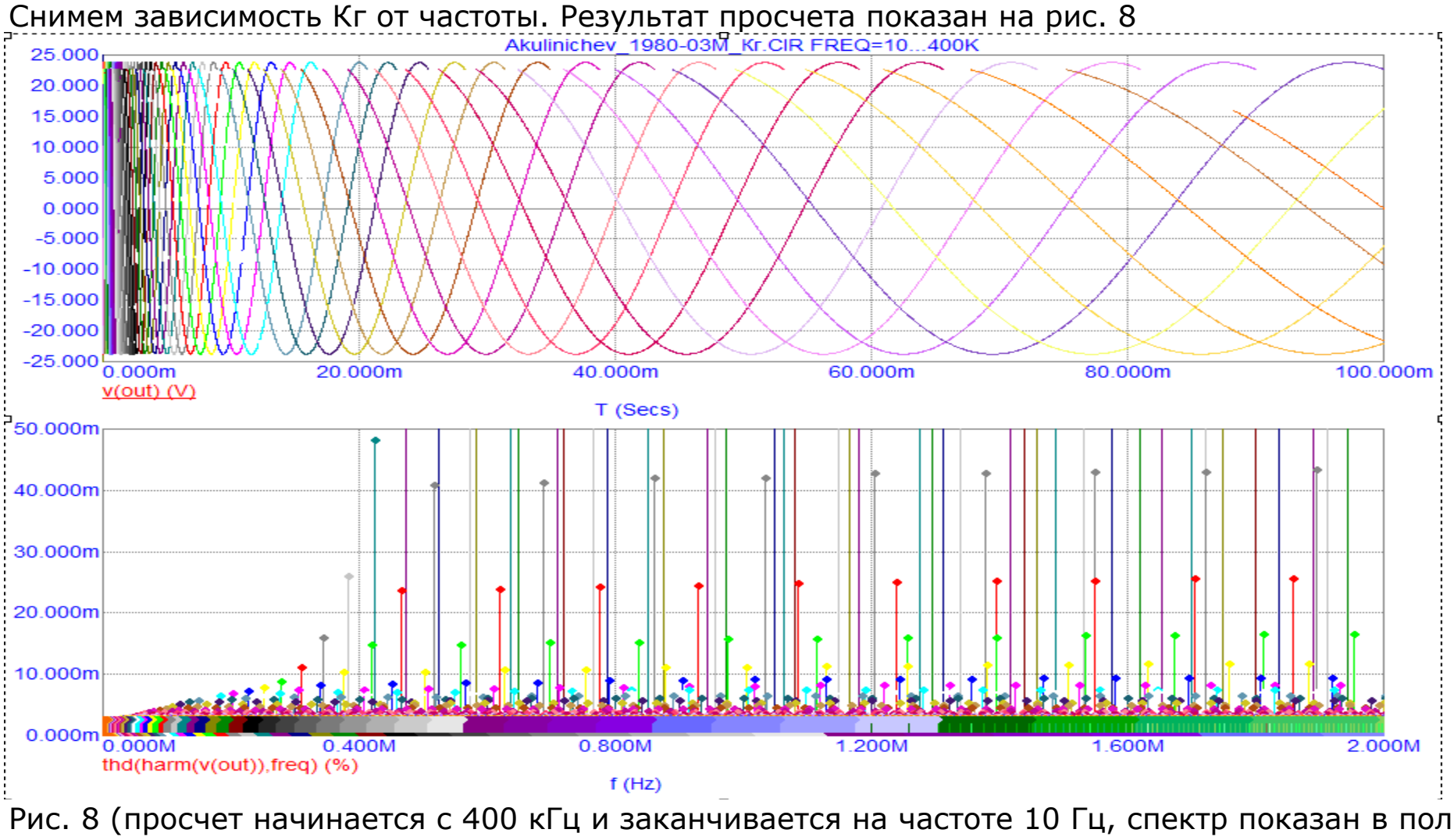


Рис. 8 (просчет начинается с 400 кГц и заканчивается на частоте 10 Гц, спектр показан в полосе до 2 МГц)

Нас интересует спектр гармоник в полосе до 80 кГц — это начальный участок, он чист. График зависимости Кг от частоты показан на рис. 9

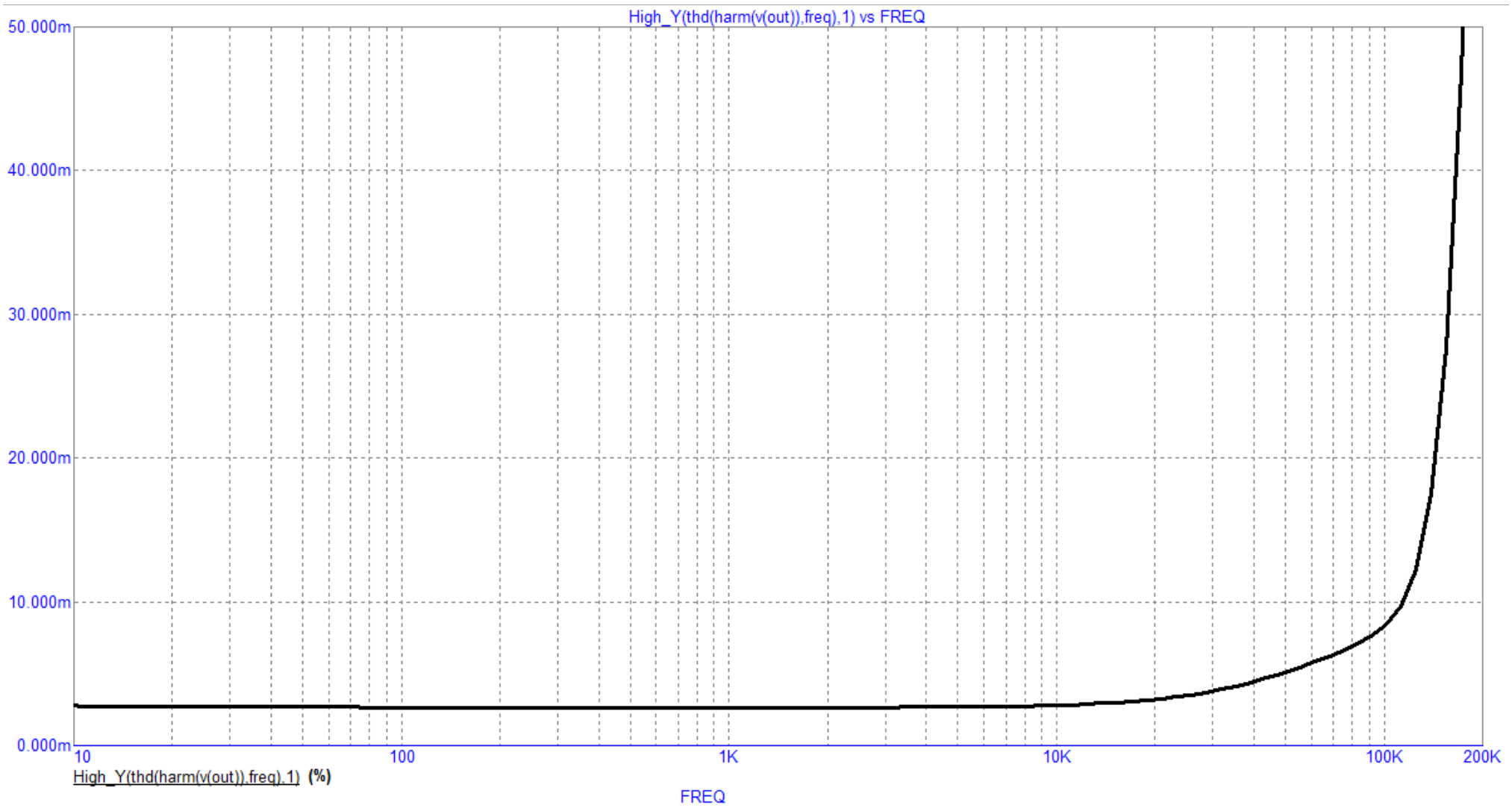


Рис. 9

Из рисунка 9 видно что Кг во всем звуковом диапазоне равен 0,003% при номинальной выходной мощности. Заметный рост Кг начинается выше 100 кГц. В подавляющем большинстве усилителей первый полюс редко когда выше 1 кГц, с него и начинается спад петлевого усиления, соответственно и рост Кг (см. примеры в книге Дугласа Селфа).

Бич усилителей класса АВ коммутационные искажения. Основной способ исключения подобного рода искажений использование выходного каскада в классе А. Тем не менее усилители И.Акулиничева благодаря высокому быстродействию и широкополосности были мало подвержены этому дефекту. Проверим эту версию усилителя на коммутационные искажения, рис. 10

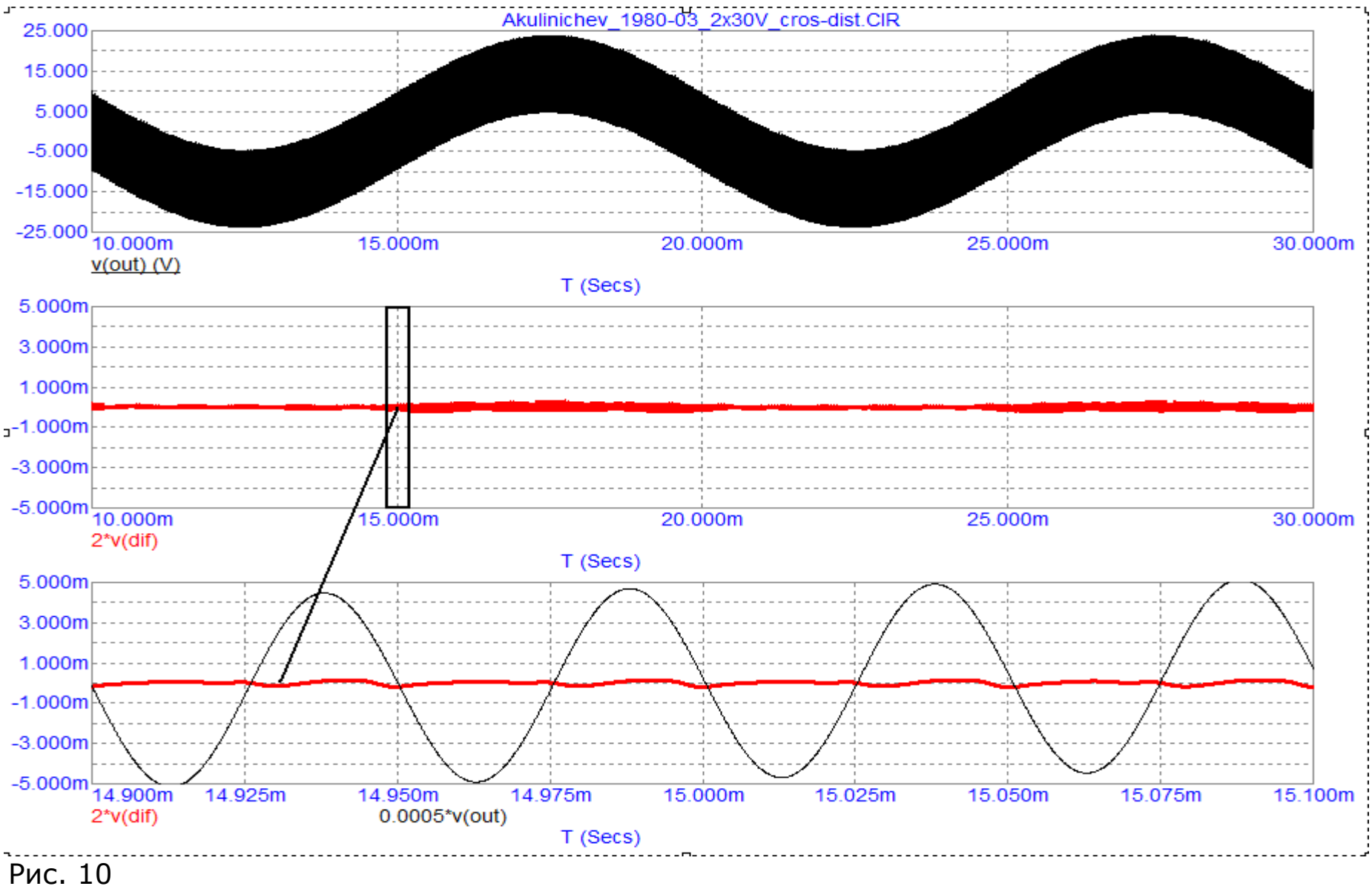


Рис. 10

На вход усилителя подается смесь 2-х сигналов 100 Гц и 20 кГц в соотношении 3:2. С помощью

специального режекторного фильтра высокого порядка выделяются продукты искажений выше 20 кГц. Таким образом все продукты искажений оказываются на выходе фильтра ослабленными в 2 раза. Для восстановления их уровня при анализе использован множитель 2. Из рисунка видно что коммутационных искажений нет как таковых.

Результат измерения на интермодуляционные искажения представлен на рис. 11.

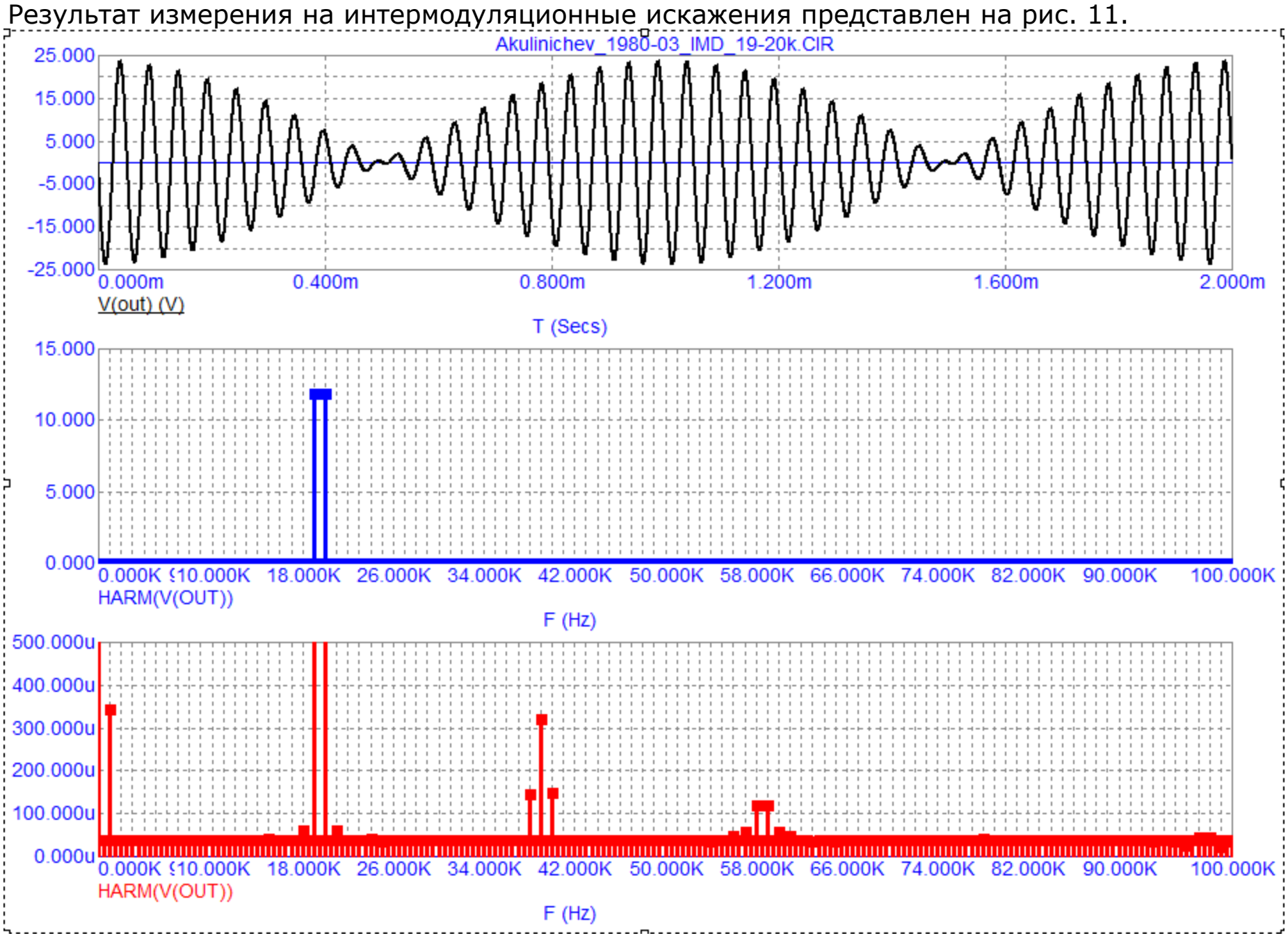


Рис. 11

Из рисунка 11 видно что ИМИ первого порядка (1 кГц) составляют всего 0,35 мВ. Шумовая подставка в полосе до 100 кГц ничтожно мала, всего 30 мкВ.

Помимо измерений ИМИ традиционным способом существует метод измерения ИМИ методом обратной интермодуляции (RIMD) предложенный Хирагой, рис. 12.

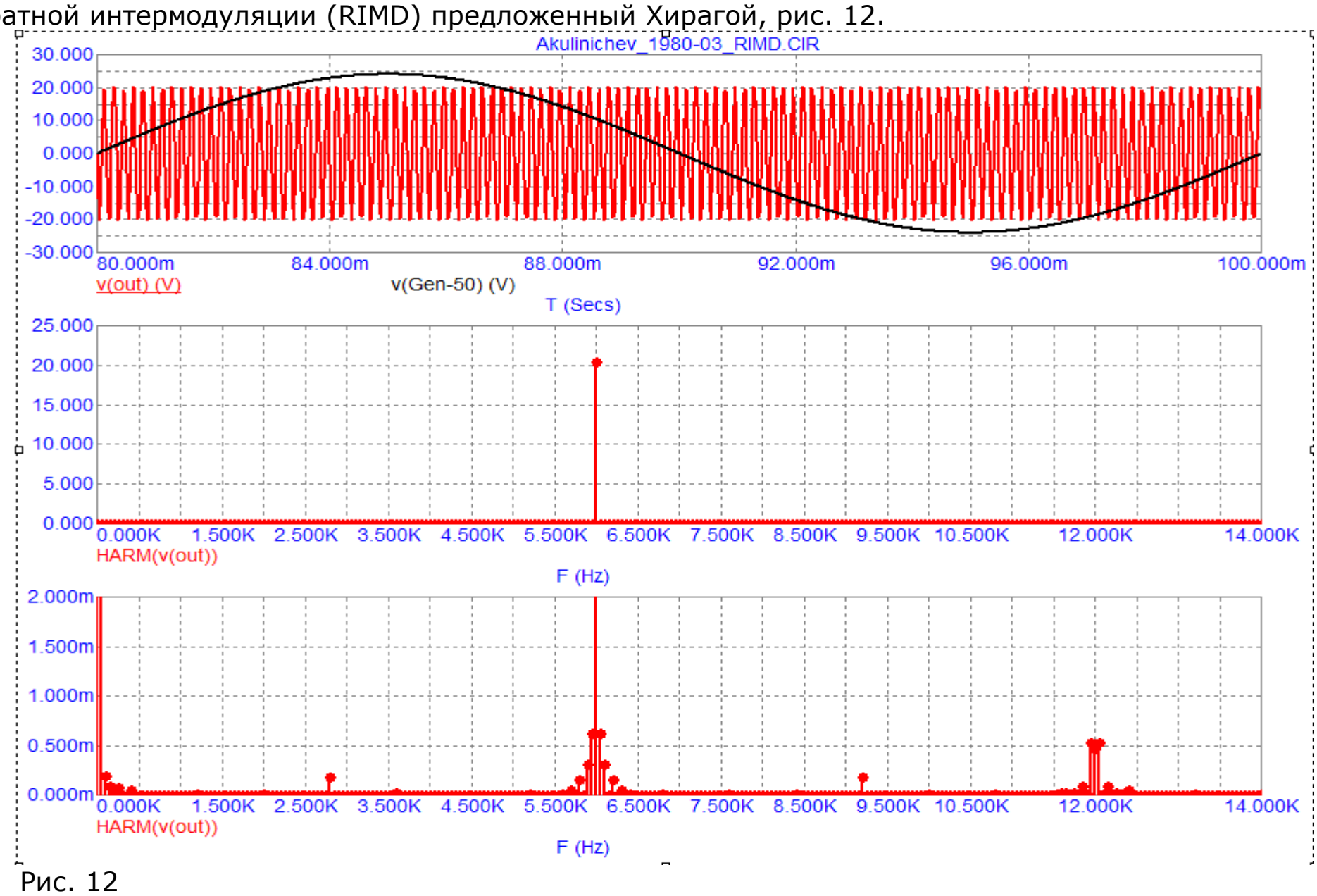


Рис. 12

В этом тесте на вход усилителя подают сигнал частотой 6 кГц, а на выход через резистор сопротивлением 4 Ома и фильтр-пробку на 6 кГц подают сигнал частотой 50 Гц. Сигнал частотой 50 Гц имитирует обратную ЭДС, а продукты искажений на выходе говорят о подверженности усилителя внешнему воздействию.

На следующем рисунке представлен результат теста из статьи Хираги «The Many faces of distortion_Glass_Audio_2005_05»

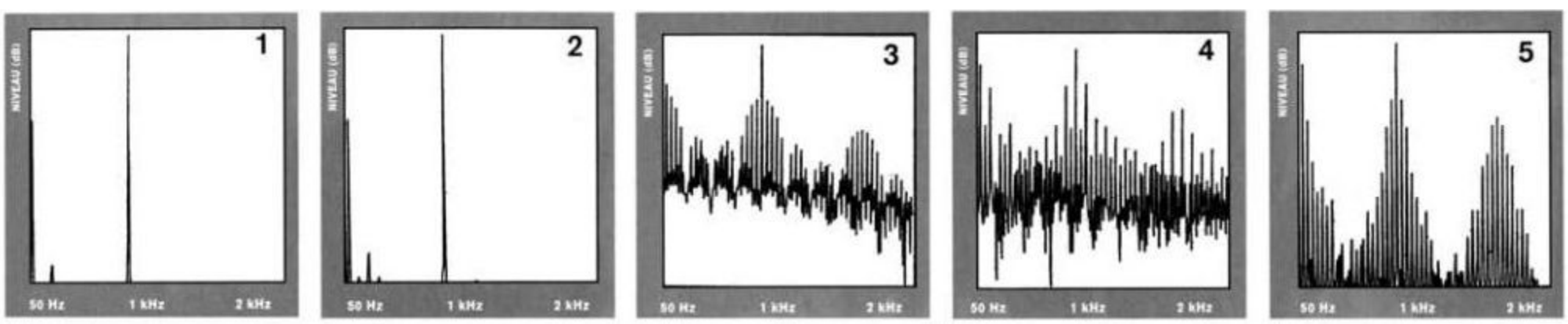


РИСУНОК 3: Сравнительный спектральный анализ усилителей, подвергнутых временным искажениям IIM в условиях нагрузки, показанных на рис. 2.
a. Кривая l: оригинальный композитный сигнал с двумя компонентами на частоте 50 Гц и 1 кГц
б. Кривая 2: выходной сигнал усилителя, демонстрирующий очень хорошие характеристики в этом тесте;
c. Кривая 3: выходной сигнал усилителя с отличными результатами классического теста на гармонические и IM-искажения (менее 0,008% при половинной мощности в большей части звукового диапазона), но демонстрирующий сильную нестабильность в этом тесте, что может быть причиной его " необъяснимого "неприятного звука";
д. Кривая 4: выходной сигнал того же усилителя, что и на кривой 3, но с более высокой мощностью. Мы видим, что природа нестабильностей увеличилась и изменилась, предсказывая нестабильное поведение на других уровнях мощности и частотах;
е. Кривая 5: ламповый усилитель с низкой обратной связью с выделенными гармониками и субгармониками двух тестовых сигналов.

При исследованиях параметров не придают особого значения выходному сопротивлению усилителя. Чаще всего ограничиваются формальным измерением демпинг-фактора не обращая внимания ни на фазу выходного сопротивления ни на искажения формы выходного сопротивления. Подавляющее большинство усилителей с ООС с первым полюсом ниже 100 Гц имеют сдвиг фазы петлевого усиления, соответственно и выходного сопротивления на 90 градусов. А как известно это ведет к амплитудно-фазовой конверсии в результате которой динамический диапазон на реальном музыкальном сигнале сужается на 20...30 дБ.

Проверим выходное сопротивление усилителя на крайних частотах звукового диапазона, рис. 13 и 14.

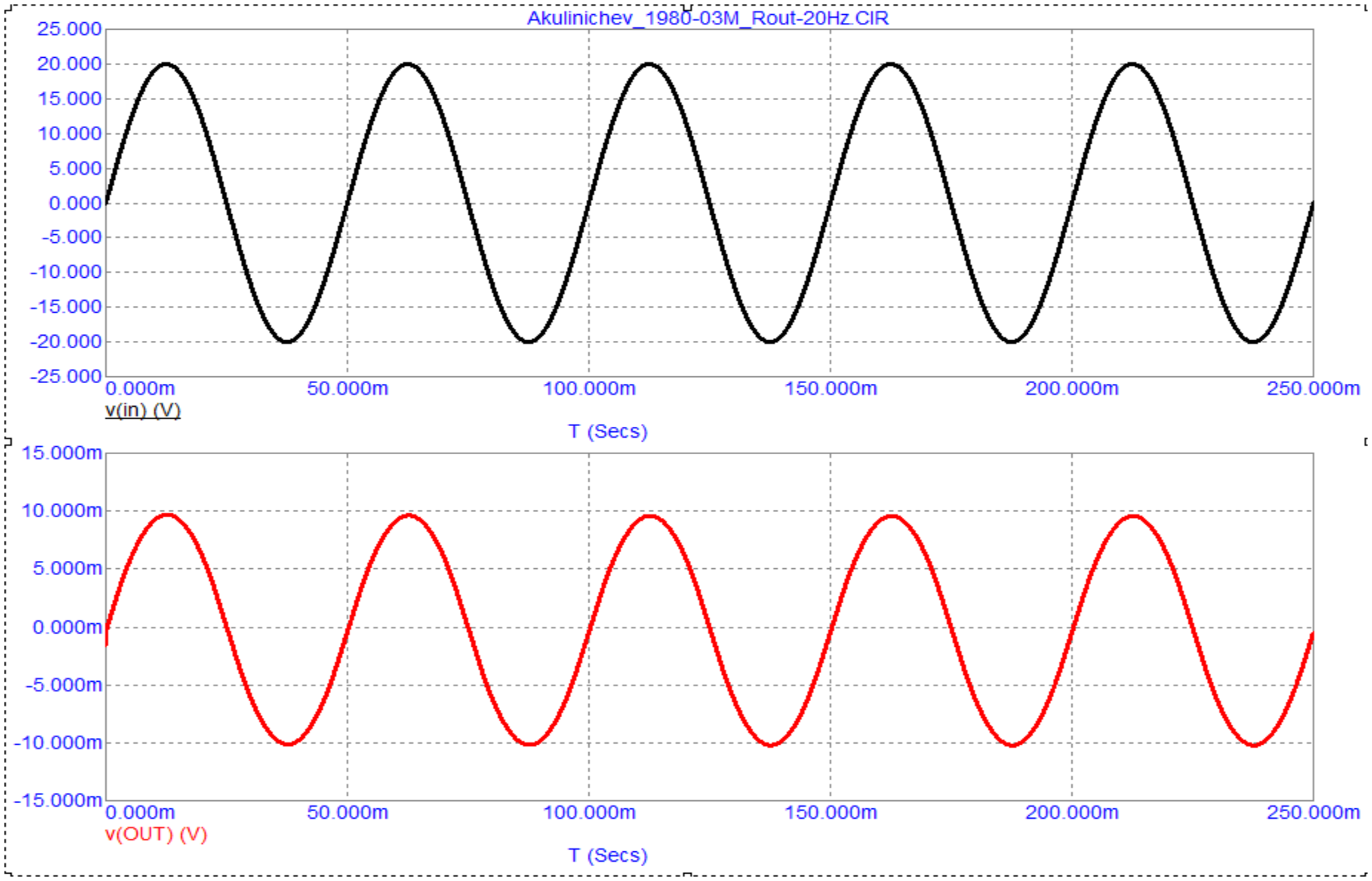


Рис. 13 (результат измерения выходного сопротивления на частоте 20 Гц)

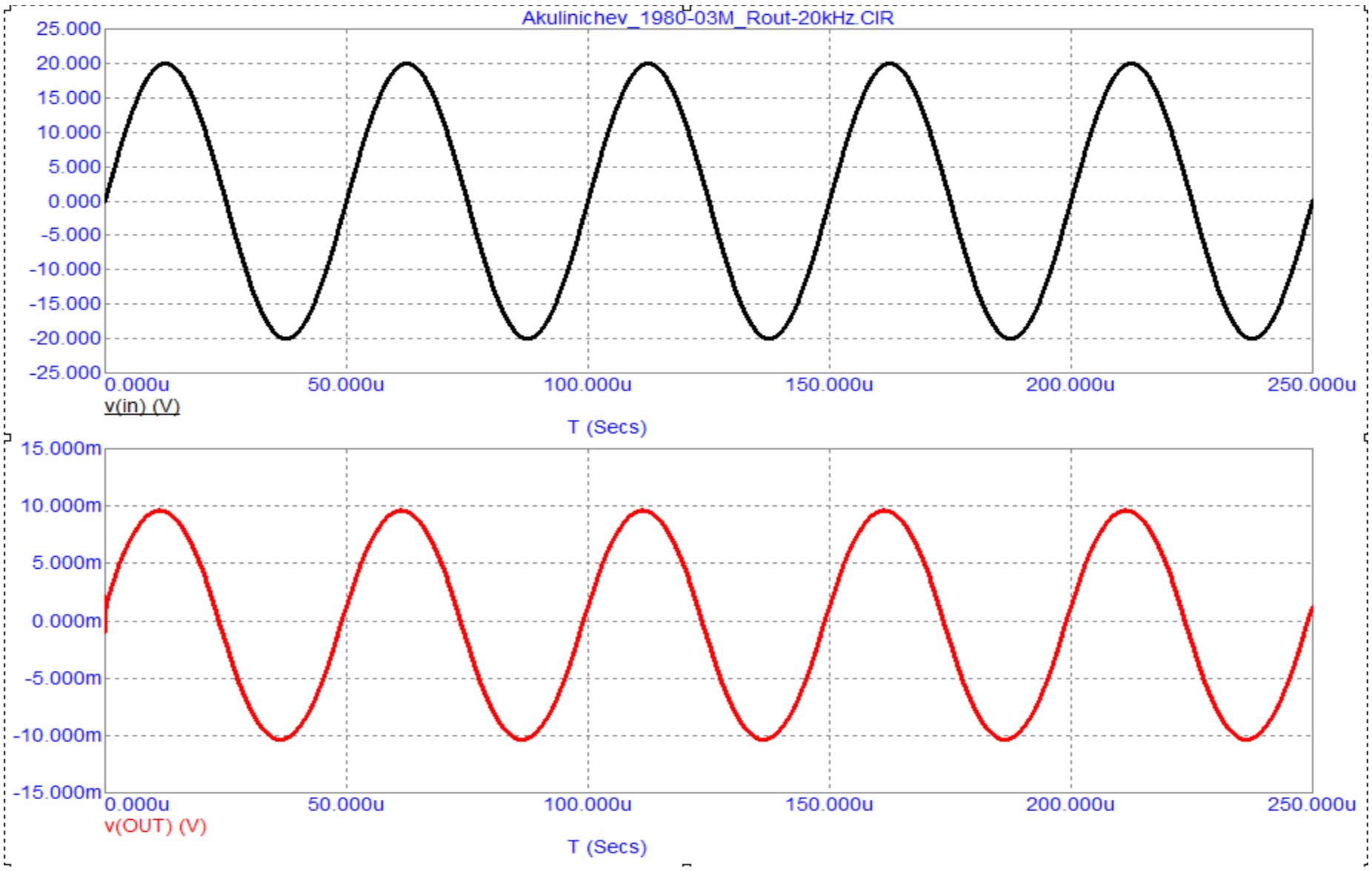


Рис. 14 (результат измерения выходного сопротивления на частоте 20 кГц)

Измерение проведено подачей сигнала уровнем 20 В(пик) через резистор сопротивлением 8 Ом на выход усилителя. Выходное сопротивление вычисляют по формуле:

Rout = RL*Vout/(Vin-Vout) = 8*0,01/(20 – 0,01) = 0,08/20 = 0,004 Ом

Как видно из осциллограмм выходное сопротивление в звуковом диапазоне константа, без фазового сдвига по отношению к внешнему воздействию и без видимых искажений формы. Коммутационные искажения также не проявляются на форме выходного сопротивления как это происходит в подавляющем большинстве усилителей.

Принято считать что для качественного звукоусиления полоса полной мощности сверху должна иметь 10-ти кратный запас. Проверим амплитудную характеристику на частоте 200 кГц, рис. 15.

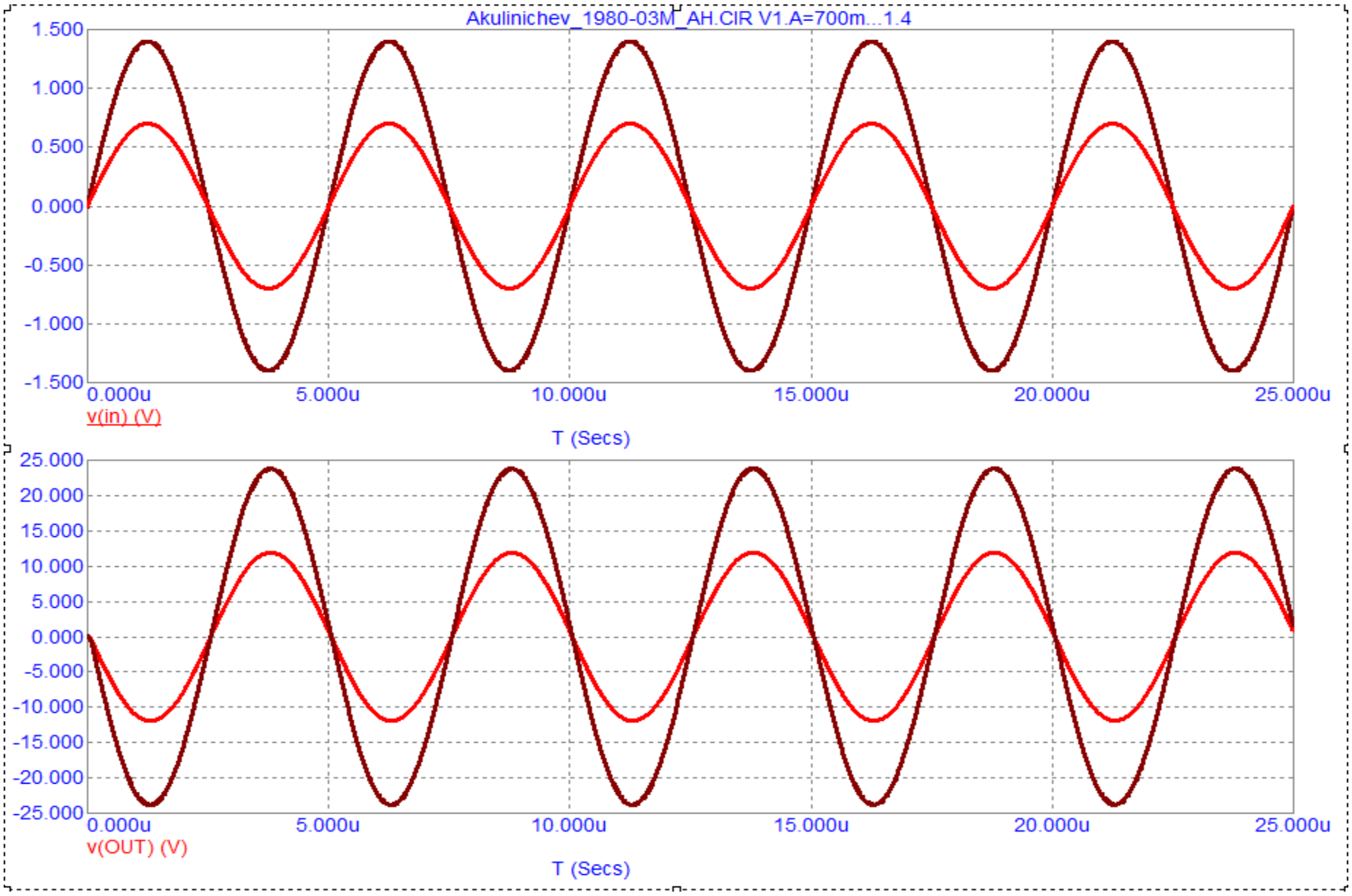


Рис. 15.

Как показал тест и на частоте 200 кГц не видно признаков TIM-искажений, т. е. пилообразных искажений связанных с недостаточной скоростью нарастания выходного напряжения.

В тексте выше упоминались векторные погрешности и искажения. Чтобы иметь представление что это такое обратимся к рис. 15 и 16

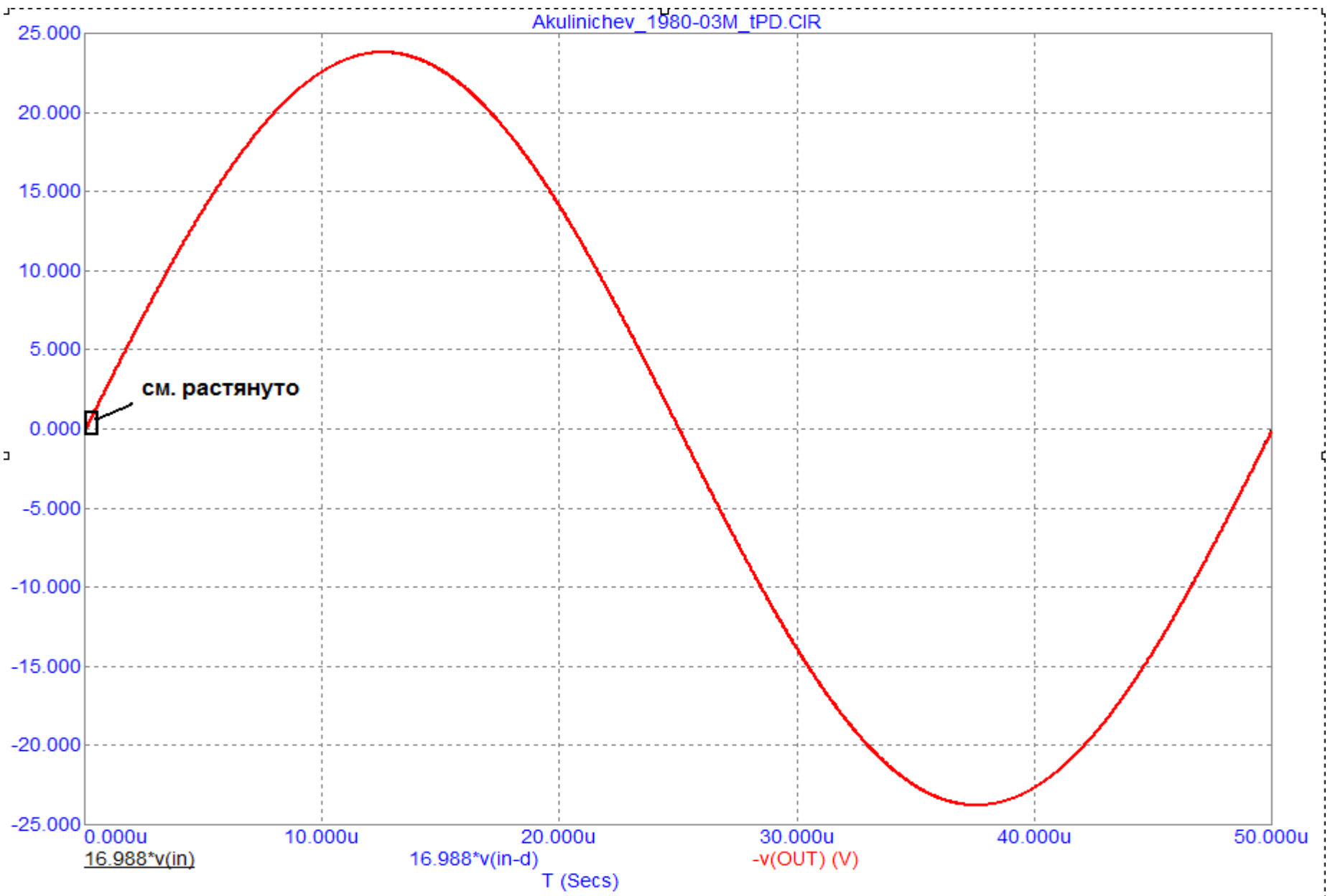


Рис. 15 (один период сигнала частотой 20 кГц)

На рисунке 15 выведено 3 осциллограммы которые практически сливаются в одну линию. Чтобы более подробно рассмотреть что собой представляют эти сигналы увеличим начальный участок, рис. 16

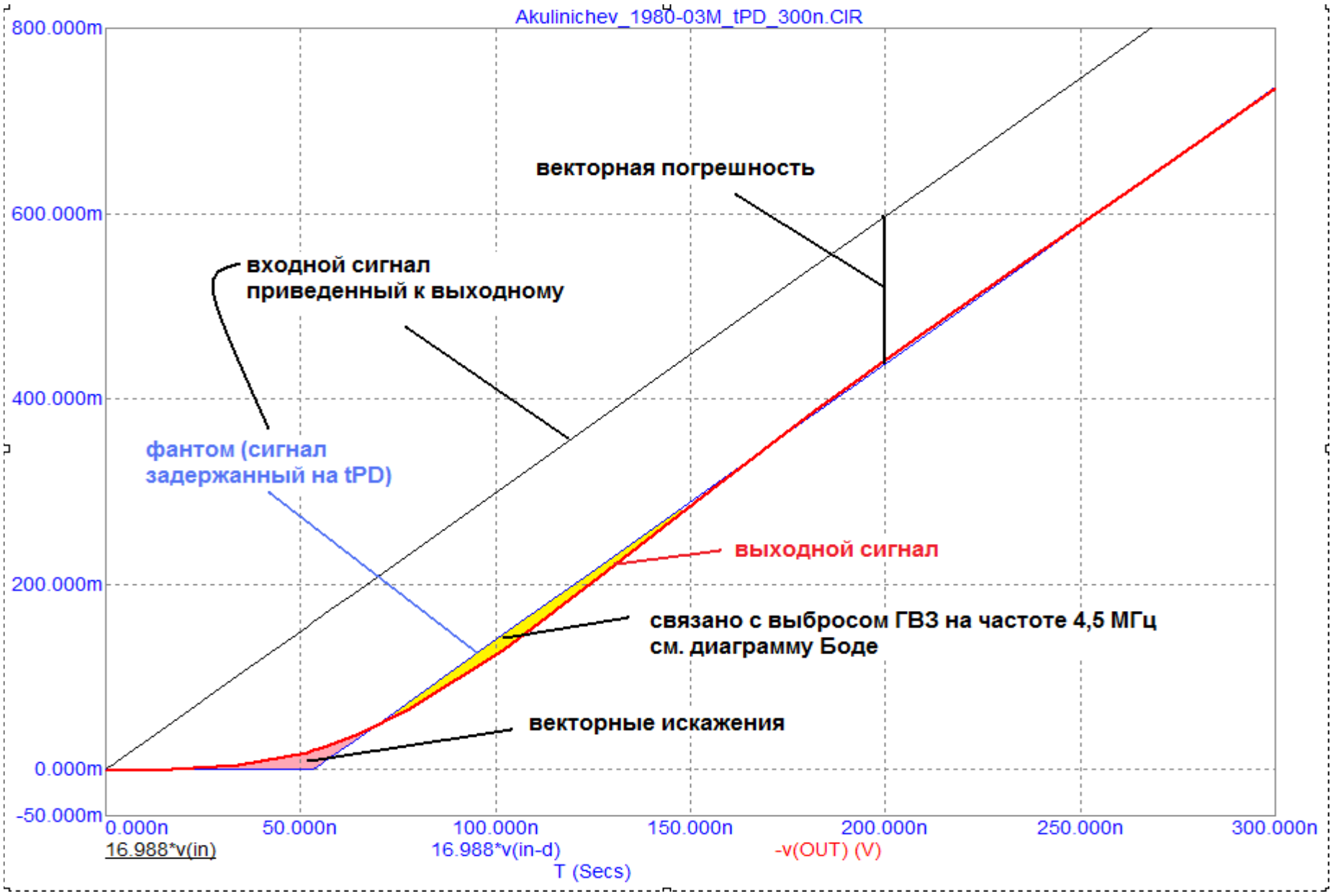


Рис. 16.

tPD (Time Propagation Delay) – время задержки прохождения сигнала. В данном случае это время совпадает с ГВЗ. В этом нетрудно убедиться если растянуть участок перехода через ноль на рис. 15.

Некоторые авторы придают большое значение первому Ватту. Мол, если на первом Ватте параметры плохи, то дальше можно уже и не смотреть. На рис. 17 показан спекр сигнала частотой 20 кГц уровнем 4 В(пик). В спектре 2-я и 3-я гармоники, дальше ничего нет.

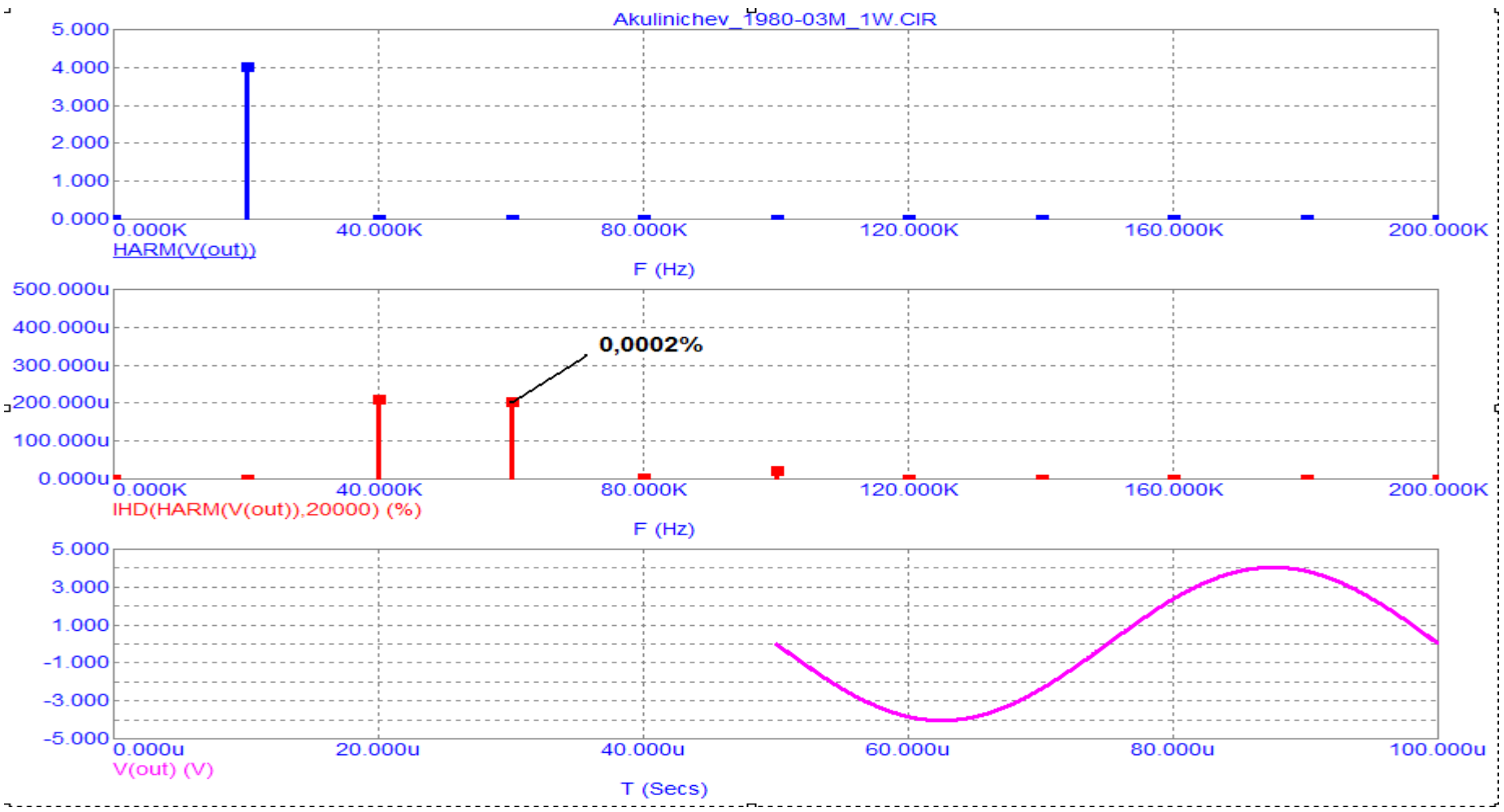
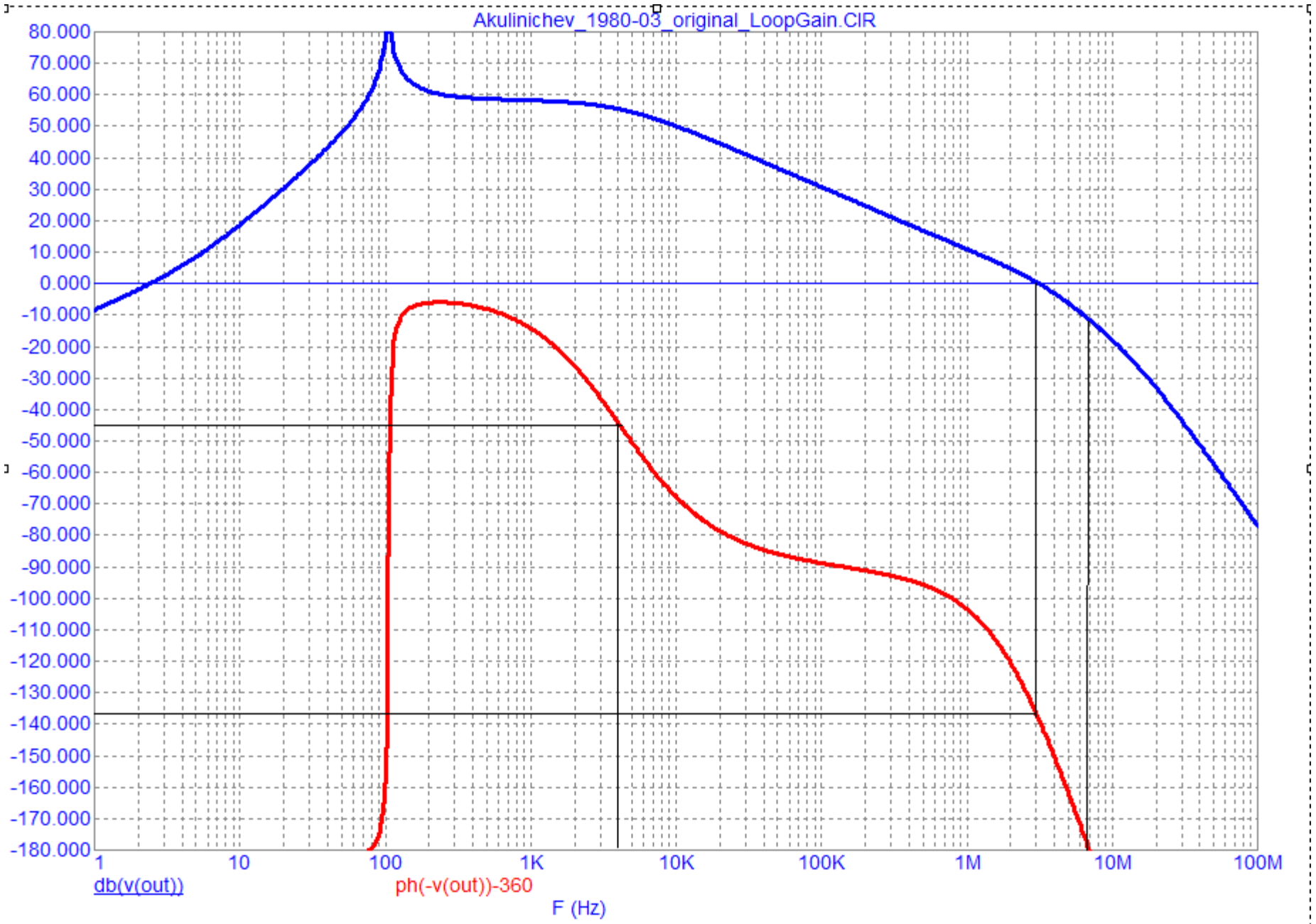


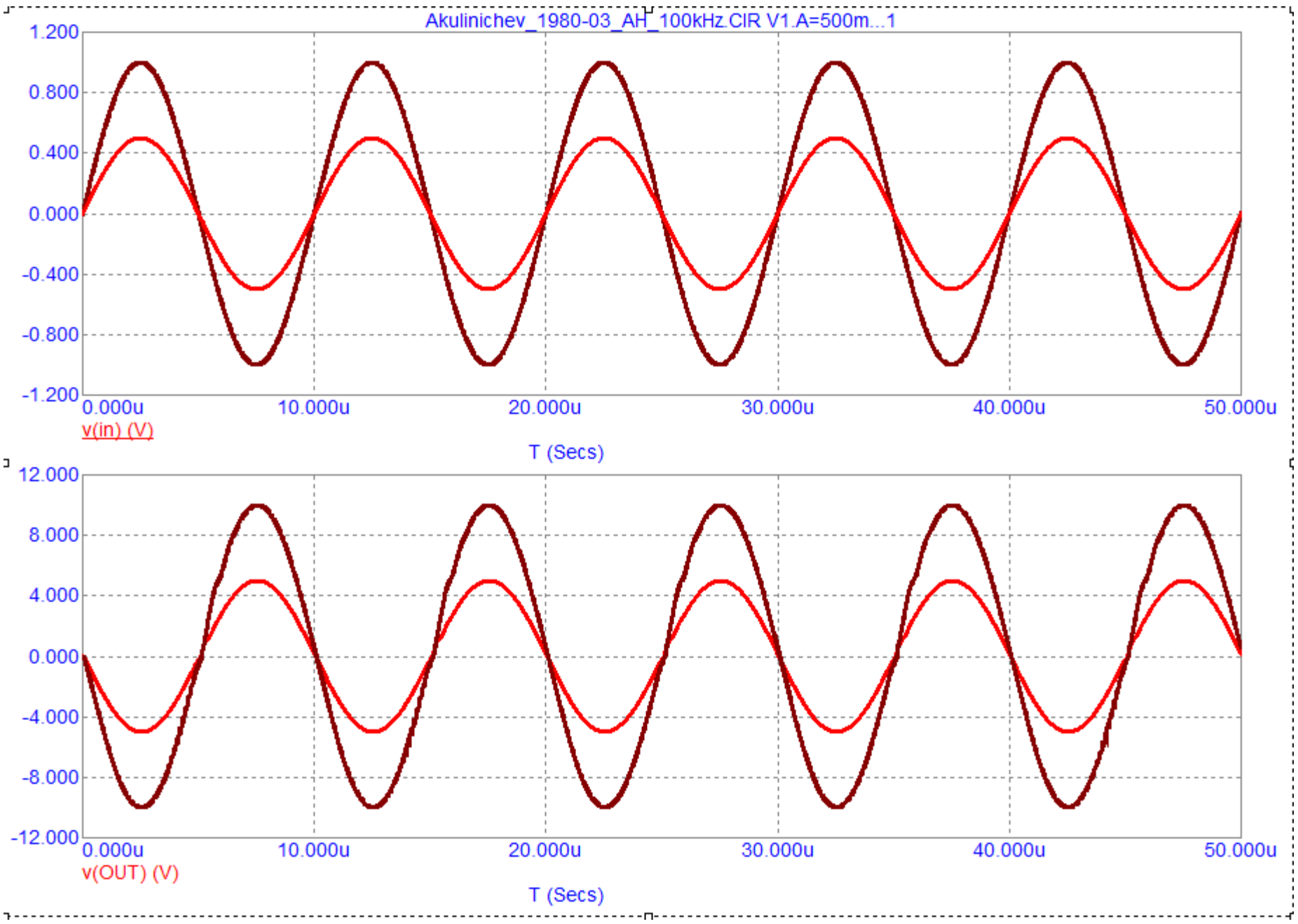
Рис. 17

Краткий анализ провел
Александр Петров

p.s.

В качестве приложения график петлевого усиления и амплитудная характеристика модели оригинальной схемы на частоте 100 кГц





Не удивительно что на НЧ имели место заметные на слух искажения. Первый полюс около 4 кГц. Признаки нестабильности и видимые искажения имеют место на частоте 100 кГц. См. аналогичный тест доработанной модели на частоте 200 кГц.