

Простой усилитель класса А с ТОС

В начале развития схемотехники УМЗЧ были популярны простые усилители с токовой обратной связью (ТОС), например И.Акулиничева [1], [2]; призер конкурса [3] и многие др. Подобные усилители широко использовались в различных радиоприемниках, например [4]. Несмотря на класс АВ усилители [1], [2] благодаря отсутствию эмиттерных резисторов и малой задержке прохождения сигнала имеют малые коммутационные искажения так как быстродействующая ООС прекрасно с ними справляется. О зависимости коммутационных искажений от наличия эмиттерных резисторов и их номинала прекрасно показано в [5]. Известно также что наиболее эффективно коммутационные искажения устраняются в усилителях класса А. Полностью симметричный вариант усилителя класса А в различных модификациях (с разными выходными транзисторами) был предложен популярным радиолюбителем Хирага (Jean Hiraga) и опубликован на страницах французского журнала L'Audiophile. В интернете можно встретить много модификаций этого усилителя с выходными транзисторами как Mosfet так и Lateral. На рис. 1 показан вариант на биполярных транзисторах.

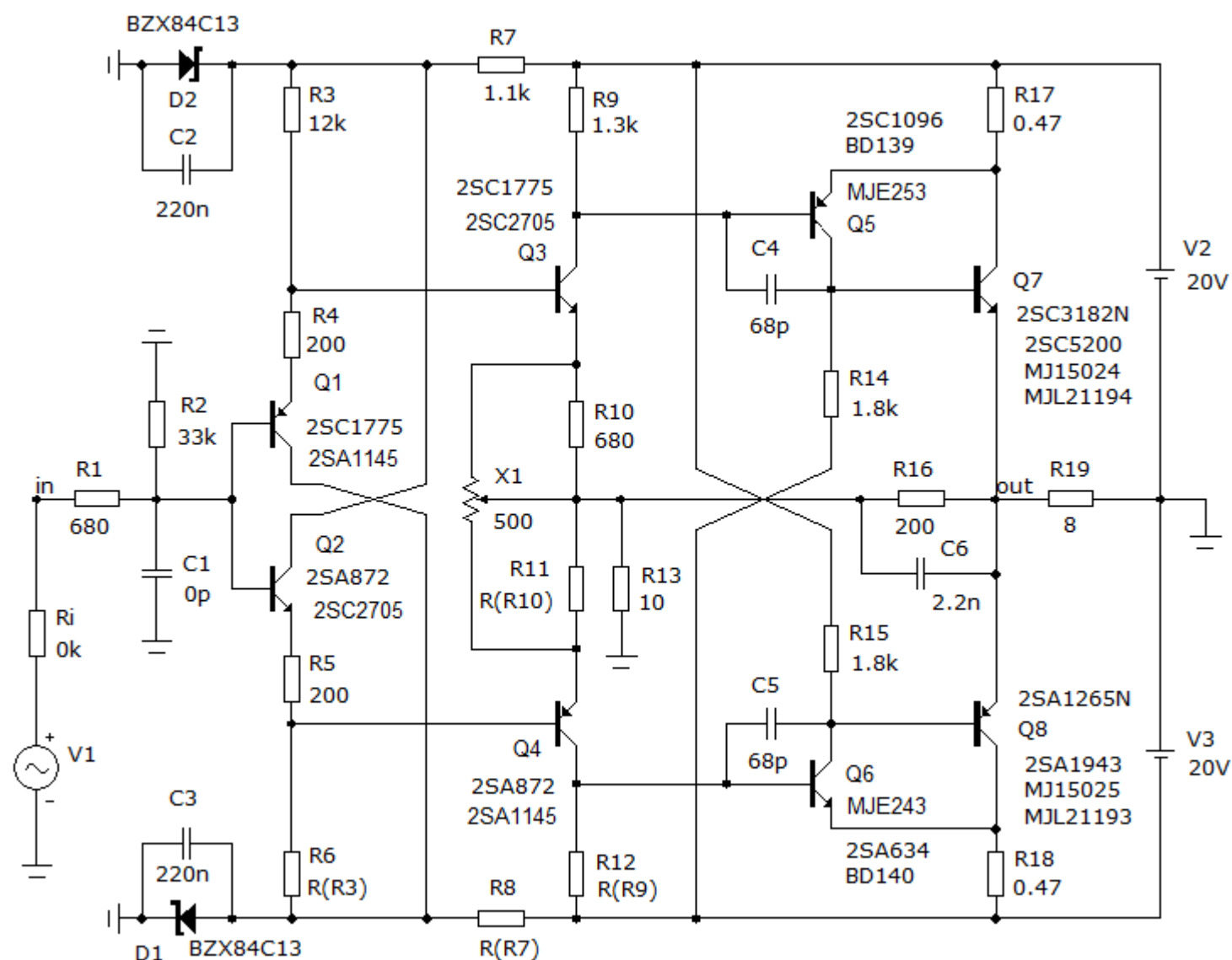


Рис. 1

На транзисторах Q1, Q2 выполнен входной повторитель со схемами сдвига уровня на резисторах R4, R5. Ток покоя повторителей, а значит и напряжения смещения для Q3, Q4 задан резисторами R3, R6 и стабилитронами D1, D2. Транзисторы Q3, Q4 включены по схеме ОЭ. Сигналы с нагрузки поступают на УН выполненный на транзисторах Q5, Q6. Транзисторы УН охвачены глубокой токовой ОС с выхода ВК выполненного на транзисторах Q7, Q8 без эмиттерных резисторов. Этой же ОС поддерживается и ток покоя $1 \pm 0,1$ А который можно корректировать резисторами R9, R12 (и другими определяющими ток второго каскада). Схема достаточно термостабильна, приращение тока при нагреве с 27°C до 80°C составляет 20%. Тем не менее в некоторых реализациях этого усилителя можно встретить терморезисторы включенные последовательно с резисторами R9, R12.

Из недостатков такого решения, которые сразу бросаются в глаза, это отсутствие ООС во входном повторителе и неэффективная схема ТОС через эмиттерные резисторы транзисторов Q3, Q4. Первый недостаток устраняется использованием ГСТ вместо резисторов R3, R6; второй — применением ООС непосредственно в эмиттеры Q3, Q4 [6].

Снимем диаграмму Боде без конденсатора C1, рис. 2

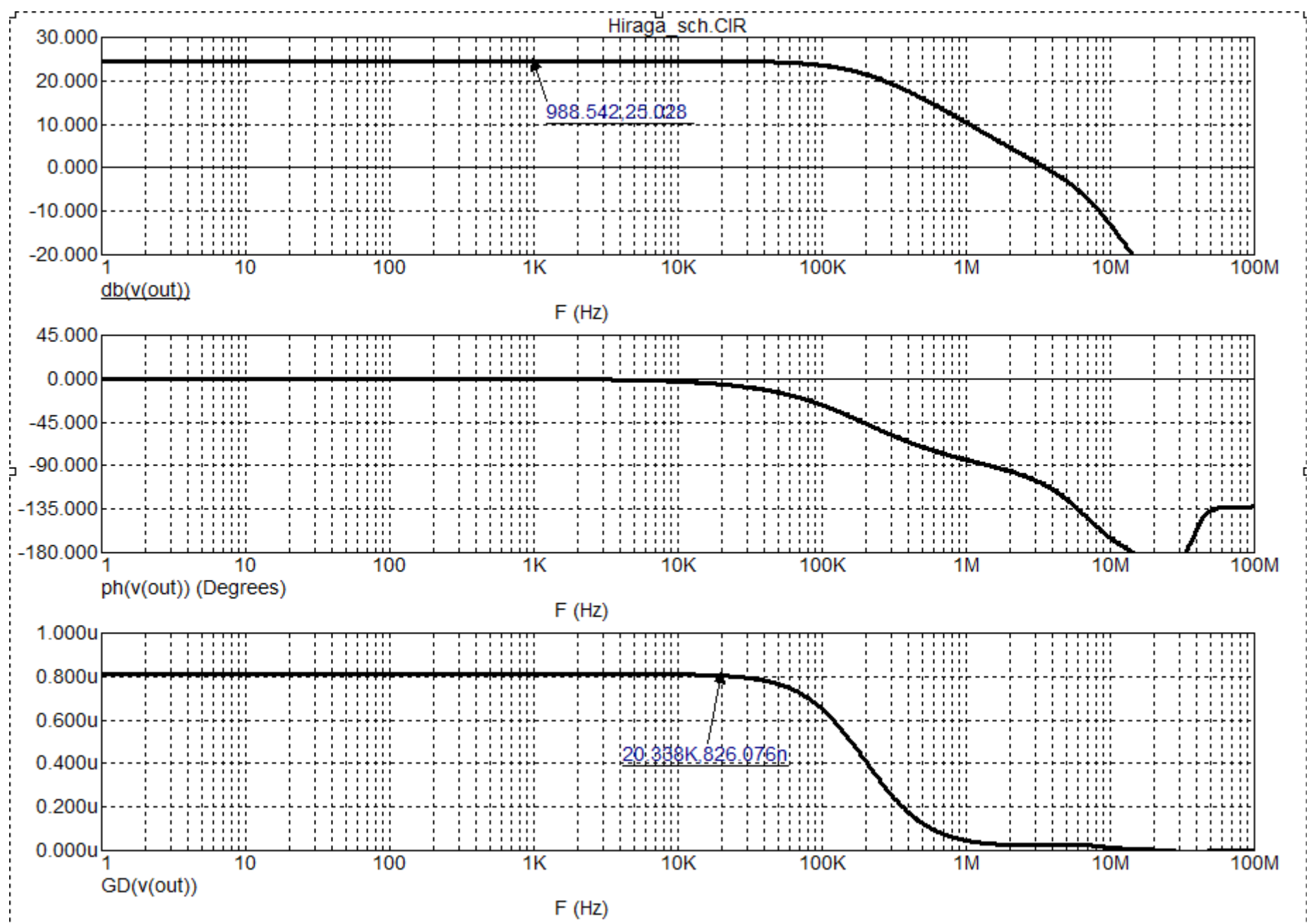


Рис. 2

Из рисунка 2 видно что частота полосы пропускания около 200 кГц (сдвиг фазы 45 градусов), усиление равно 25 дБ, а задержка прохождения сигнала (Time Propagation Delay) составляет 825 нс.

Чтобы определить глубину ООС и запасы устойчивости снимем график петлевого усиления, рис. 3

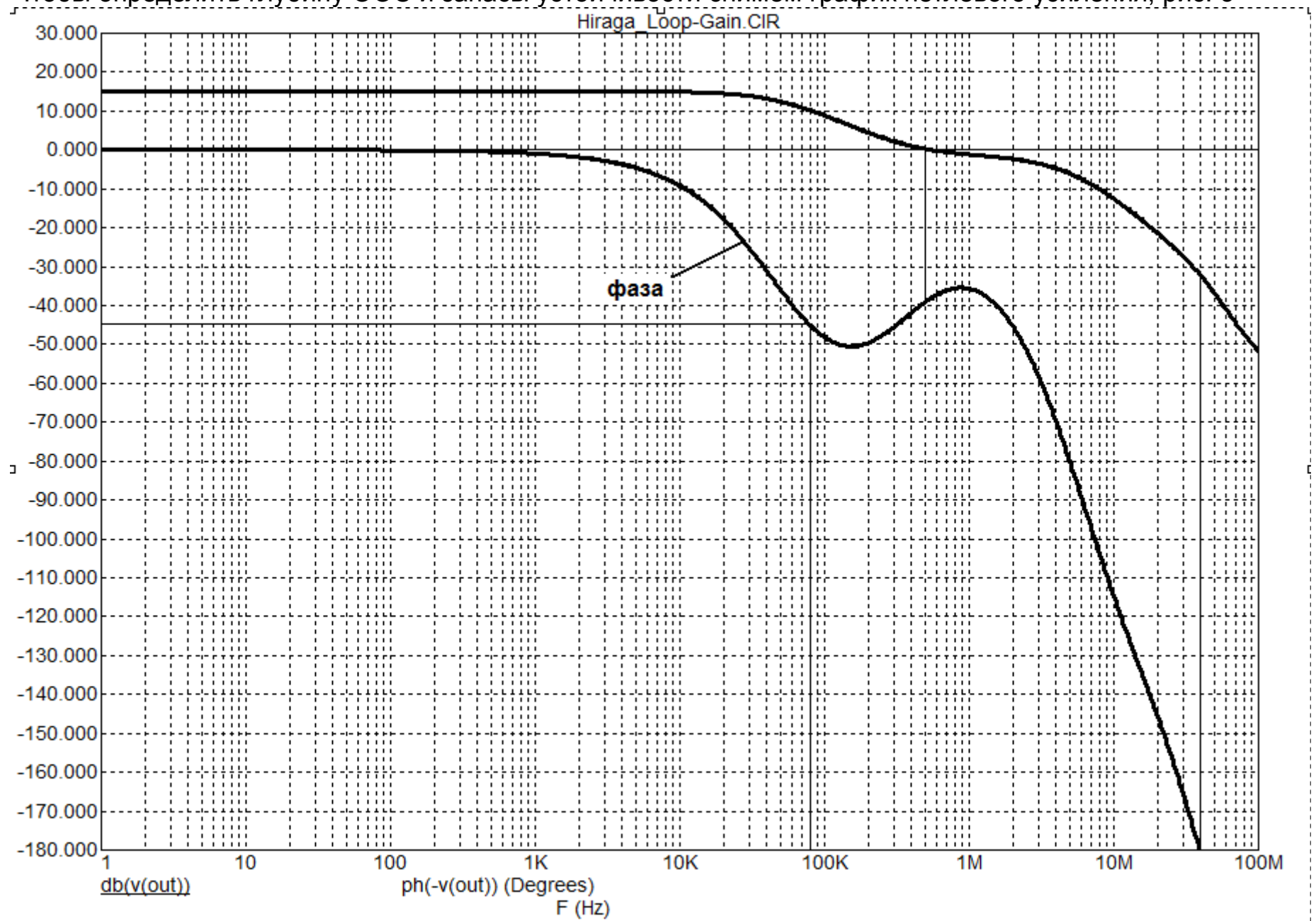


Рис. 3

Из графика видно что петлевое усиление составляет всего 15 дБ чего явно маловато для эффективного подавления искажений. Частота первого полюса около 80 кГц, запас по фазе 140 градусов, запас по усилению 30 дБ. При этом фаза петлевого усиления постоянная на частотах до 1 кГц а далее фазовый сдвиг начинает расти и к частоте 20 кГц достигает 18 градусов. За звуковым диапазоном имеет место локальный провал фазовой характеристики характерный для 2-х полюсной коррекции.

Сегодня все чаще звучит мнение что коэффициент гармоник ничего не определяет в качестве звука. Чаще всего так и есть, так как Кг измеряют на синусоидальном сигнале в установившемся режиме где уже нет скоростных и векторных искажений проявляющихся только в начале первого периода или в моменты изменения направления скалярного вектора напряжения.

Снимем спектр сигнала частотой 1 кГц, рис. 4

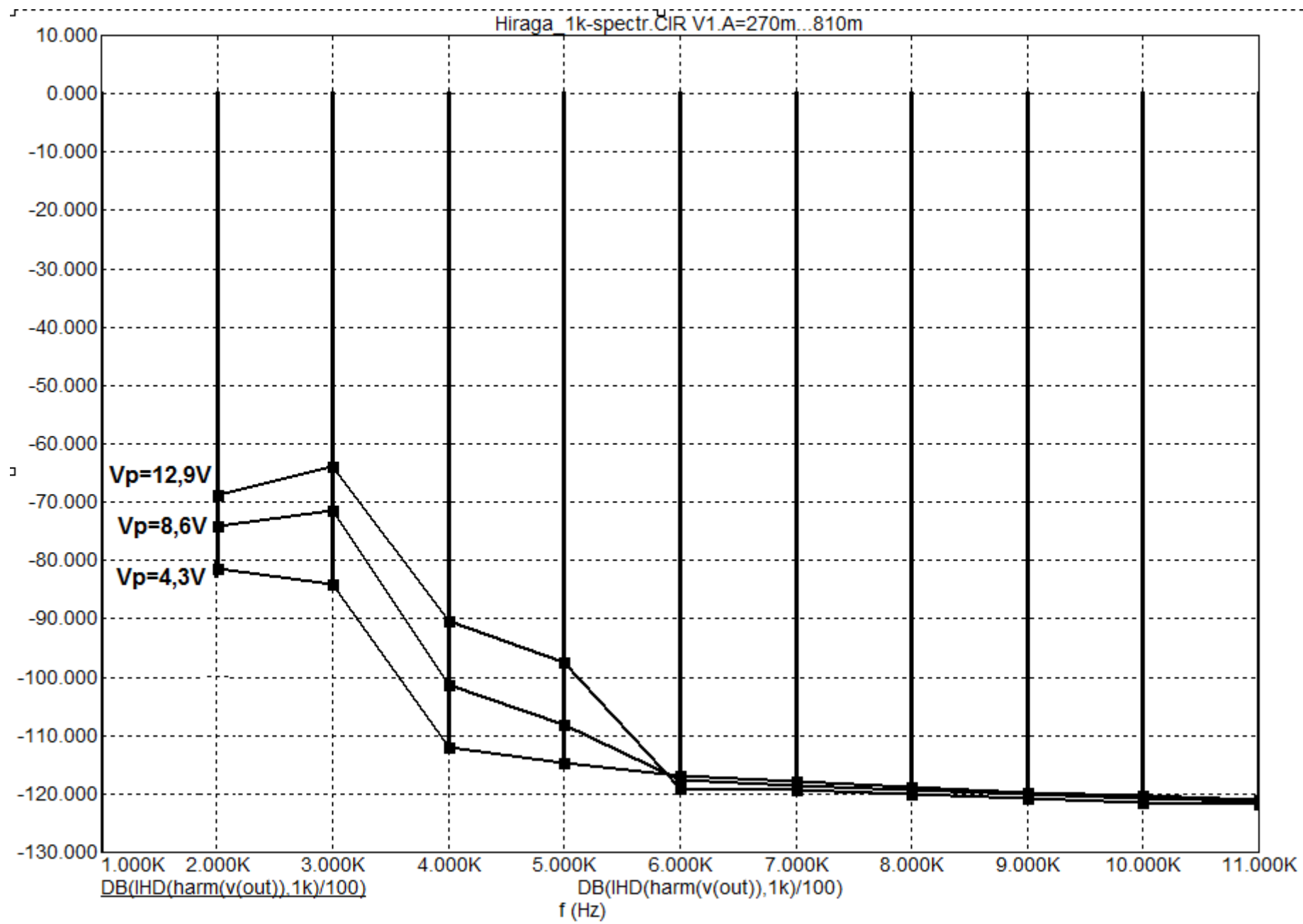


Рис. 4

Согласно графика Рис. 4 высшие гармоники при выходных напряжениях до 8,6 В(пик) чуть выше минус 100 дБ. Спектр спадающий, монотонный. Причем наблюдаем только рост низших гармоник. Следует отметить что большинство глубокоОСных усилителей имеют динамический диапазон в лучшем случае 60...70 дБ. В данном случае на 40 дБ шире. Однако мы посмотрели спектр для относительно низкой частоты где скоростные и векторные искажения еще не так проявляются.

Заодно посмотрим спектр сигнала частотой 20 кГц, рис. 5

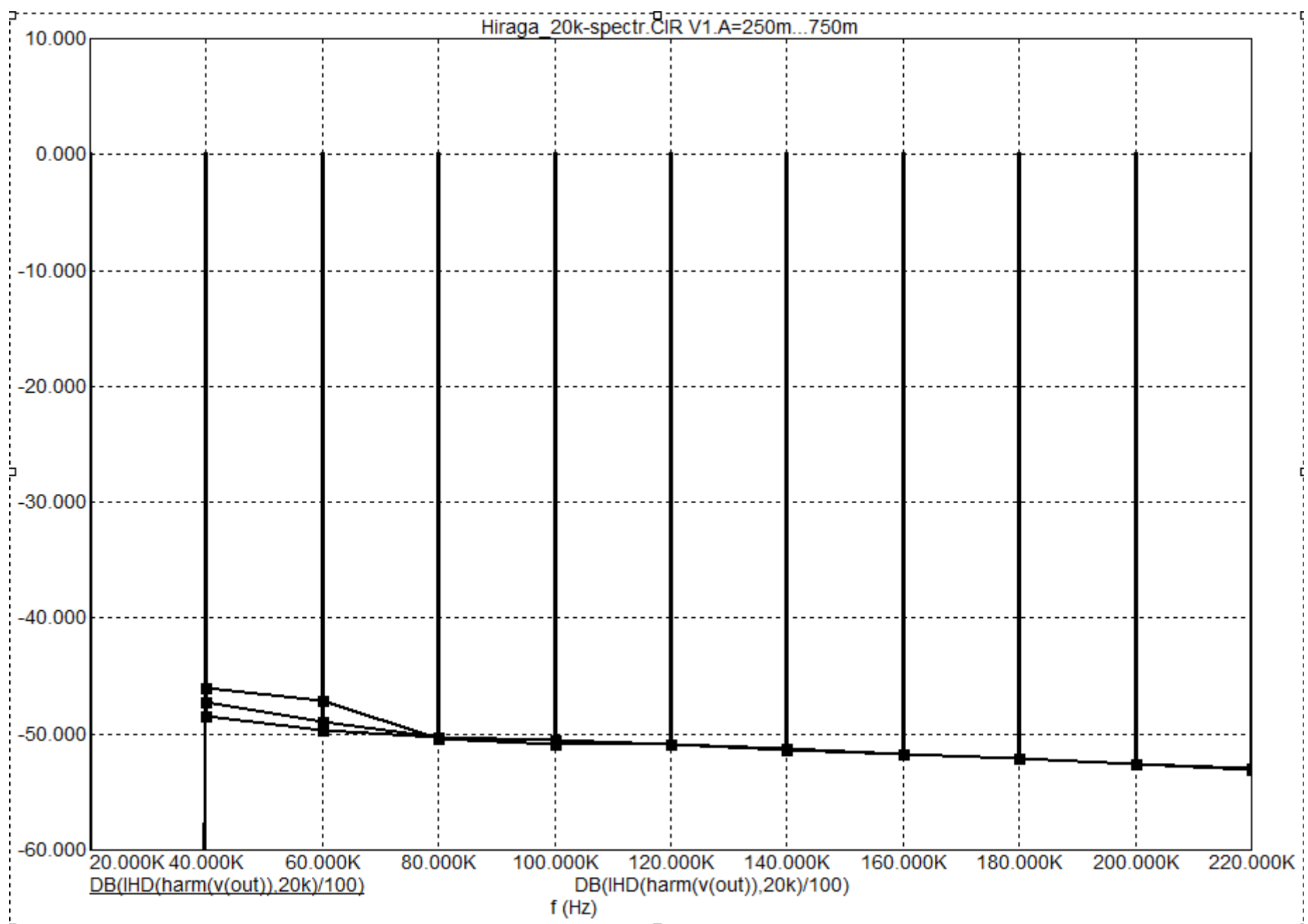


Рис. 5

На верхней частоте звукового диапазона динамический диапазон значительно уже, сказывается большая задержка прохождения сигнала.

Измерим зависимость K_g от частоты при выходном напряжении 14 В (пик) или 10 В(RMS), рис. 6

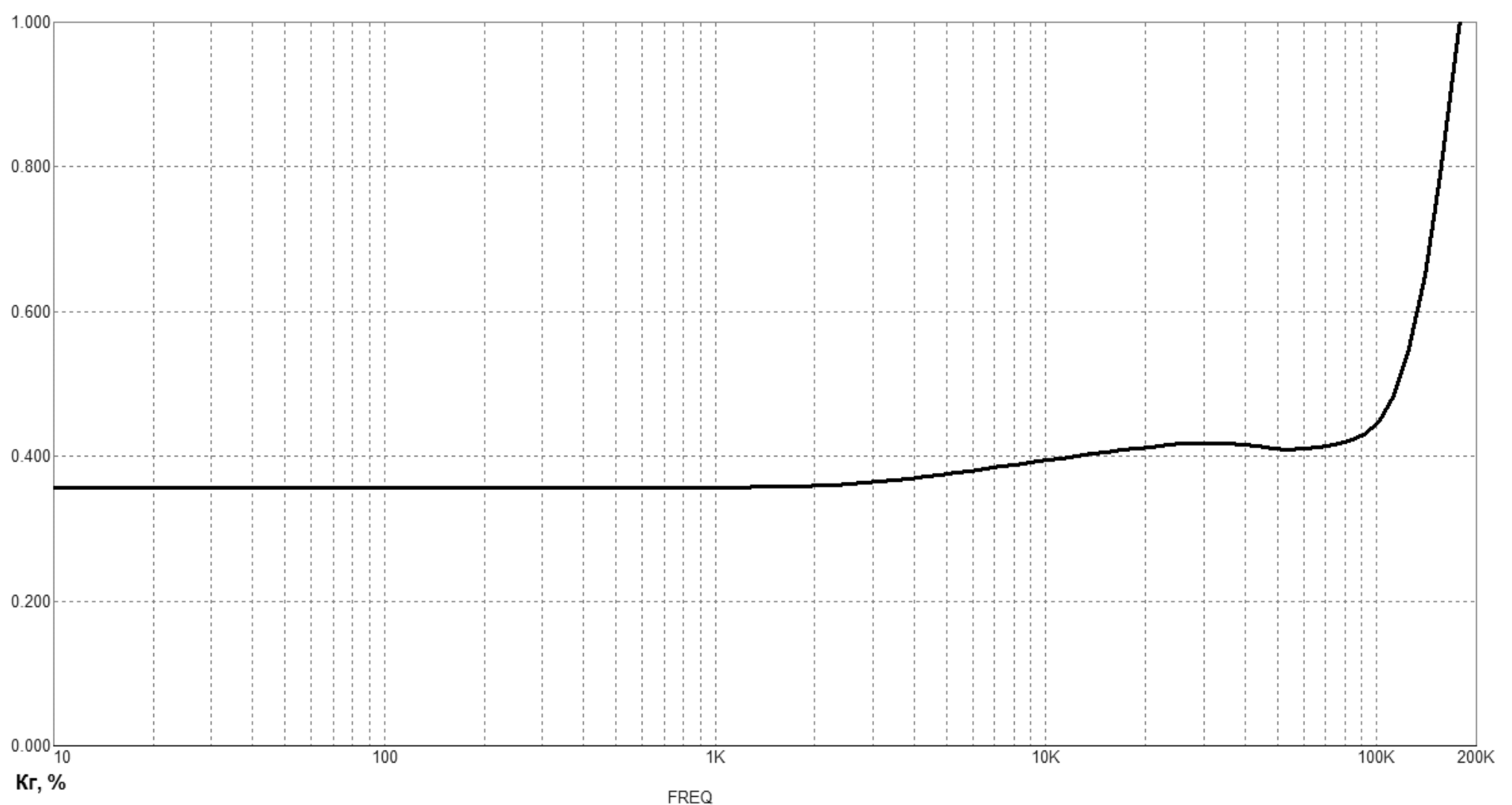


Рис. 6

Как видим из графика рост высших гармоник начинается выше 100 кГц. Напомню что рост высших гармоник в подавляющем большинстве УМЗЧ начинается с нескольких кГц. Во всем звуковом диапазоне K_g не превышает 0,35%, причем на низких и средних частотах основной вклад вносят 2-я и 3-я гармоники не критичные для слуха.

Чтобы убедиться что в усилителе нет коммутационных искажений проверим их с помощью специально разработанного для этой цели фильтра, рис. 7

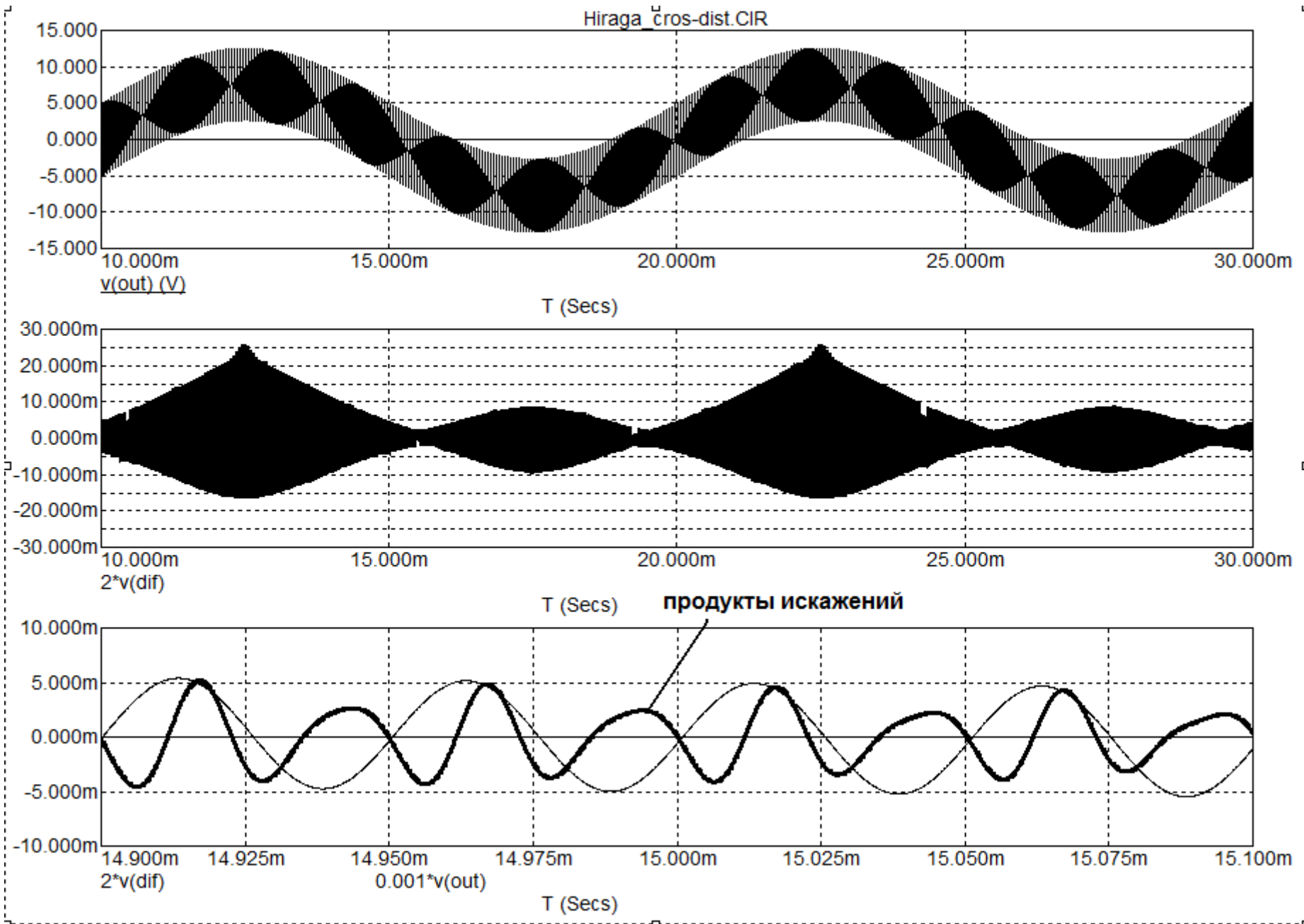


Рис. 7

На второй осциллограмме показаны продукты искажений на выходе фильтра. На третьей осциллограмме продукты искажений (жирная линия) и ослабленное в 1000 раз выходное напряжение (тонкая линия, в основном 20 кГц) в интервале времени от 14,9 до 15,1 мс.

Для полноты характеристик измерим ИМИ двухчастотным методом, рис. 8

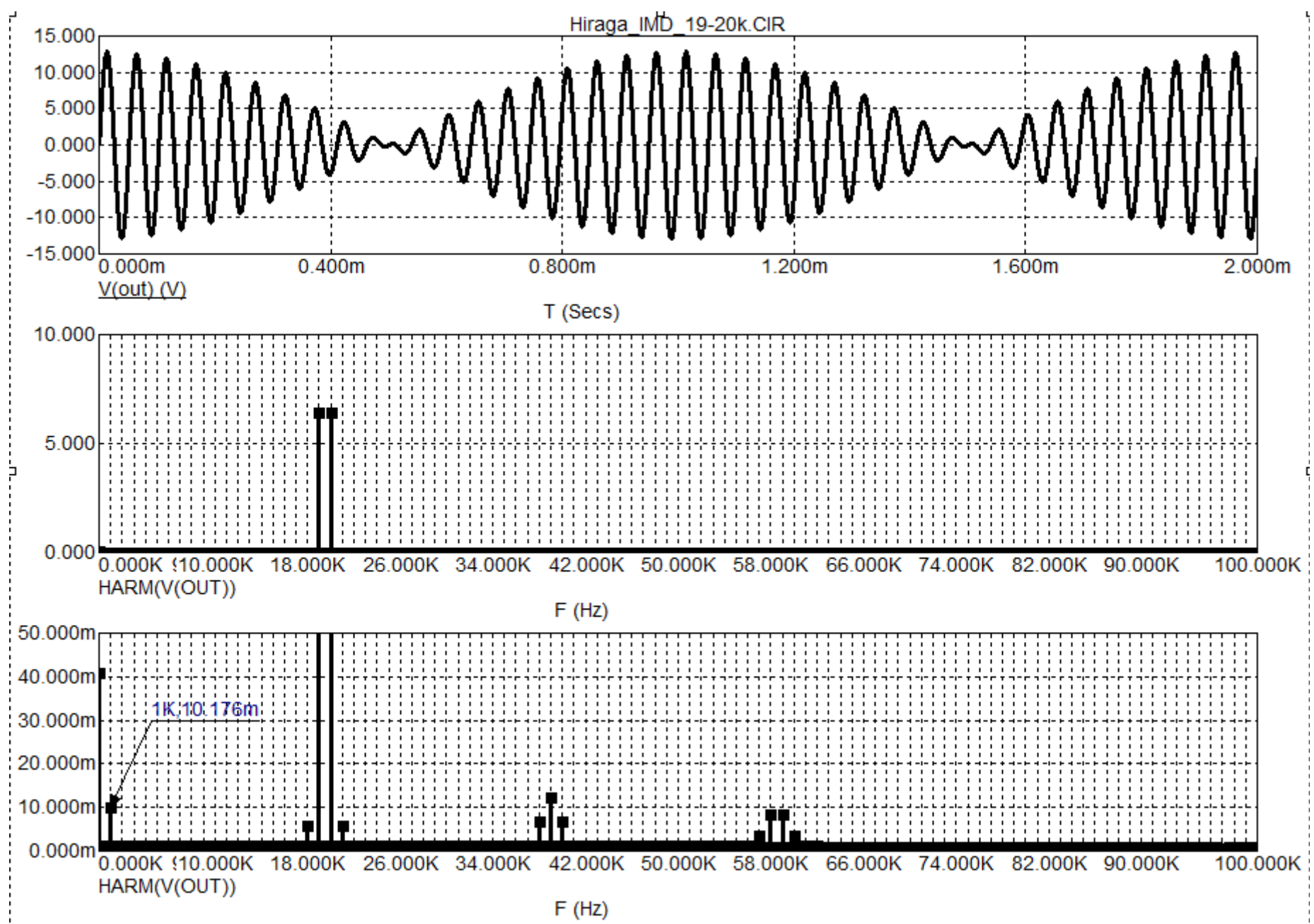


Рис. 8

Из рисунка 8 видно что ИМИ первого порядка частотой 1 кГц имеют уровень 10 мВ что от напряжения 7 В(пик) составляет 0,14%, шумовая подставка в звуковой полосе гораздо ниже.

Вывод: потенциал усилителя реализован не полностью из-за указанных в начале недостатков. В следующей статье будет рассмотрен вариант усилителя с улучшенными параметрами.

Литература:

1. И.Акулиничев, Усилитель тока низкой частоты, Радио 1974 №1.
2. И.Акулиничев, УМЗЧ с широкополосной ООС, Радио 1993 №1
3. Н.Зыков, Hi-Fi стереоусилитель, Радио 1975 №1
4. Виктория — 001 — стерео, Радио 1975 №1
5. А.Ломакин, В.Паршин, Коммутационные искажения в усилителях мощности ЗЧ, Радио 1987 №9
6. С.Лозицкий, УМЗЧ с токовой обратной связью, Схемотехника 2003 №2

С уважением,
Александр Петров

28 сентября 2019 г.