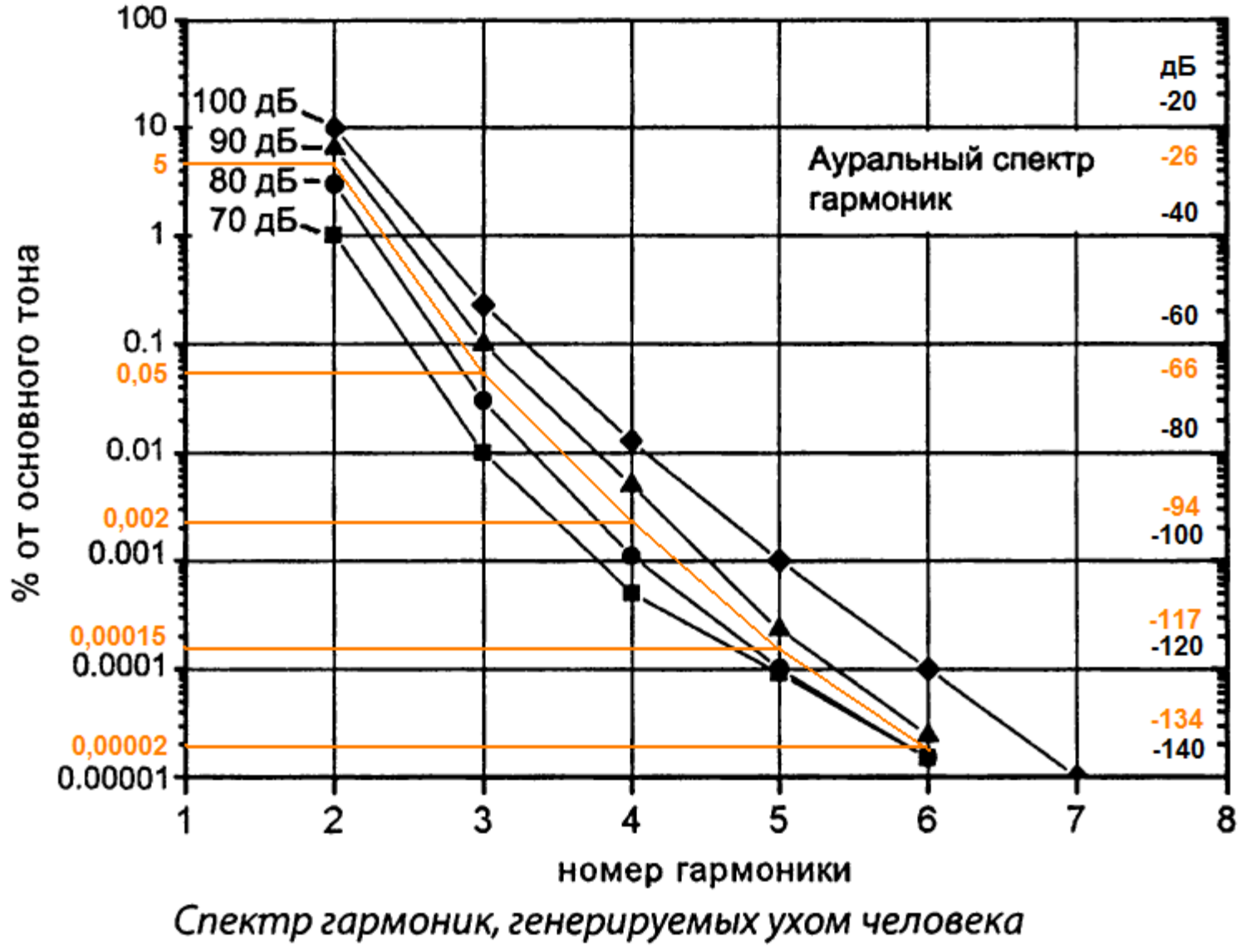
Феномен «ЭХО»

Вот уже более 10 лет как усилитель “Noosfera ECHO” класса А в различных модификациях (с серво и без) пользуется большой популярностью.

Первая версия усилителя была опубликована в [1] где были изложены требования к параметрам высококачественного усилителя и прежде всего к его спектру:

- на выходе должны отсутствовать гармонические составляющие выше третьей, четвертой гармоник по уровню -80 … -90 дБ;
- распределение гармонических составляющих должно быть ниспадающим по частоте и амплитуде.

Было отмечено что спектр ламповых однотактных УМЗЧ короткий, в ряде случаев по сути одна вторая гармоника, высших гармоник нет, а если и есть то со спадающим спектром как правило не выше 5-й. Отмечено также что 2-я и 3-я гармоники образуют созвучный интервал с первой и даже при значительных уровнях они прекрасно маскируются находясь в «тени» первой. Гармоники выше 4-й вносят окрашивание звука (резкость, повышенную яркость, …) даже при незначительных амплитудах. Это хорошо согласуется с ушными гармониками [2], рис. 1



Спектр гармоник, генерируемых ухом человека

Рис. 2

В качестве схемы рассмотрим 4-ю версию с системой сервоконтроля, Рис. 2

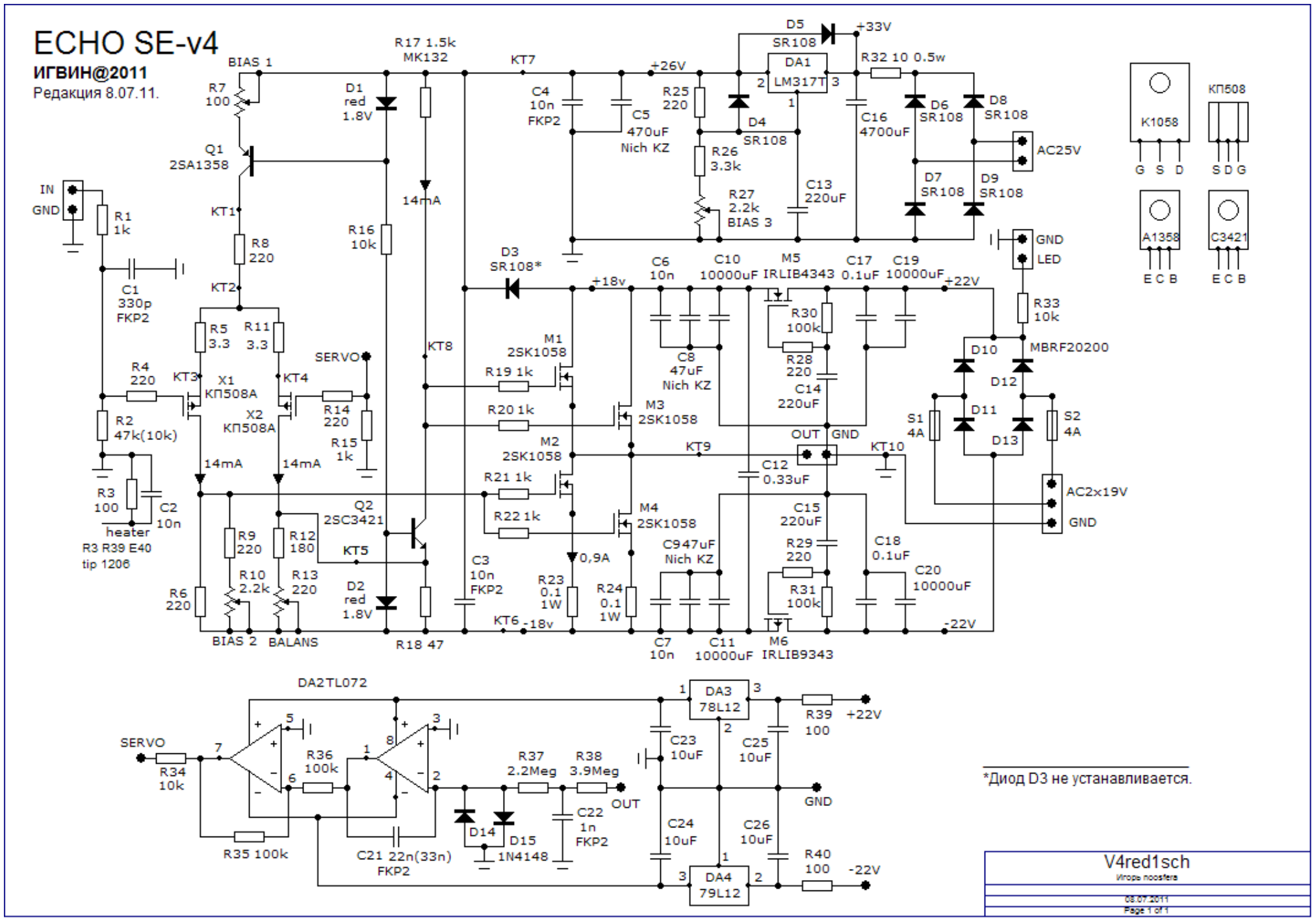


Рис. 2

Для начала снимем диаграмму Боде без конденсатора C1, рис. 3

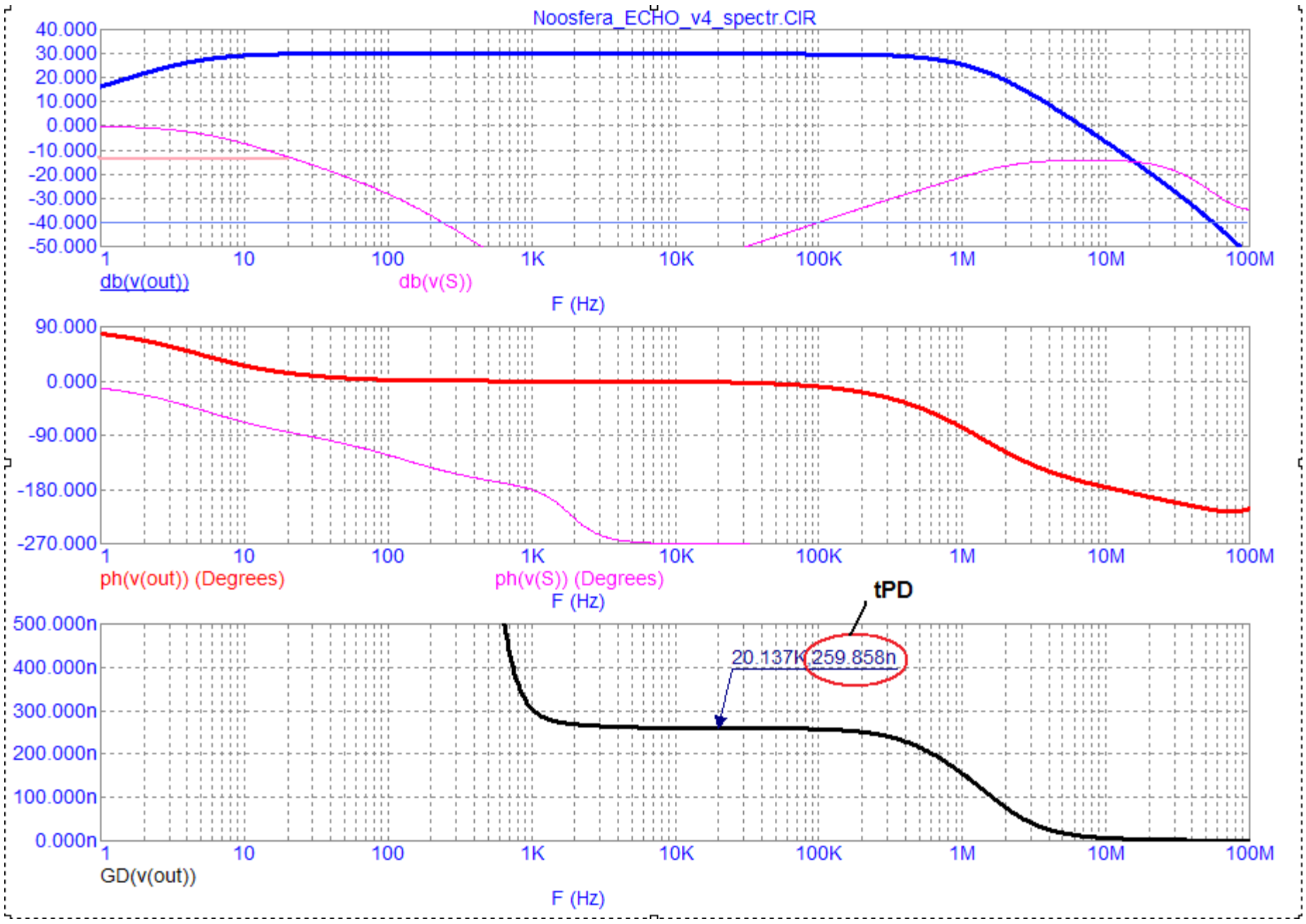


Рис. 3

На график Боде выведен график ГВЗ и график сервоконтроля на втором входе ДК (S) — розовая линия. Время задержки прохождения сигнала равно ГВЗ на частотах выше 5...10 кГц и равно 260 нс, на частотах ниже 1 кГц имеет место рост ГВЗ из-за системы сервоконтроля несмотря на то что усилитель УПТ.

Пару слов о требованиях к системе сервоконтроля. На мой взгляд требования к системе хорошо изложены в [3]. В соответствии с рекомендациями сигнал сервоконтроля должен быть ниже входного сигнала как минимум на 40 дБ (в 100 раз). Из рис. 3 видно что сигнал S пересекает линию -40 дБ на частоте 250 Гц и ниже этой частоты растет влияние сигнала серво на полезный сигнал. На нижней частоте звукового диапазона 20 Гц сигнал S всего на 12 дБ (4 раза) ниже 0 дБ.

Спектры выходного сигнала усилителя [1] на разной мощности приведены в таблице.

$P_{вых}$, Вт ($R_н$ = 4 Ом)	$U_{вых}$, В	Уровень гармонических составляющих правого канала, дБ					
		A2	A3	A4	A5	A6	A7
1	2,0	–48	–58	—	—	—	—
2	2,83	–45	–53	—	—	—	—
5	4,47	–40	–44	—	—	—	—
10	6,32	–34	–35	–73	—	—	—
20	8,94	–30	–29	–58	–67	–71	–78

Посмотрим насколько результаты моделирования соответствуют измерениям в железе

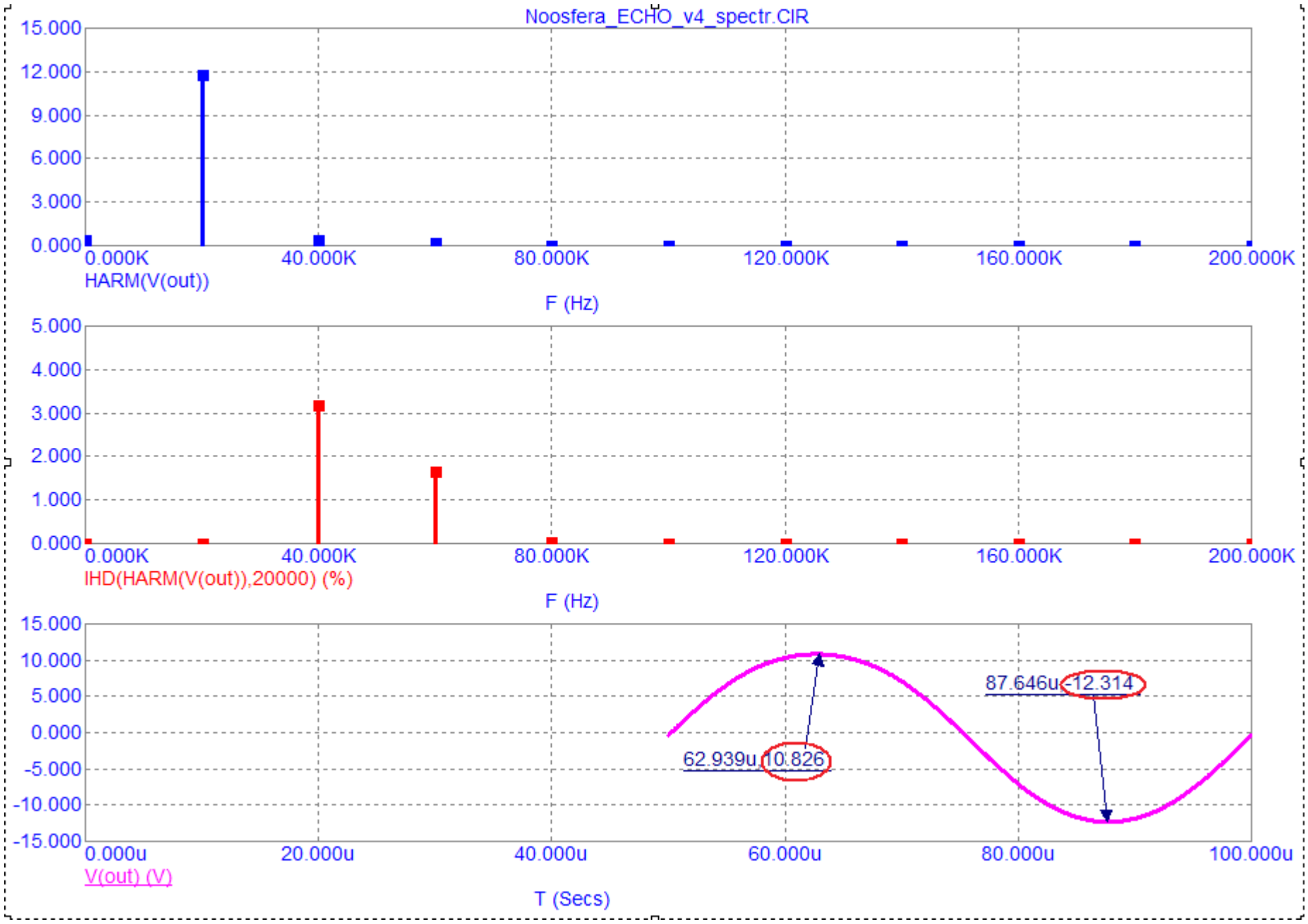


Рис. 4

Спектр сигнала частотой 20 кГц амплитудой 12 В(пик) на нагрузке 8 Ом показан на рисунке 4 Видно что в спектре сигнала преобладает 2-я гармоника, положительная полуволна по сравнению с отрицательной скомпрессирована. Проверим спектр на первом периоде, рис. 5

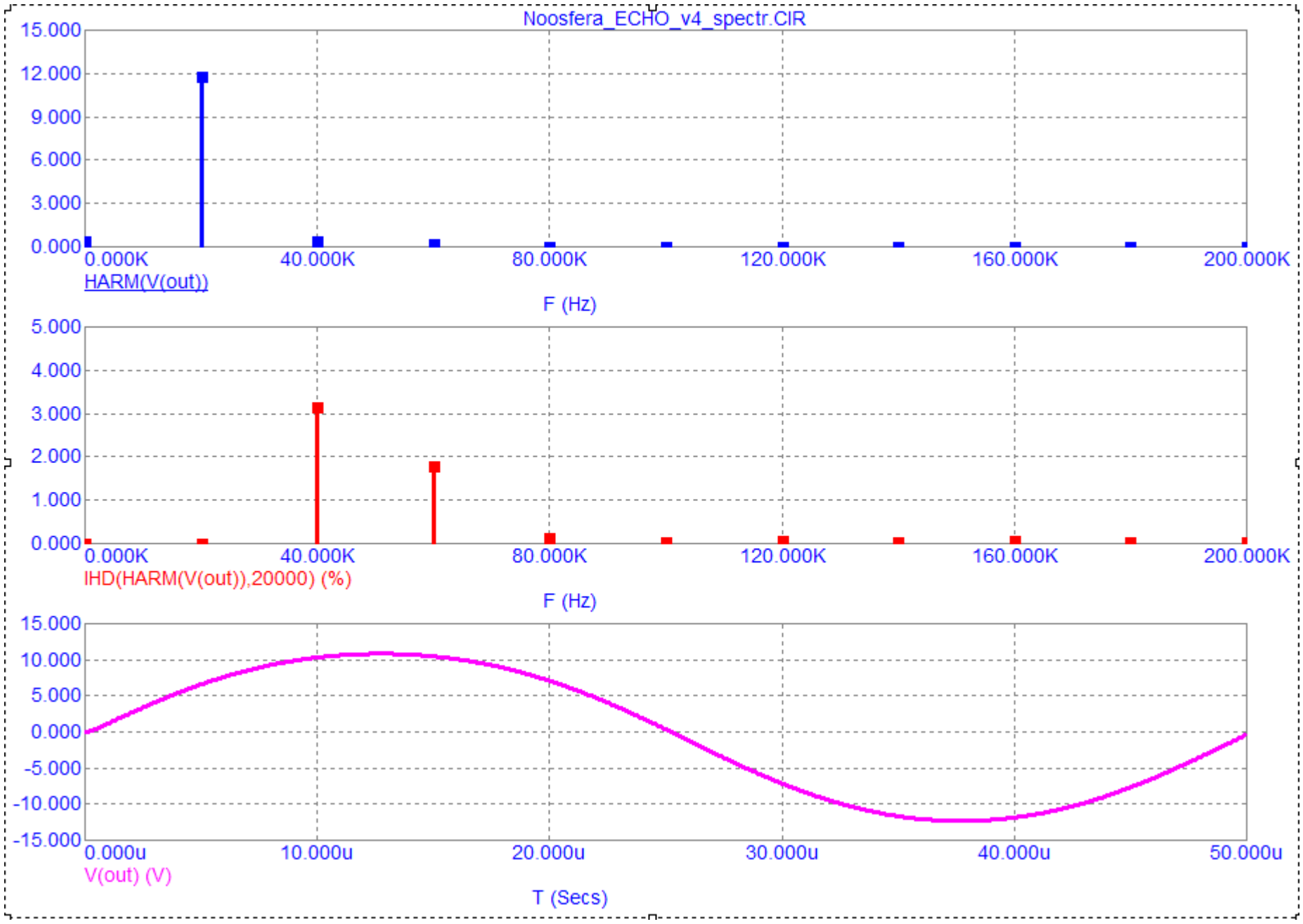


Рис. 5

Усилитель без ОООС, поэтому несмотря на относительно большое время задержки прохождения сигнала спектр первого периода мало отличается от последующих, т.е. от установившегося режима.

Посмотрим спектр гармоник на разных уровнях сигнала, рис. 6

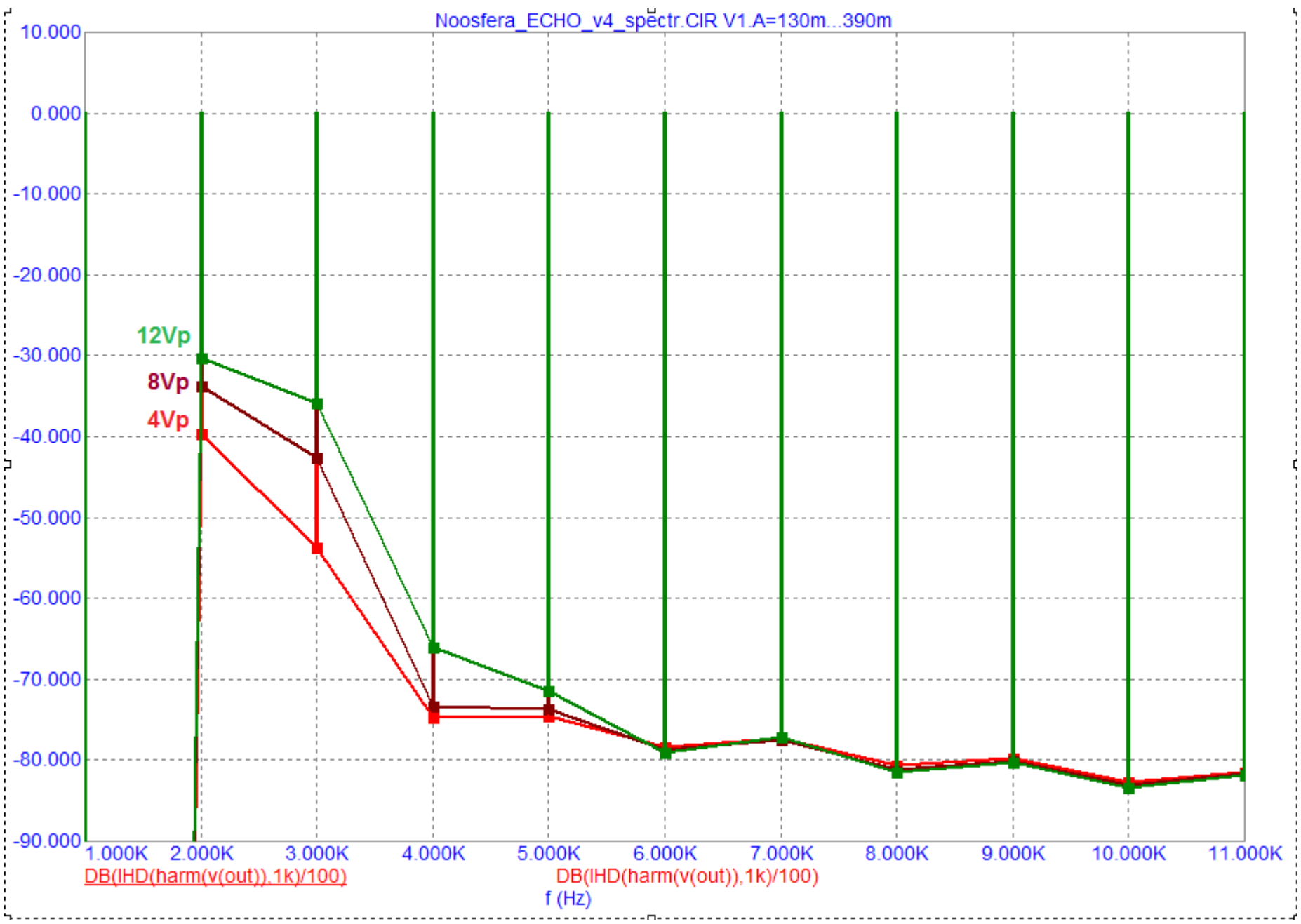


Рис. 6

Как видим высшие гармоники начиная с 4-й ниже уровня 2-й и 3-й гармоник на 30...40 дБ и более, спектр спадающий.

Снимем осциллограмму первого периода сигнала частотой 20 кГц, рис.7

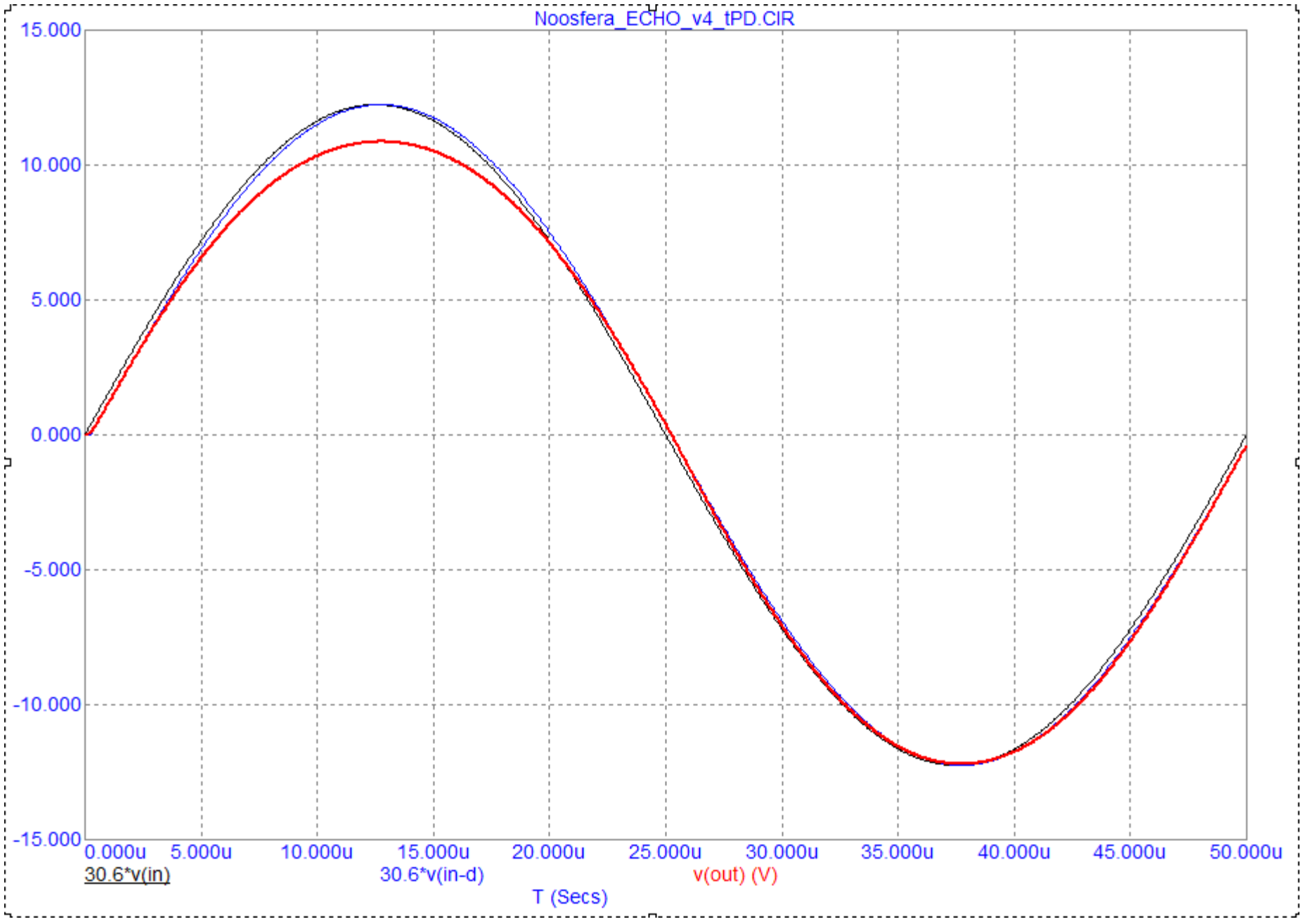


Рис. 6

Кроме выходного сигнала (красная) на график выведен входной сигнал (черная) и входной сигнал задержанный на время задержки прохождения (синяя) умноженные на Ку (30,6).

Чтобы посмотреть на поведение сигнала в самом начале посмотрим это место в растянутом виде, рис. 7. Желтым цветом выделены искажения которые отсутствуют на втором и последующих периодах. Поэтому измерения Кг в установившемся режиме строго говоря ни о чем, так, для справки, не более. В усилителях с ОООС такой сигнал возвращается обратно на вход и сравнивается с входным сигналом без задержки вызывая дополнительные искажения. В данном усилителе эти проблемы исключены.

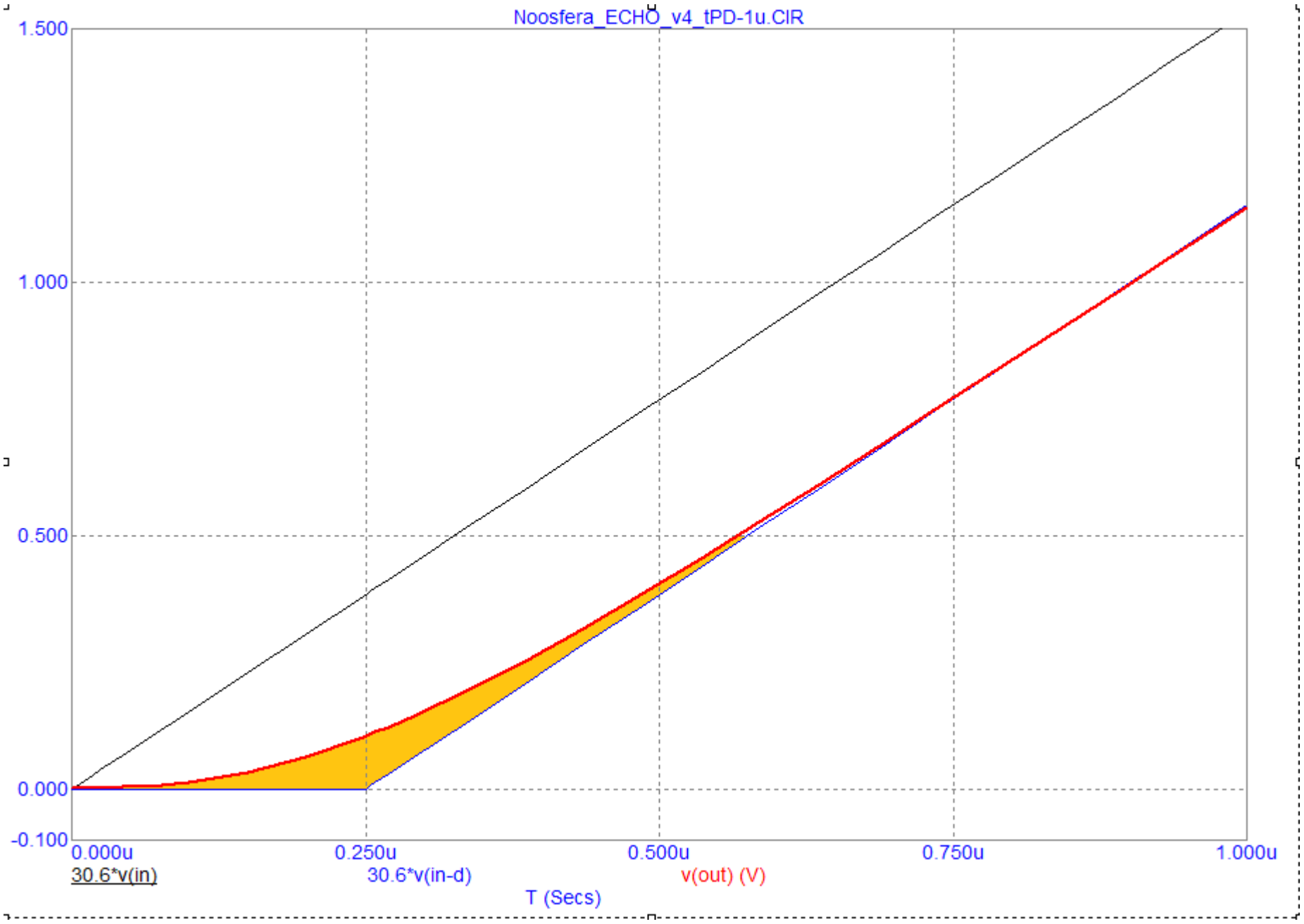


Рис. 7

Из рисунка 7 видно что время выхода на установившийся режим чуть больше удвоенного времени задержки прохождения сигнала, выход плавный, без звона и перелета. Это согласуется и с плавным спадом ГВЗ выше 500 кГц (рис. 3). Такое поведение гарантирует хорошие переходные характеристики на импульсных сигналах.

Проверим усилитель на коммутационные искажения, рис. 8

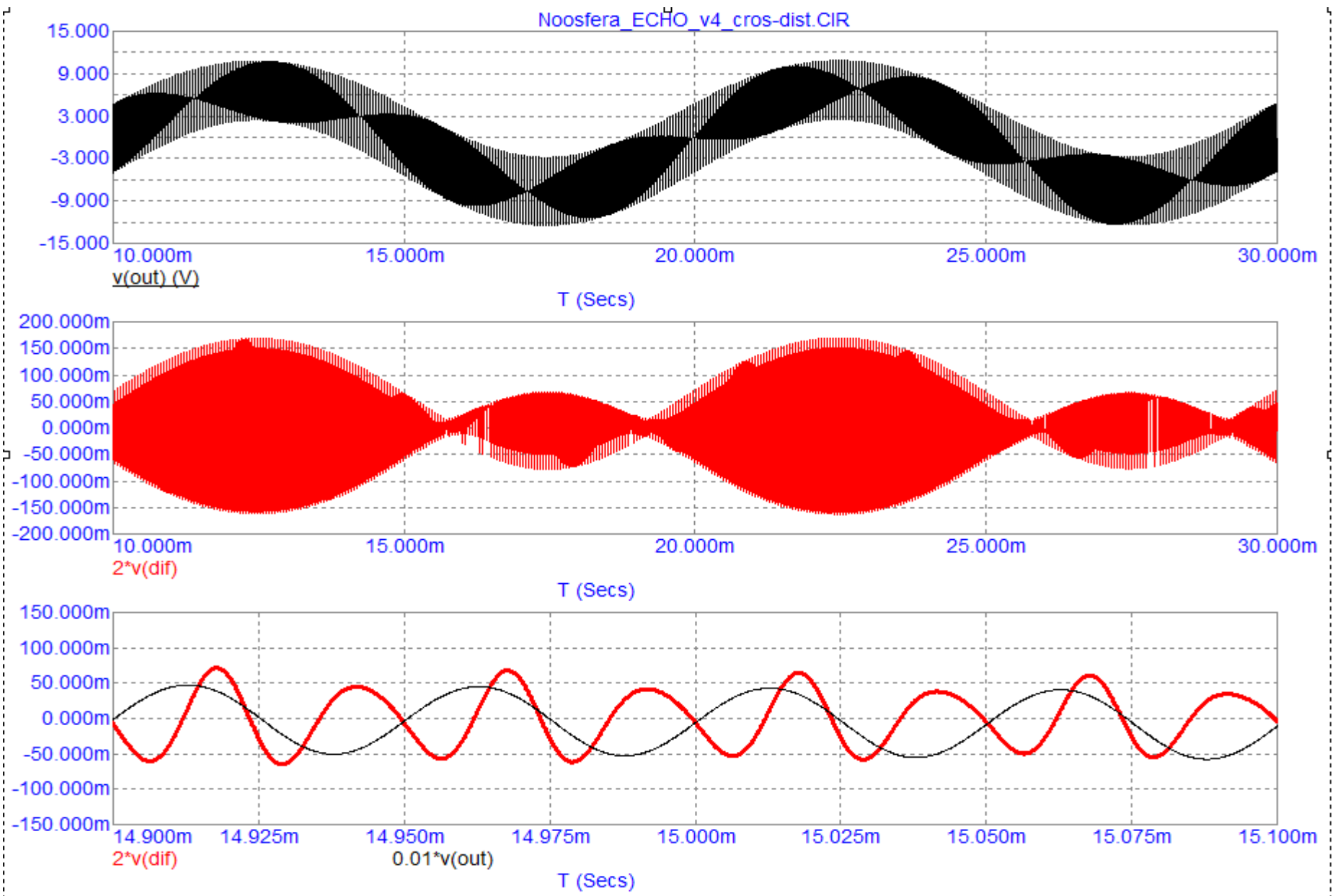


Рис. 8

На второй осциллограмме выведены продукты искажений. Видно что на положительной полуволне значительно больший уровень искажений. На третьей осциллограмме выведен участок искажений при переходе через ноль (красная) а также выходной сигнал ослабленный в 100 раз (черная). Как видим в спектре полностью отсутствует и намек на коммутационные искажения, преимущественно 2-я гармоника.

На всякий случай проверим усилитель на ИМИ, рис. 9

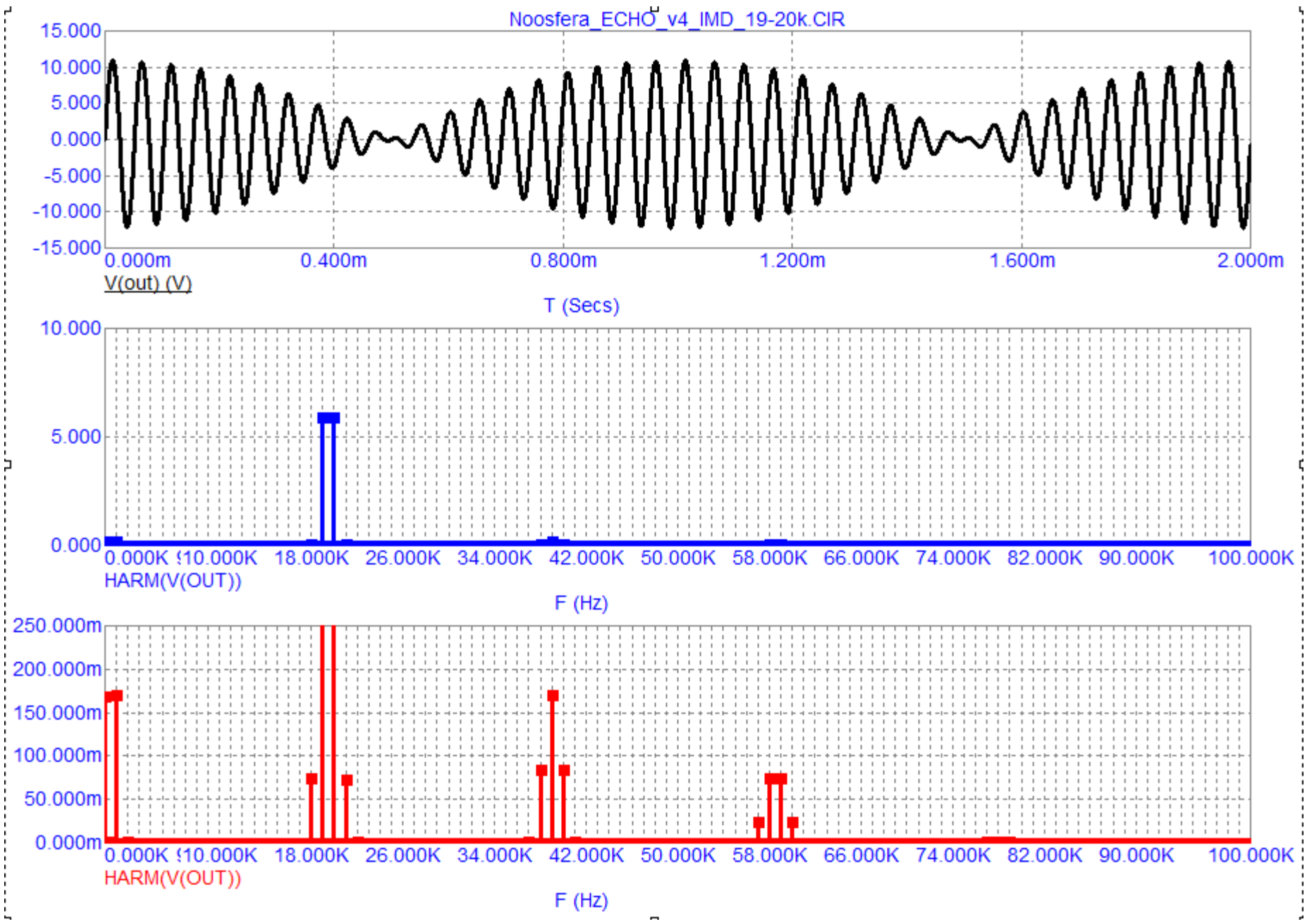


Рис. 9

В спектре ИМИ видим 1 кГц уровнем 170 мВ что от 12 В(пик) составляет 1,4 %. В звуковой полосе нет шумовой подставки от высших продуктов интермодуляции.

Авторы разработки позиционируют усилитель как однотактный. На самом деле усилитель с двухтактным выходным каскадом. Каждое плечо входного ДК управляет своим плечом ВК. Входное плечо ДК управляет нижним плечом которое работает в режиме с общим истоком (ОИ). Второе плечо управляет верхним плечом ВК через каскад с общей базой Q2 (рис. 2).

Чтобы разобраться в работе усилителя сняты токи плеч ВК модели рис. 10

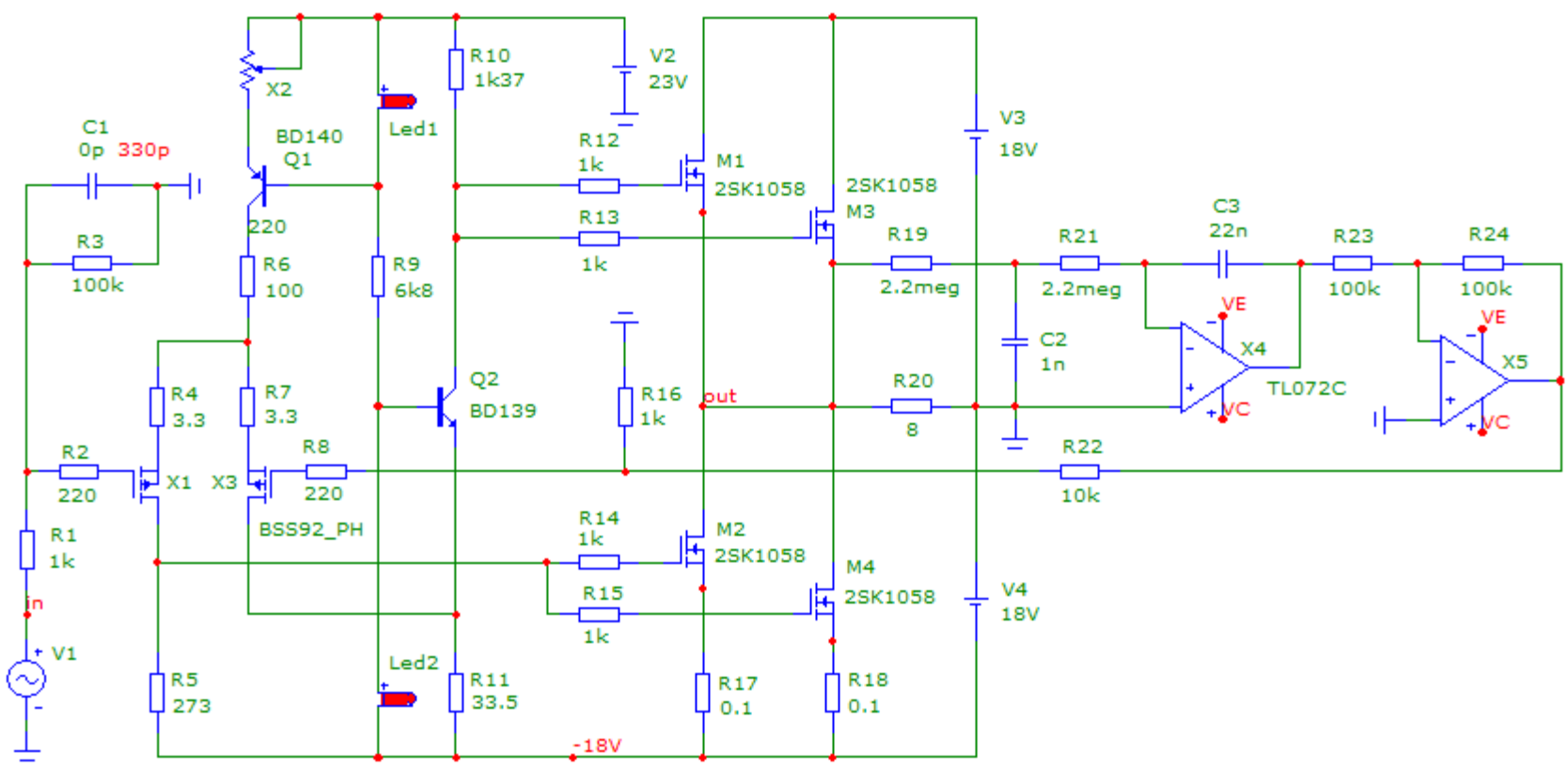


Рис. 10

Токи плеч ВК на нагрузке 8 Ом показаны на рис. 11

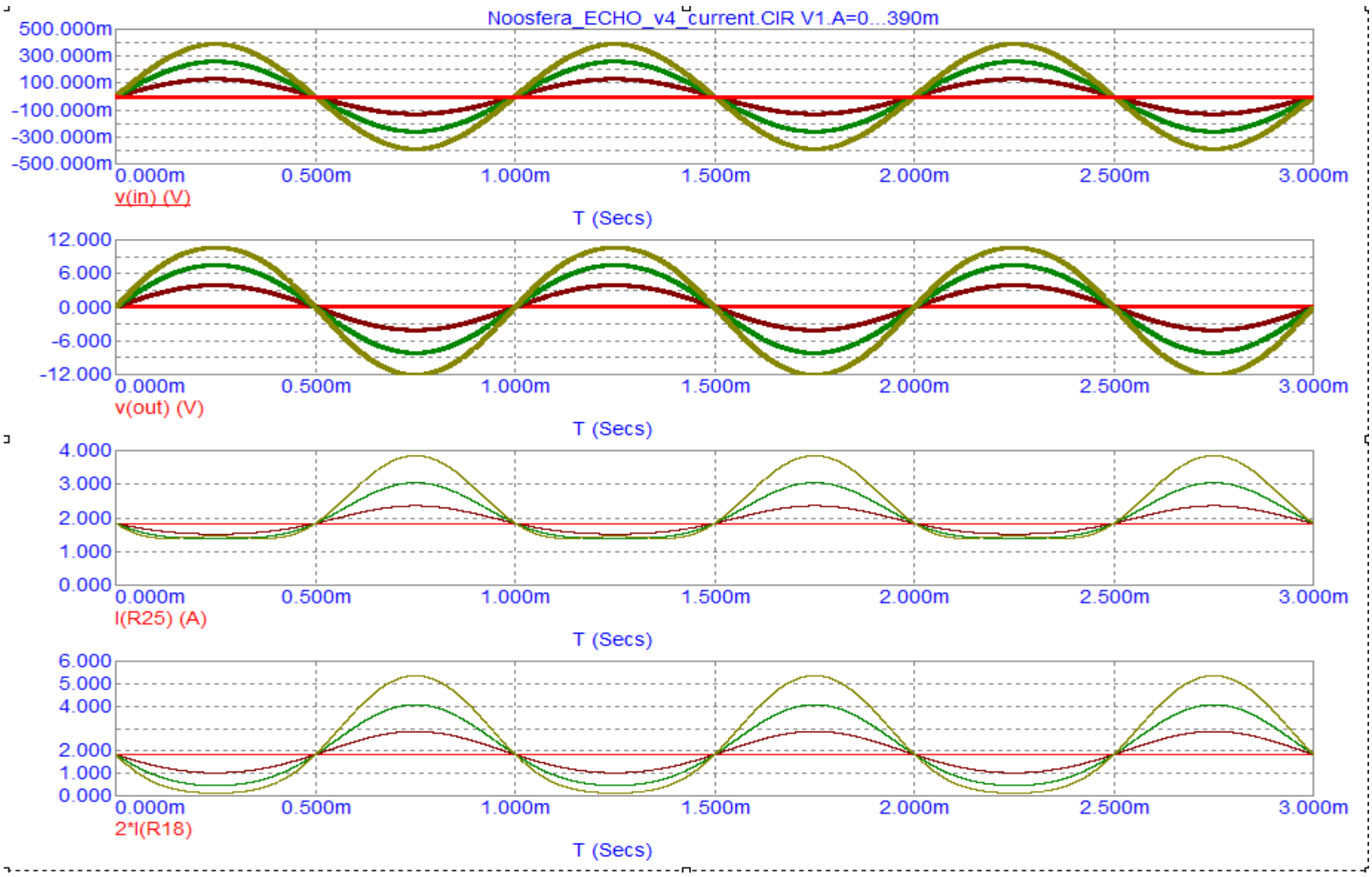


Рис. 11

В отсутствие сигнала на осциллограммах 3 и 4 мы видим ток покоя плеч около 2 А (красная). По мере роста входного напряжения видим что на положительной полуволне ток нижнего плеча падает и снижается практически до нуля что характерно для усилителей класса А. При этом верхнее плечо с небольшой просадкой отдает ток в нагрузку. На отрицательной полуволне мы видим рост тока обоих плеч из-за гипертрофированного усиления нижнего плеча. Помимо тока в нагрузку ниженее плечо отдает значительный ток и в верхнее плечо (в несколько раз больший чем в нагрузку), по сути «насилует» его. Таким образом достигнута гармонизация сигнала. Однако благодаря отсутствию ОООС нет расширения спектра и такой характер усиления положительно сказывается на усилении звукового сигнала, придает звуку «ламповость». Такой звук нравится людям склонным к вкусовщине.

Дополнительно снимем зависимость Кг и спекра от частоты, рис. 12

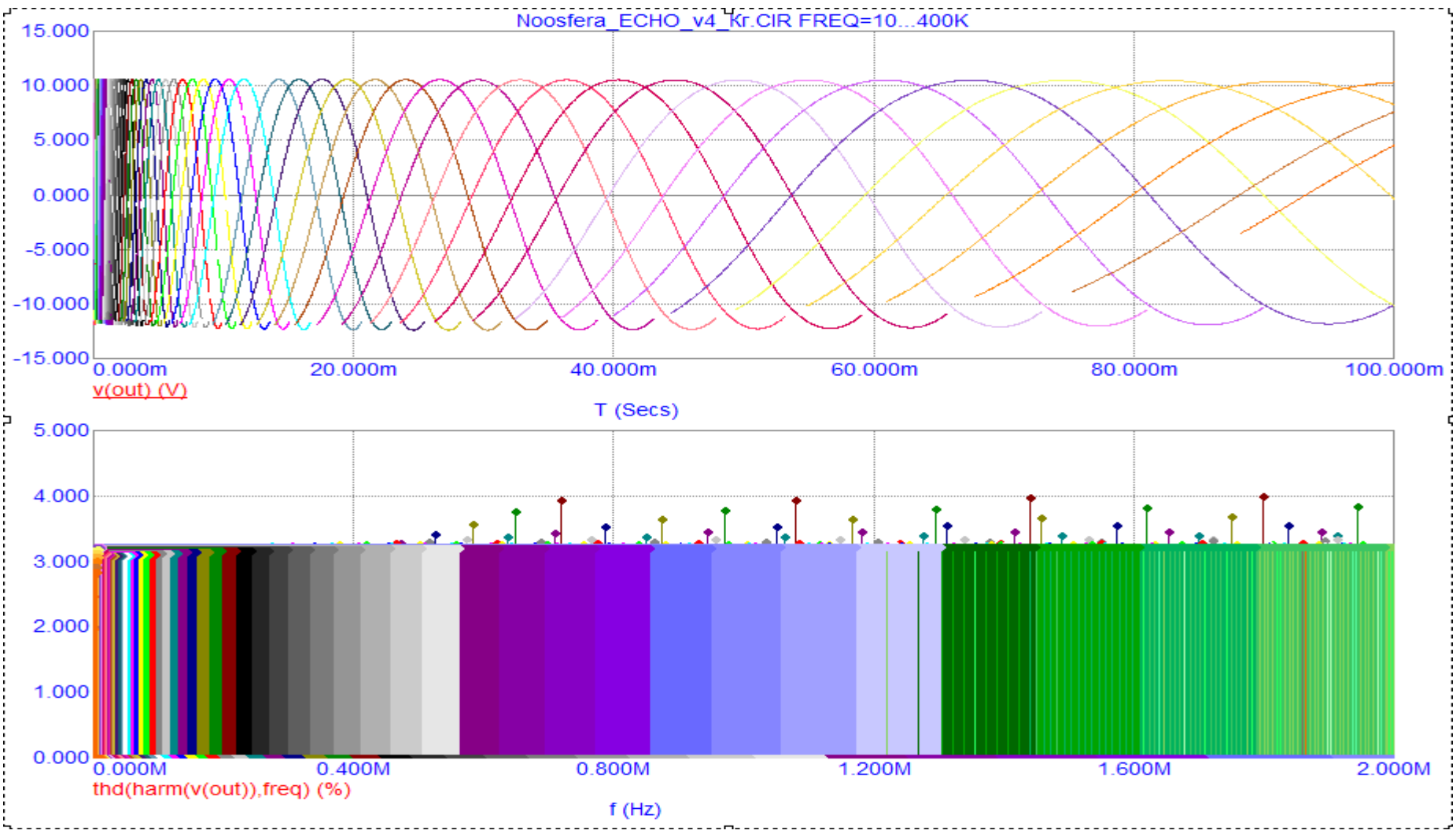


Рис. 12

Из рисунка 12 видно что отдельные спектральные составляющие достигают 4%.

Зависимость Кг от частоты приведена на рис. 13

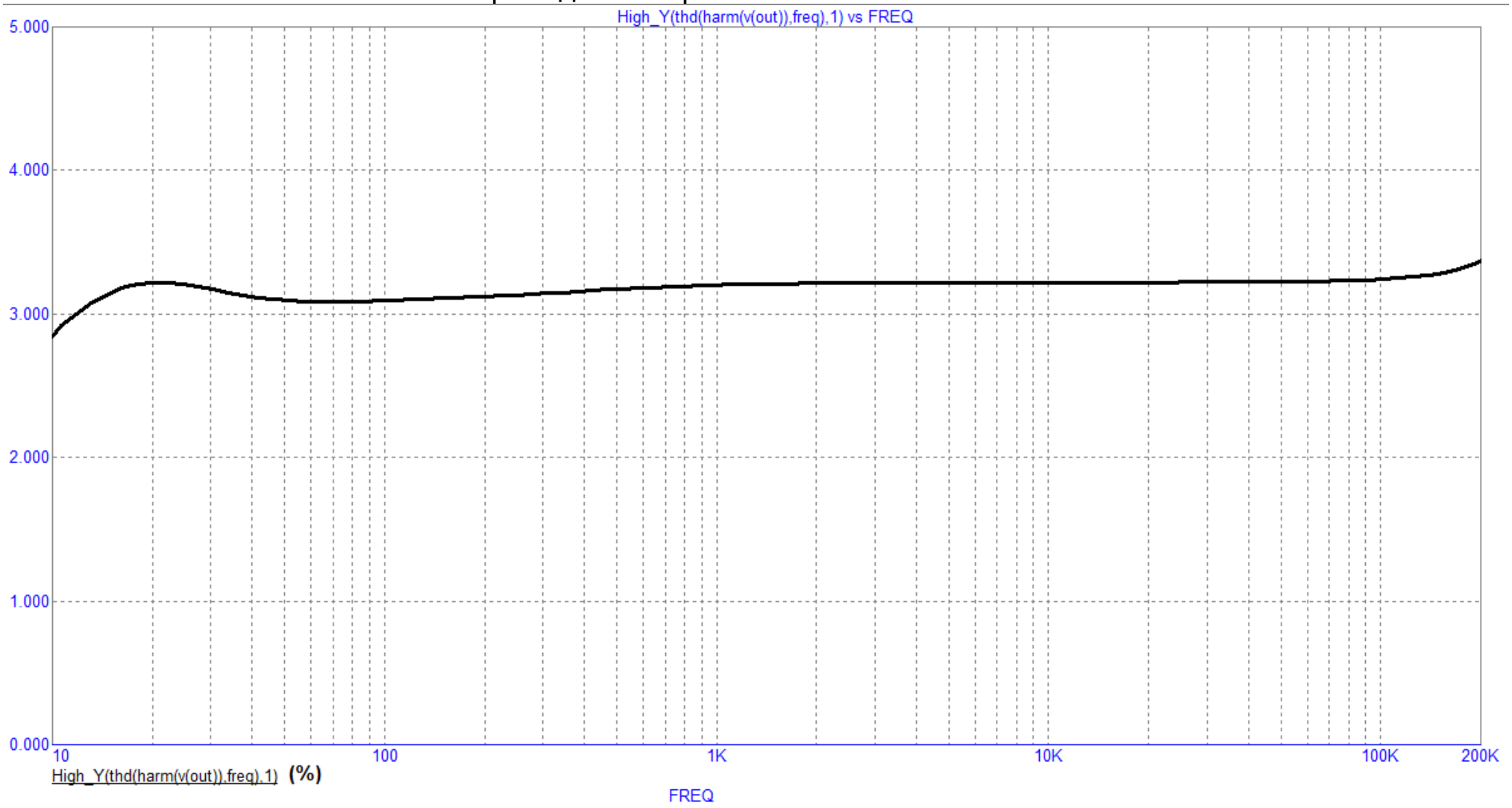


Рис. 13

Из рисунка 13 видно что Кг практически постоянно до 200 кГц и чуть выше 3%, но в спектре преимущественно низшие гармоники (2-я и 3-я).

В авторской ветке я приводил несколько вариантов симметрирования плеч ВК. Один из возможных вариантов приведен на рис. 14. Как видно из схемы увеличено сопротивление резистора R26 и параллельно ему включен ГСТ на ток 10 мА (так чтобы сохранить прежний режим по постоянному току). Таким образом увеличено сопротивление нагрузки каскада ОБ Q2 и тем самым выравнено усиление верхнего плеча с нижним. Правда такой вариант повышает и чувствительность усилителя. Одновременно увеличена емкость конденсатора С3 для уменьшения влияния сервоконтроля в области НЧ.

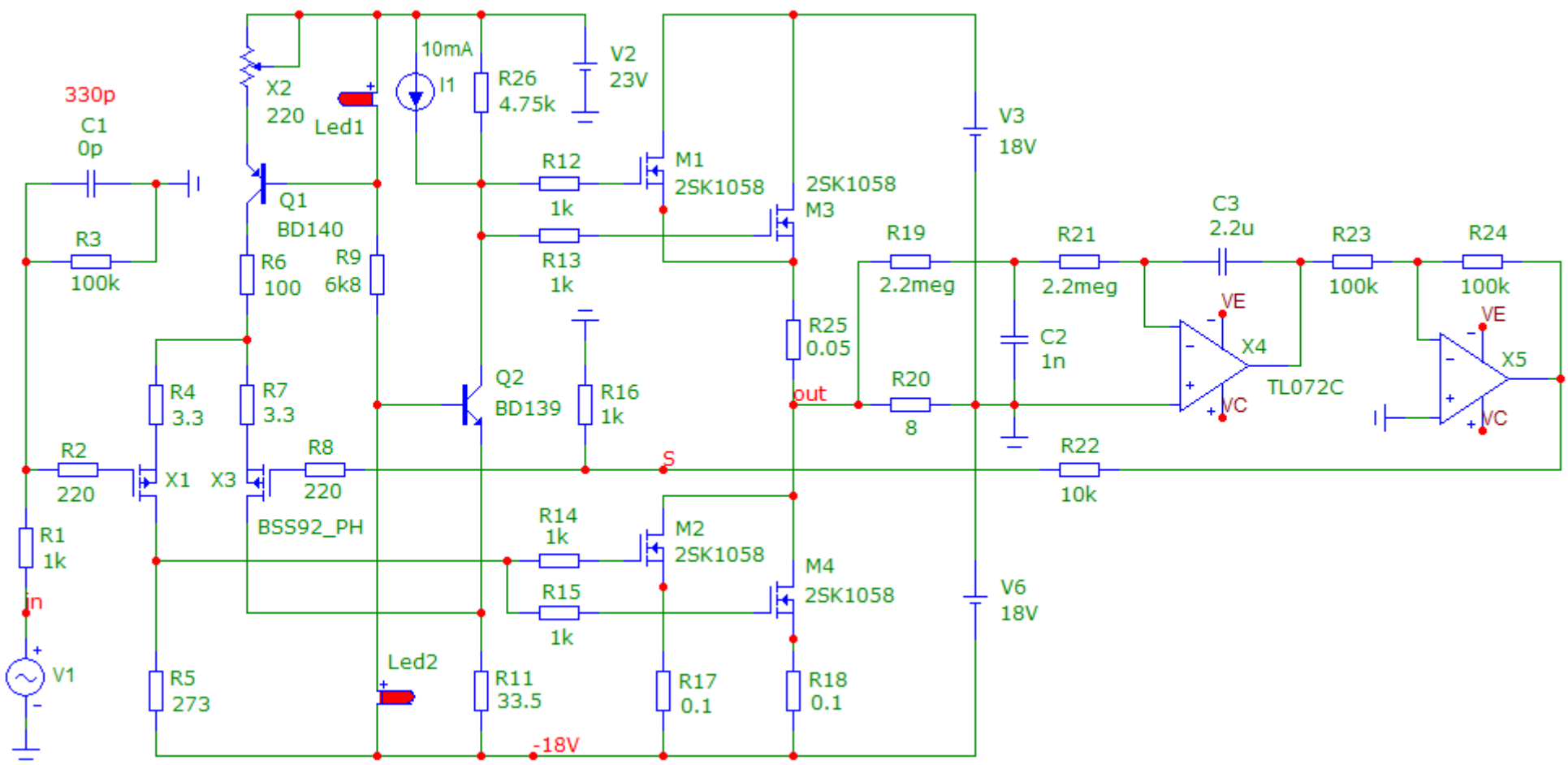


Рис. 14

Токи плеч приведены на рис. 15

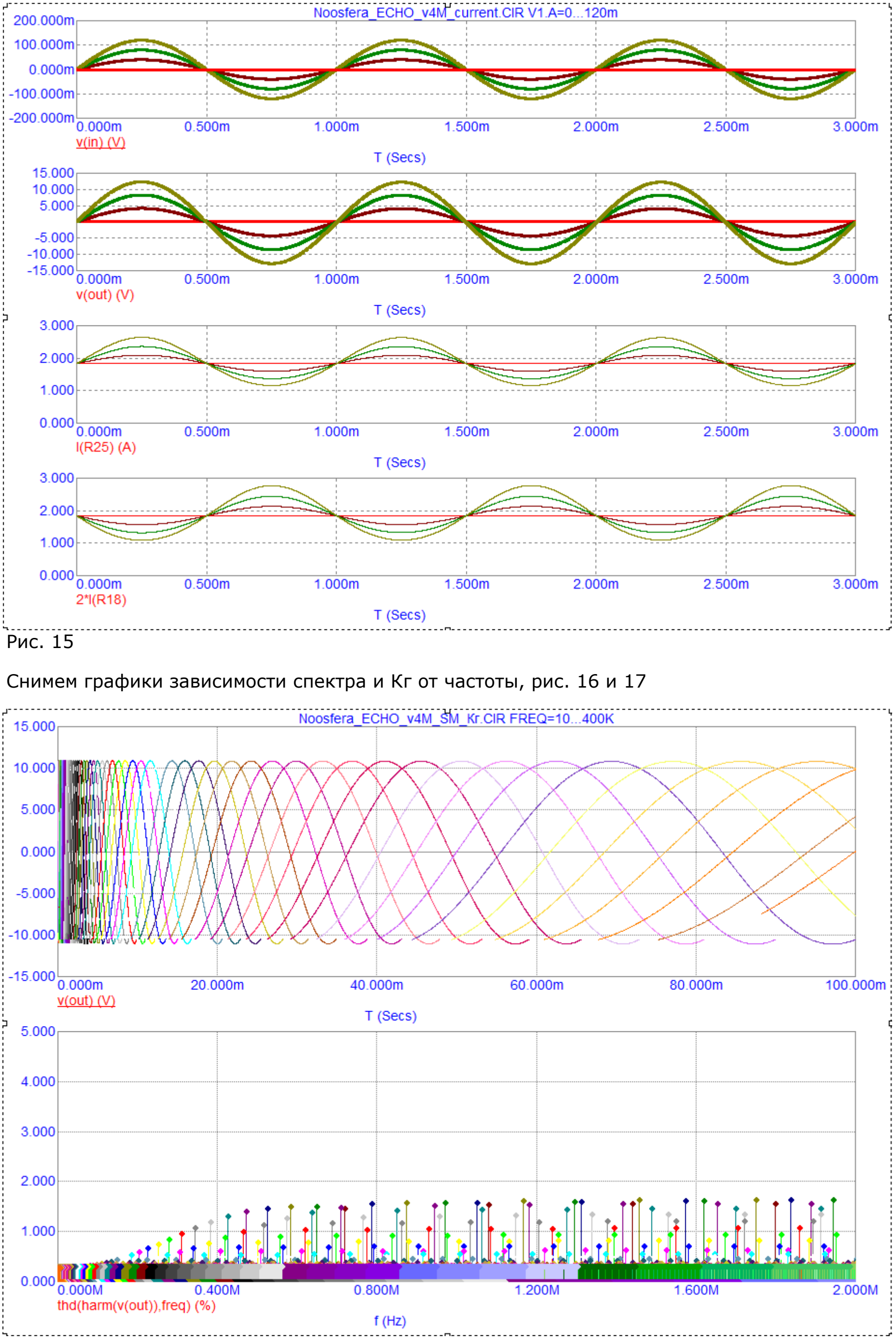


Рис. 15

Снимем графики зависимости спектра и Кг от частоты, рис. 16 и 17

Рис. 16

Из результата просчета спектрального анализа видно что полуволны сигналов выровнялись (верхние осциллограммы), амплитуды высших гармоник чуть более 1,5% (до доработки достигали 4%)

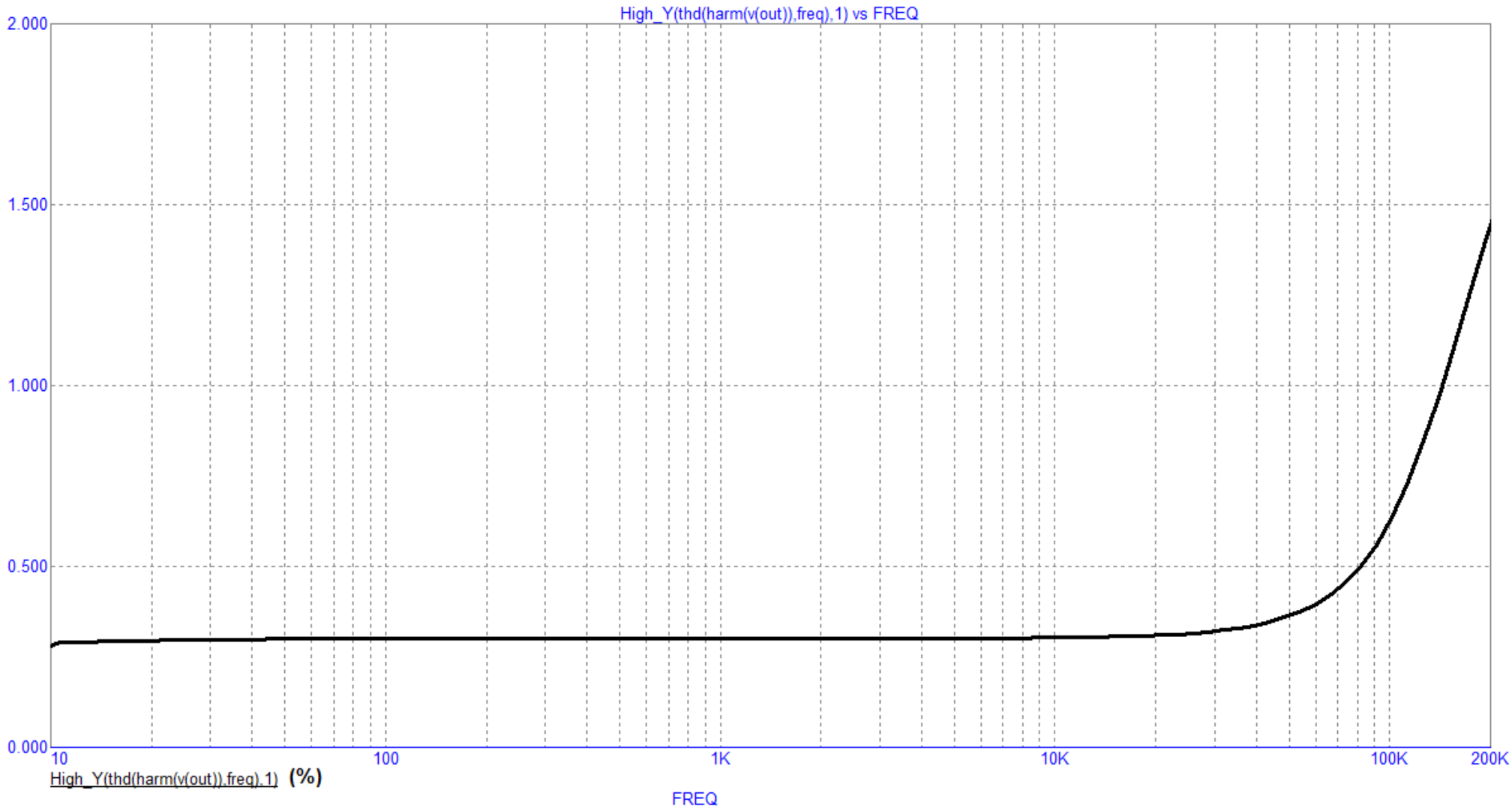


Рис. 17

Из рисунка 17 видно что Кг во всем диапазоне звуковых частот снижен более чем на порядок, рост Кг начинается выше 50 кГц и достигает почти 1,5% на частоте 200 кГц.

Примечания.

Параметры моделей снимались без конденсатора радиочастотного фильтра С1.

Время задержки прохождения сигнала можно уменьшить примерно вдвое уменьшив входной резистор с 1 кОм до 100 Ом при условии что и источник сигнала имеет низкое выходное сопротивление (не более 100 Ом).

Так как вход не балансный, то имеет смысл зашунтировать резистор R15 (рис.2) емкостью 100 нФ. Это также способствует росту быстродействия и снижению задержки прохождения сигнала.

Практика подтверждает что уменьшение задержки прохождения сигнала положительно влияет на повышение качества звука хоть и незначительно отражается на просчете спектров и Кг, рис. 18.

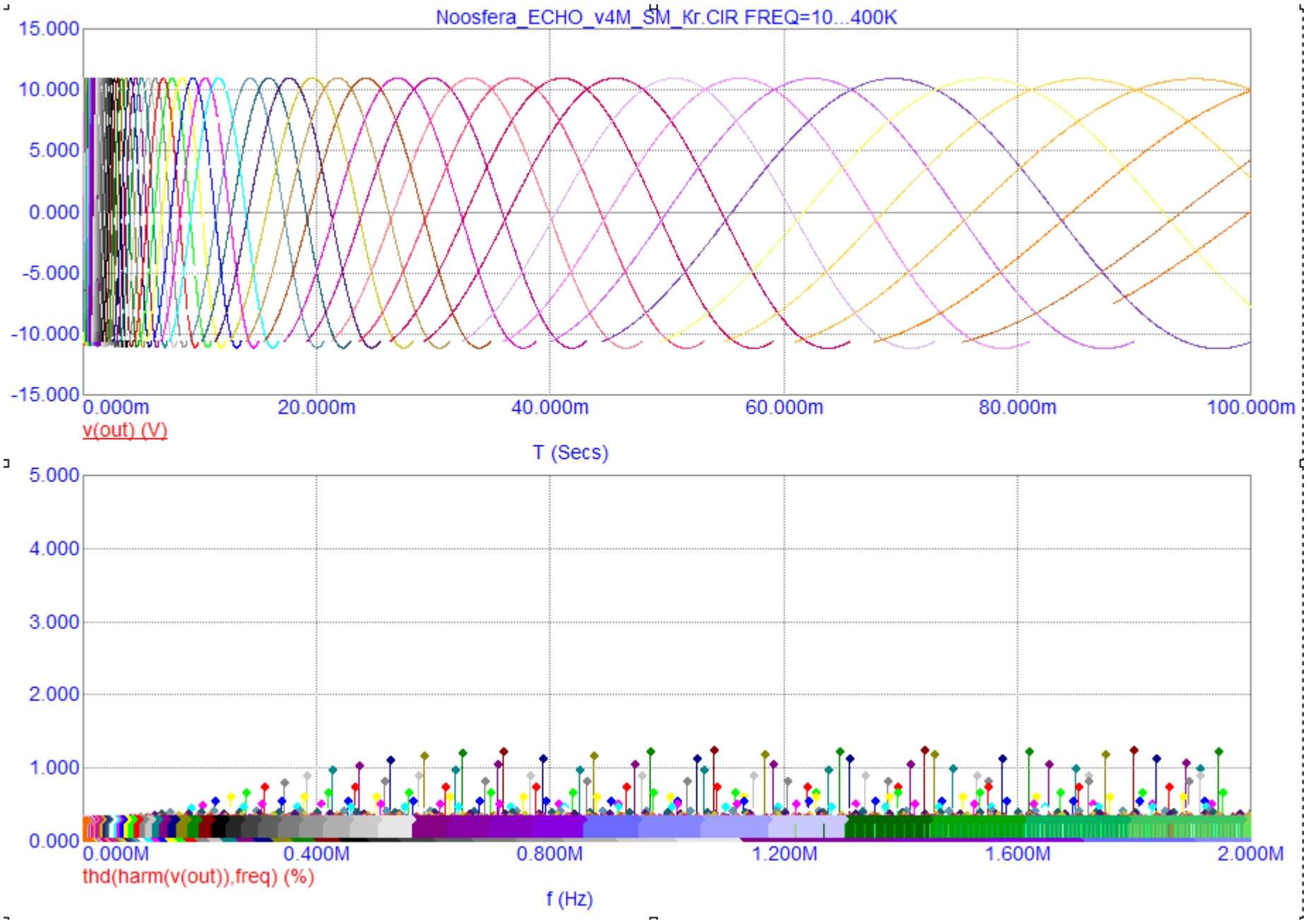


Рис. 18

Краткий анализ провел
Александр Петров

Литература

1. В.Алексеев, И.Виноградский, Высококачественный УМЗЧ на полевых транзисторах в режиме класса А, Радио 2009-07
2. Даниэль Х. Чивер, Дипломная работа, перевод А.Гурского
3. Е.Карпов, Гибридный мир, ч.1