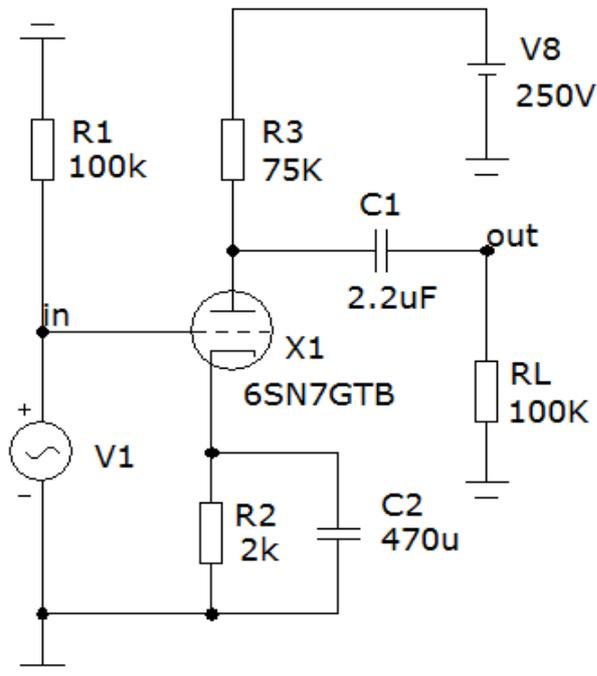


## 2-я гармоника простейшего лампового УН

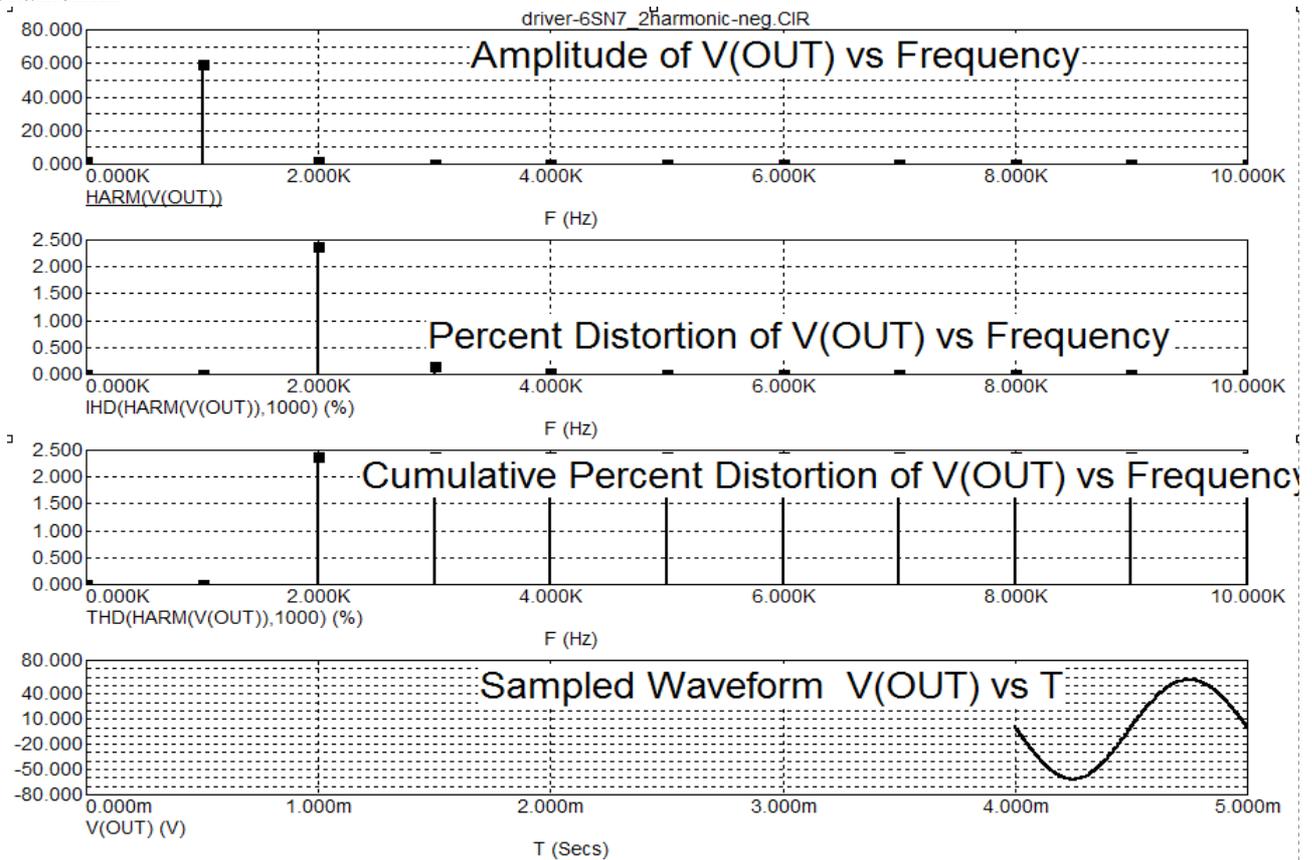
Как говорит hippo64 схема УН рисуется за 5 минут, за полчаса макетируется, а дальше экспериментировать с режимами пока не получишь тот звук который устраивает применительно к своему ВК и АС.

Вот и я решил взять простейший ламповый каскад и поэкспериментировать с его режимами:

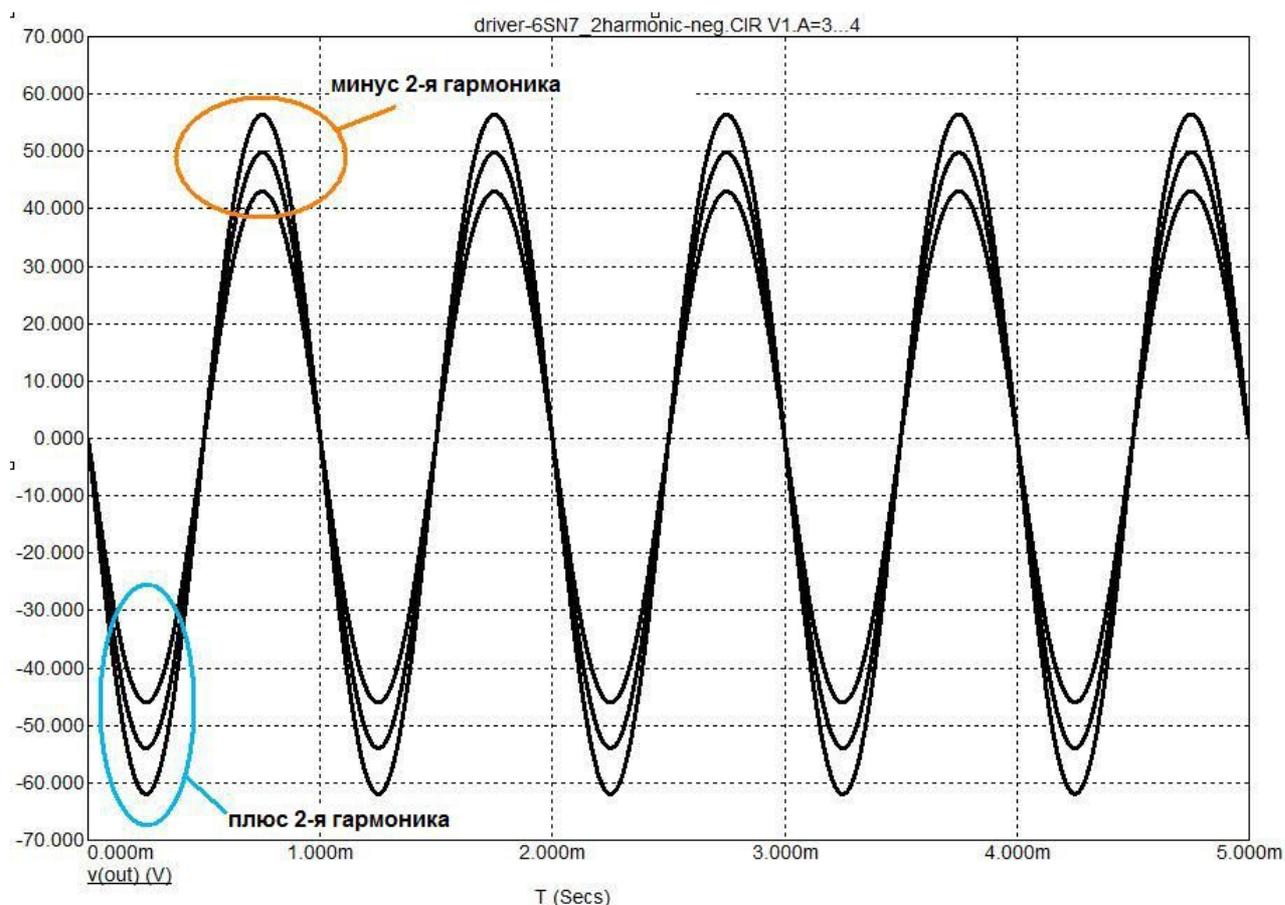


полоса пропускания такого УН около 4 МГц, поэтому говорить о каком либо фазовом сдвиге 2-й гармоники для всех звуковых частот не имеет смысла.

Искажения



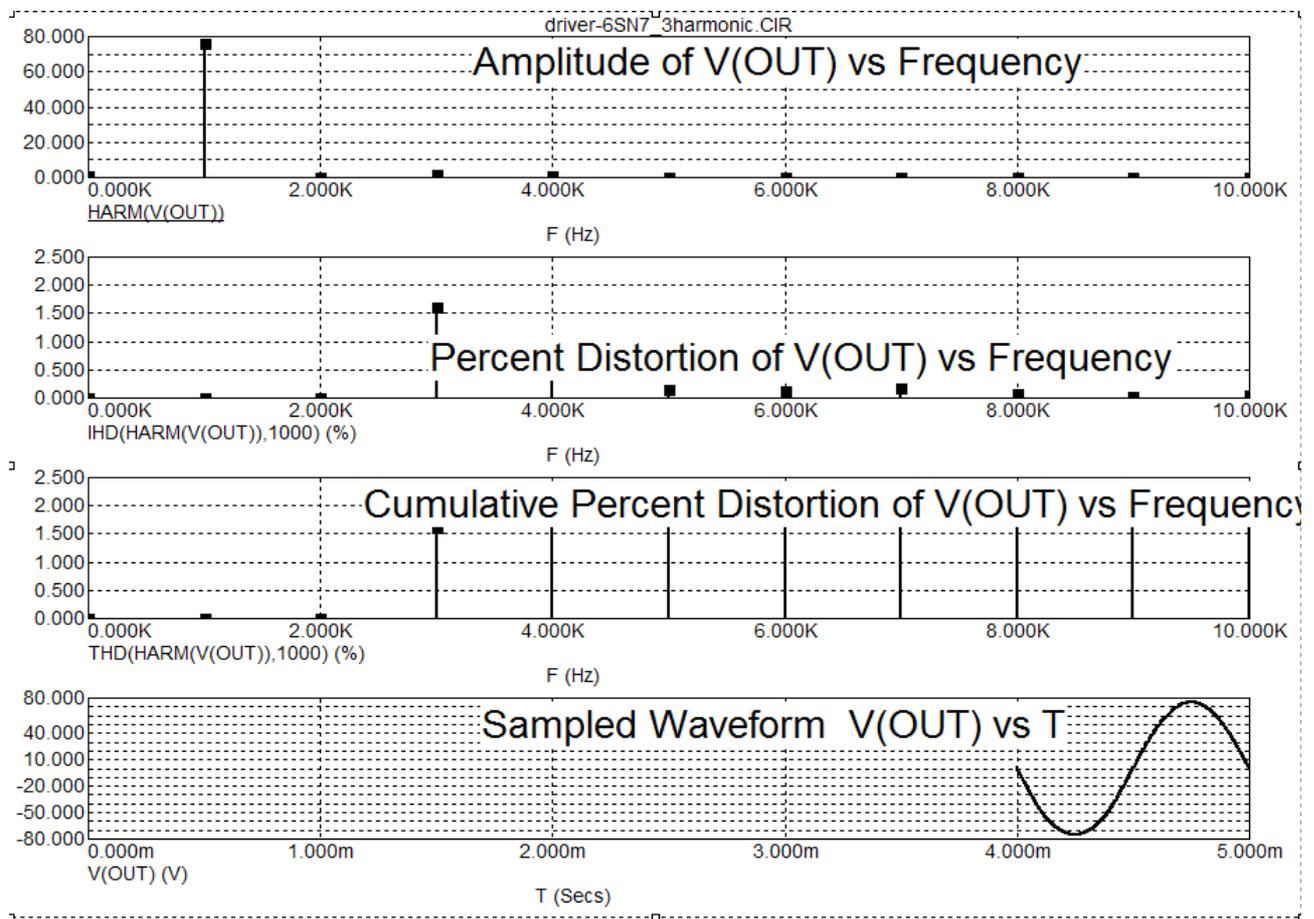
на рисунке представлены искажения такого УН при выходном напряжении 60 В (пик). Как видно из рисунка в спектре практически одна 2-я гармоника уровнем 2,4% ближайшая 3-я гармоника имеет уровень всего 0,15%, остальные гораздо меньше. Чтобы разобраться с какой полувоной совпадает полуволна 2-й гармоникой обратимся к амплитудной характеристике



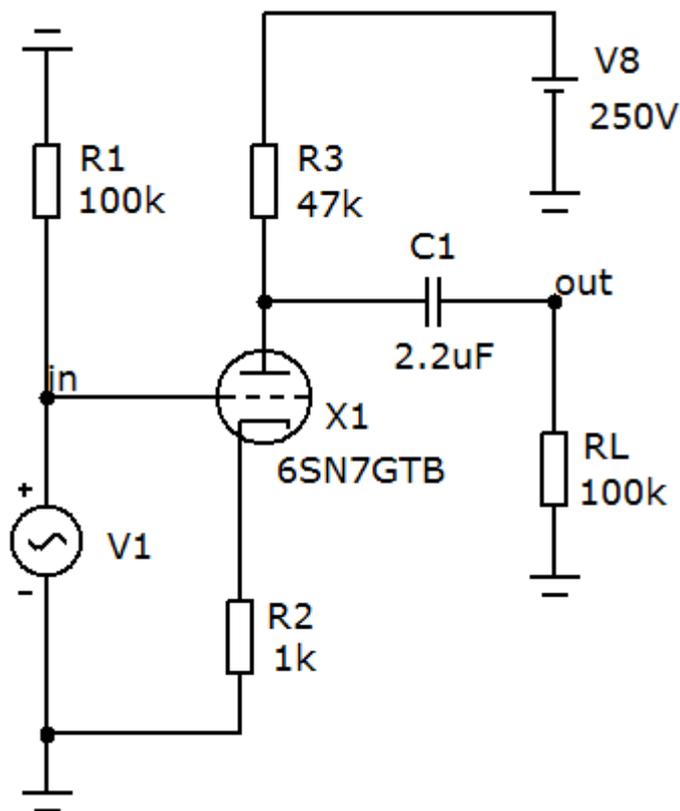
из оциллограмм четко видно что отрицательная полуволна вытянута (отрицательная полуволна 2-й гармоникой совпадает с отрицательной полувоной основной), а положительная — приплюснута (полувоны в противофазе).

А теперь поиграем режимами и нагрузкой...

этот вариант имеет следующие искажения

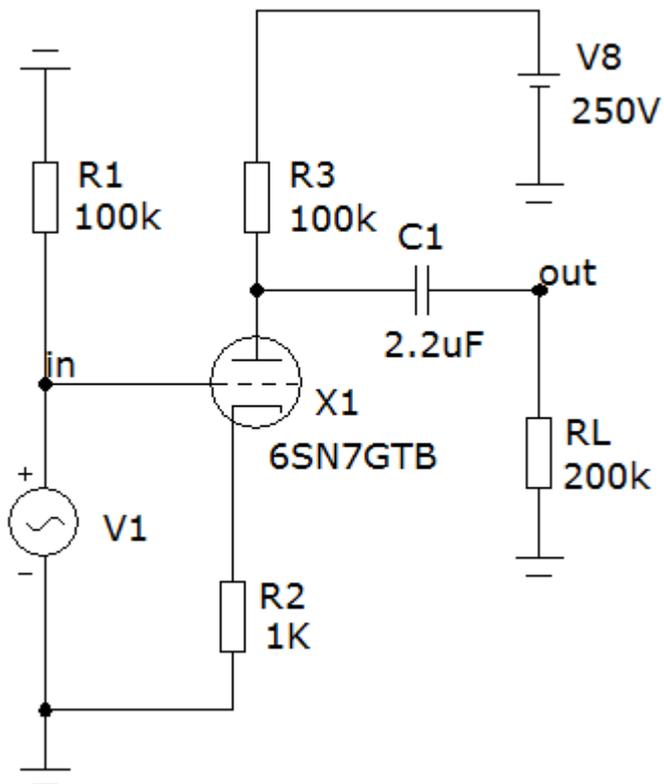


из спектра искажений видно что в таком варианте 2-я гармоника практически отсутствует (скомпенсирована, причем подавлена без каких либо противофазных сигналов), а присутствует

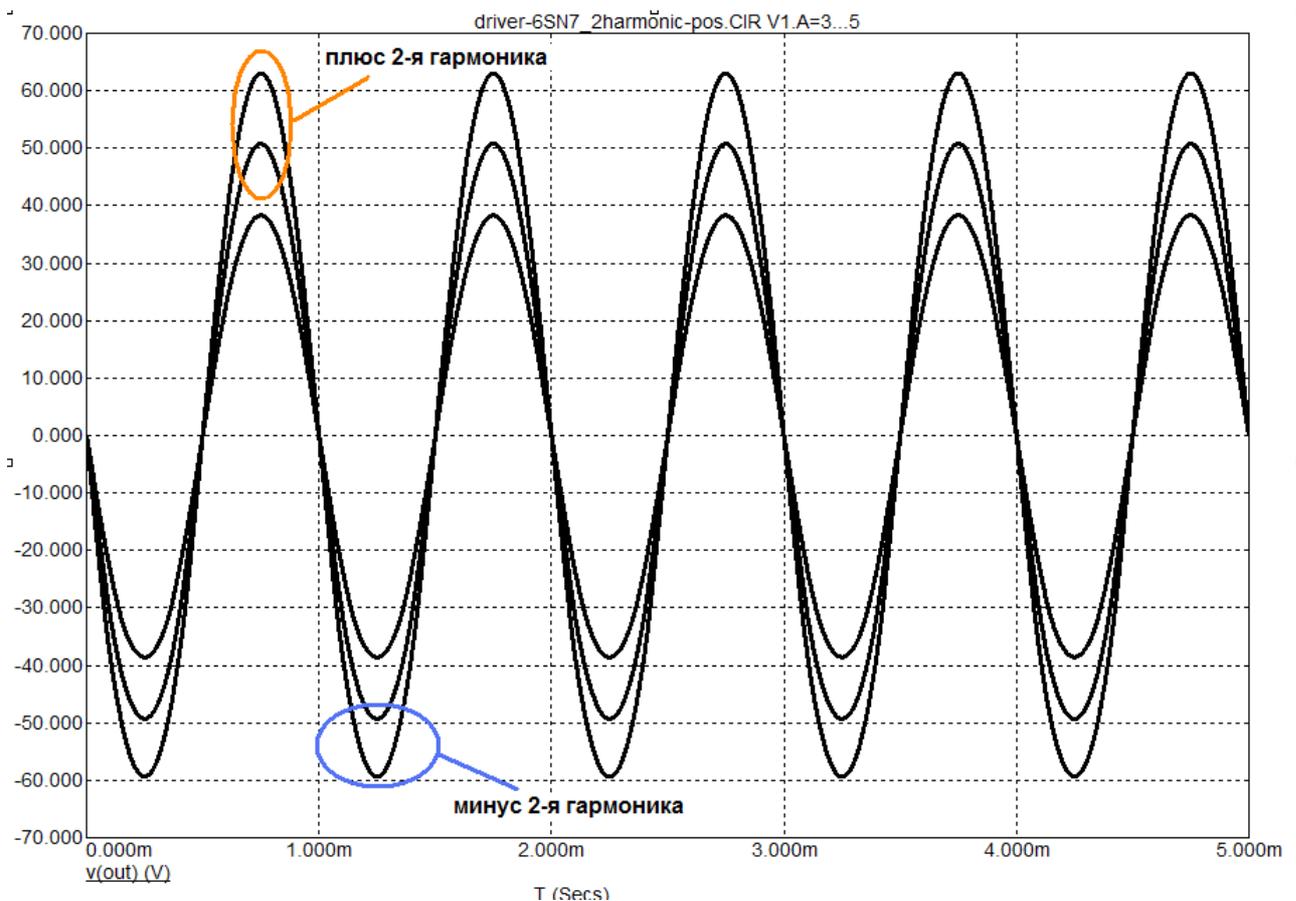


преимущественно 3-я гармоника уровнем 1,6%.

Ну и наконец попытаемся перегнуть 2-ю гармонику в противоположную полуволну основного сигнала. Оказывается и это в какой-то мере возможно.

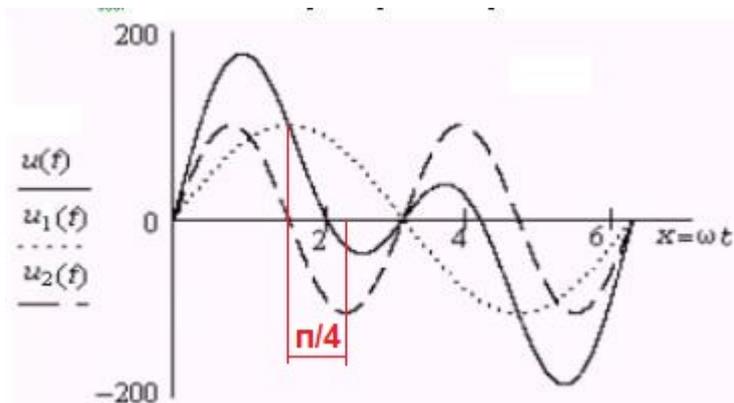


Амплитудная характеристика такого варианта имеет следующий вид



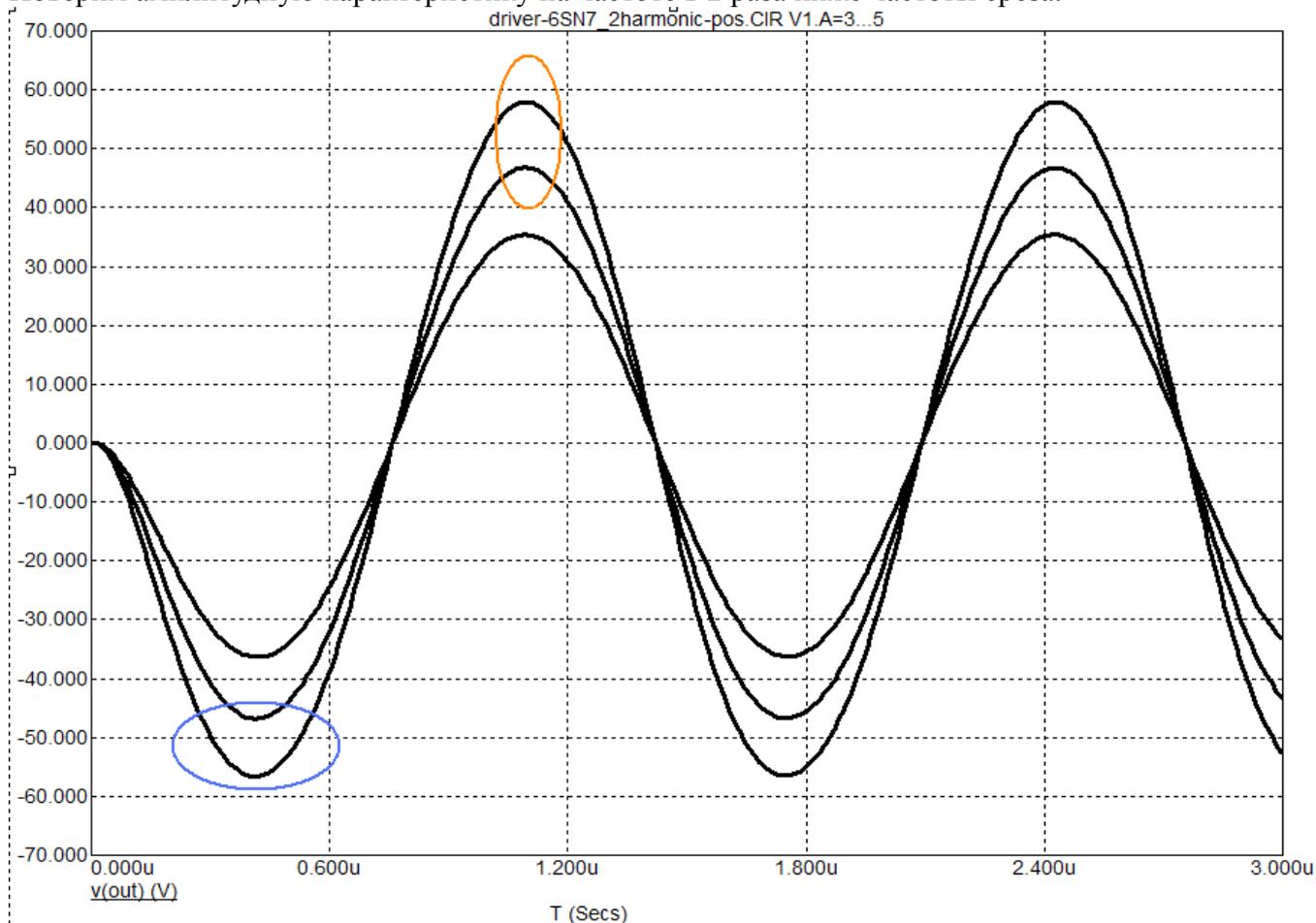
как видим в таком варианте вытянуты положительные полуволны основного сигнала, а отрицательные наоборот приплюснуты.

Что касается примера audiomun <http://forum.vegalab.ru/showthread.php?t=67498&page=105>



Из рисунка видно что 2-я гармоника сдвинута относительно основного сигнала на  $45^\circ$ . Как известно сдвиг фазы на 45 градусов имеет место на частоте среза, если наклон АЧХ соответствует 6 дБ на октаву. Последний вариант каскада имеет частоту среза 1,5 МГц.

Проверим амплитудную характеристику на частоте в 2 раза ниже частоты среза.



Как видим и на частоте 750 кГц сохраняется тот же характер искажения формы сигнала как и в звуковом диапазоне, так как вместе с запаздыванием второй гармоники запаздывает и основной сигнал. Никакого перекоса синусоиды мы не наблюдаем.

Искажения формы сигнала происходят в усилителях с ООС, когда на входе суммируется исходный сигнал и задержанный сигнал ОС со сдвинутыми по фазе гармониками (особенно если они с «квадратными трехчленами» как говорит fakil). Отсюда и рост высших гармоник.

19 августа 2016 г.  
Александр Петров

p.s.

Проверим возможность компенсации второй гармоники путем последовательного включения двух одинаковых каскадов. Для этого возьмем первую схему с уровнем 2-й гармоники 2,4% и включим последовательно два каскада. Для того чтобы сохранить коэффициент передачи 23,5 дБ, после пегого усилителя включим аттенюатор с ослаблением 23,5 дБ.

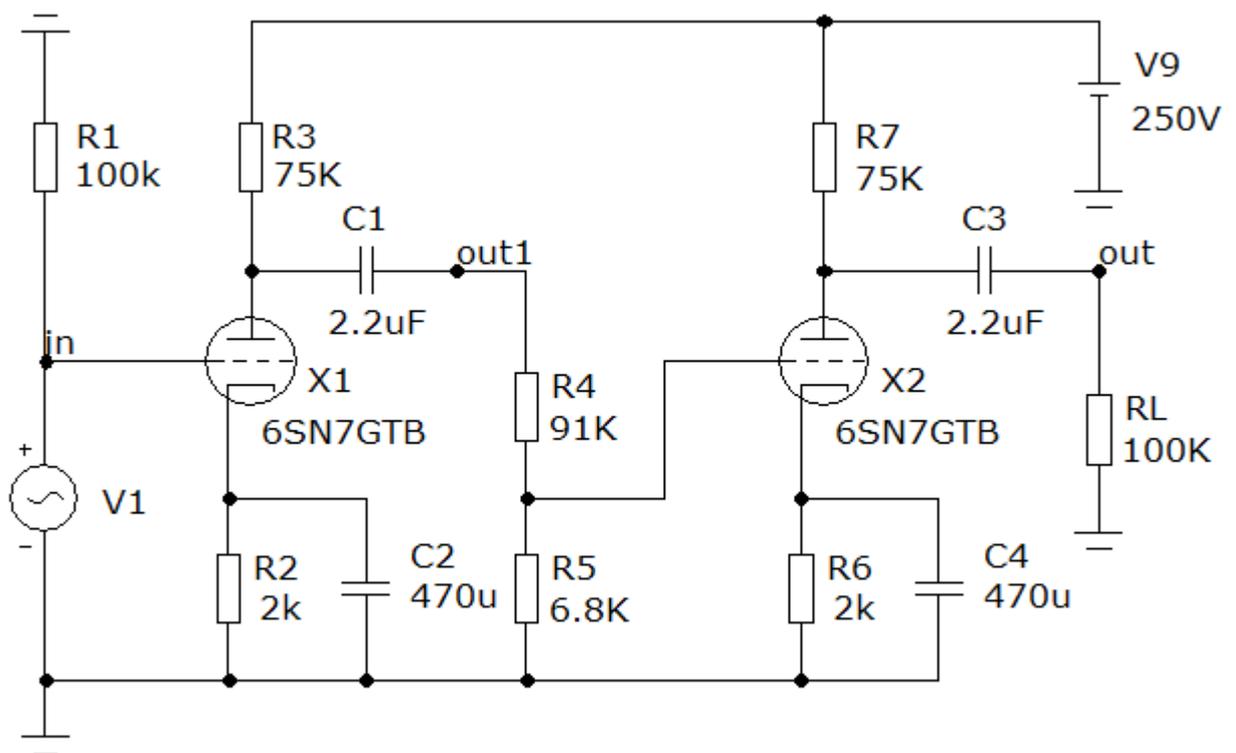
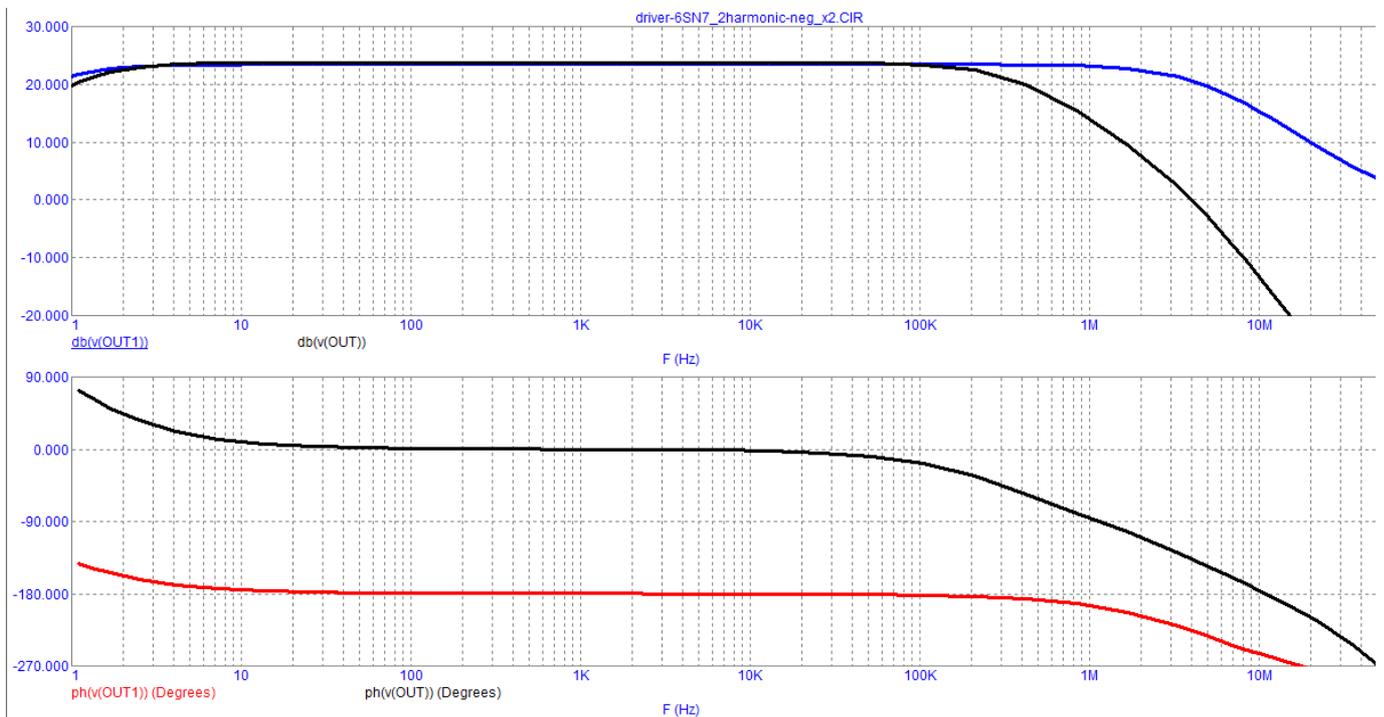
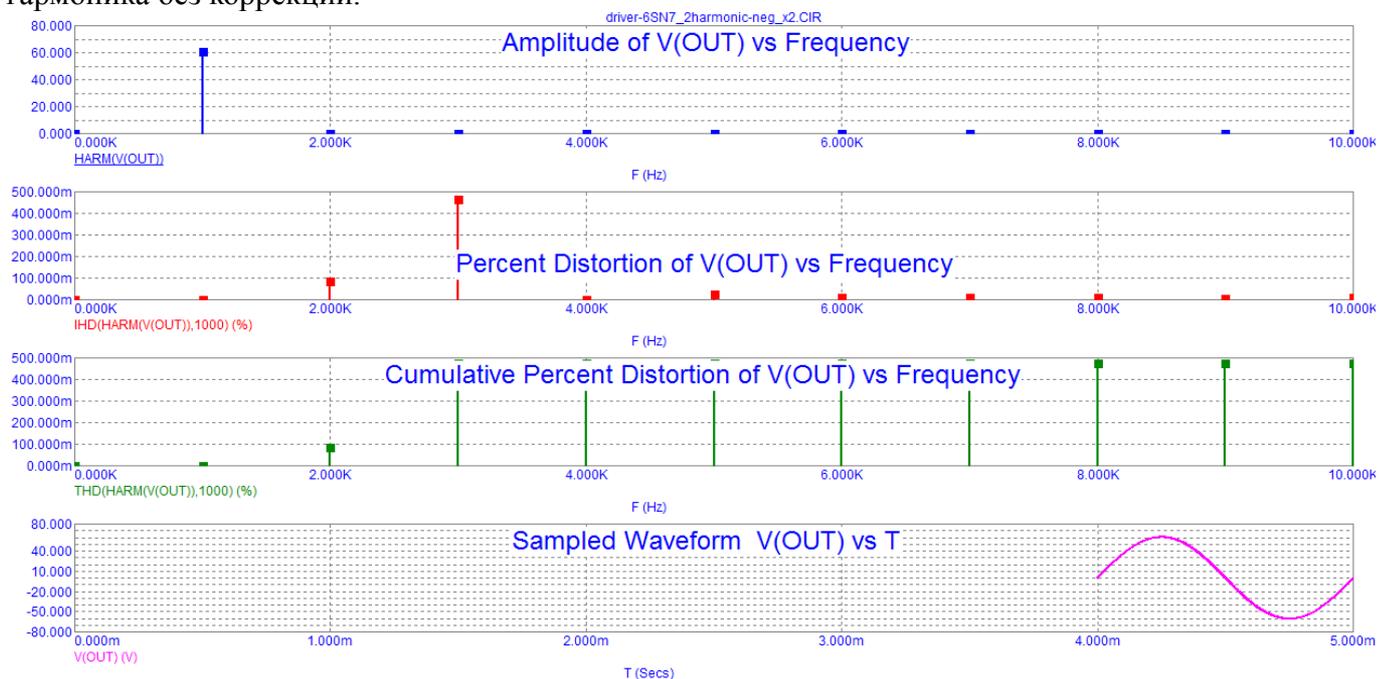


Диаграмма Боде такого усилителя имеет вид



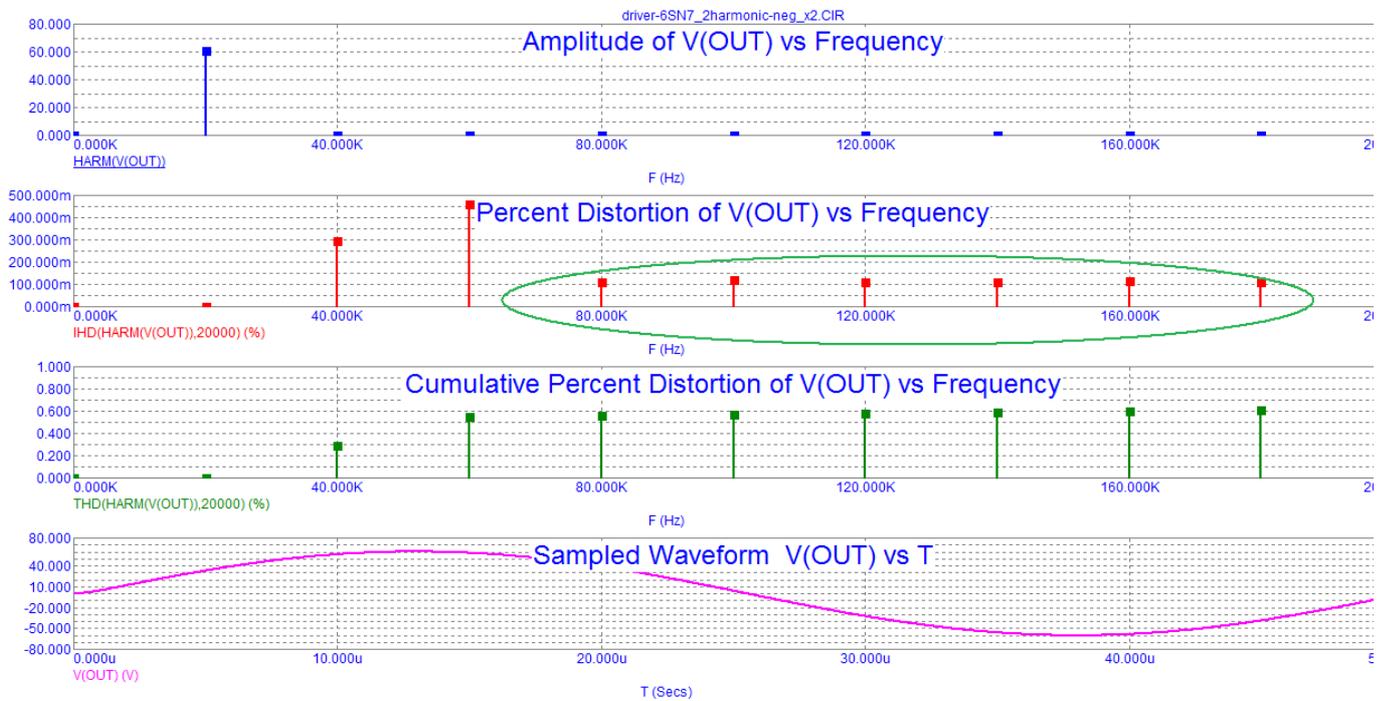
Так как attenuator достаточно высокоОмный, то на входной емкости второго каскада снизилась частота среза сверху до 300 кГц. Фаза начинает заметно крутиться с частоты на порядок ниже, т. е. с 30 кГц. Для того чтобы выровнять АЧХ достаточно параллельно резистору R4 включить корректирующий конденсатор емкостью 5,1 пФ (такой прием используется в делителях осциллографов). Но так как частота среза несколько сот кГц и на частоте даже 40 кГц мы не наблюдаем существенного сдвига фазы то посмотрим насколько эффективно подавится 2-я гармоника без коррекции.



Как видим 2-я гармоника с 2,4% снизилась до менее 0,1% (снизилась в 25 раз!!!), но при этом выросла 3-я гармоника до 0,45% (в 3 раза с 0,15% одного каскада, все же уровень 60 В пик). Если бы 2-я гармоника была сдвинута относительно основного сигнала как меня пытался убедить audiomin (сожалея при этом что я ничего не понял), то ни о какой компенсации не могло бы быть и речи.

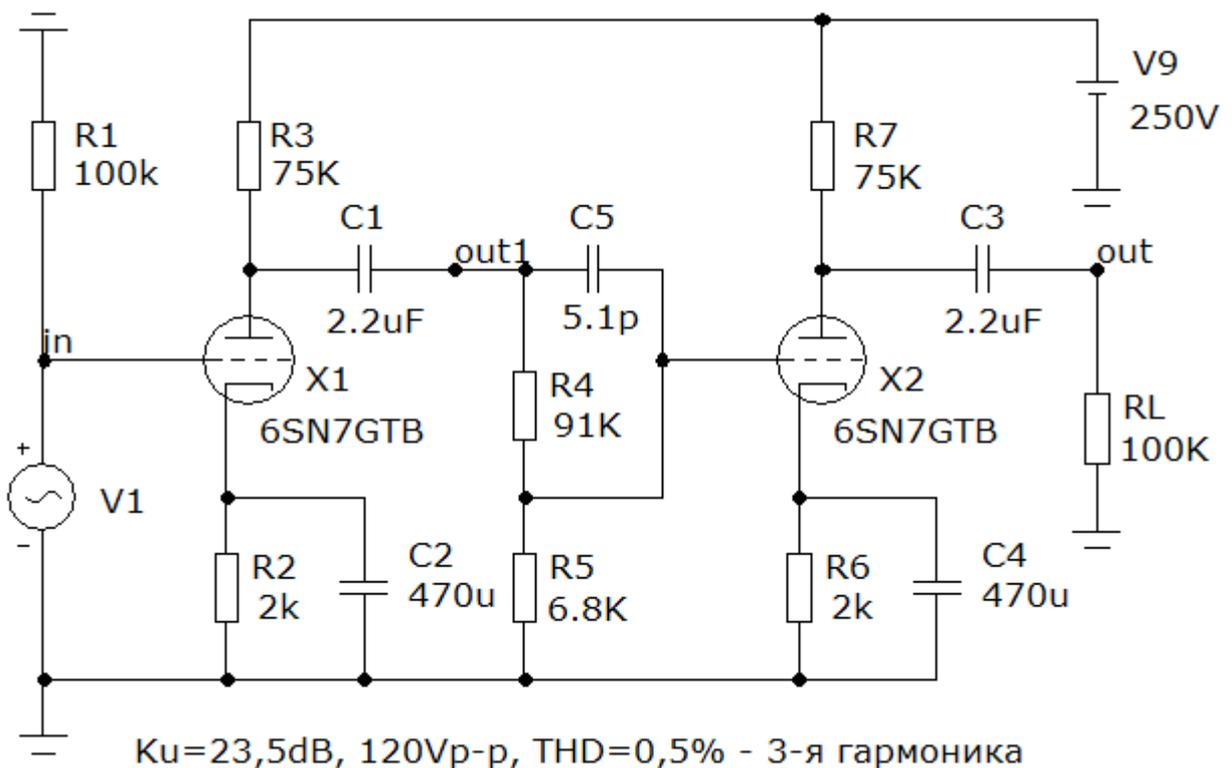
Надеюсь это понятно.

Ну и наконец посмотрим что происходит на частоте 20 кГц без ВЧ-коррекции

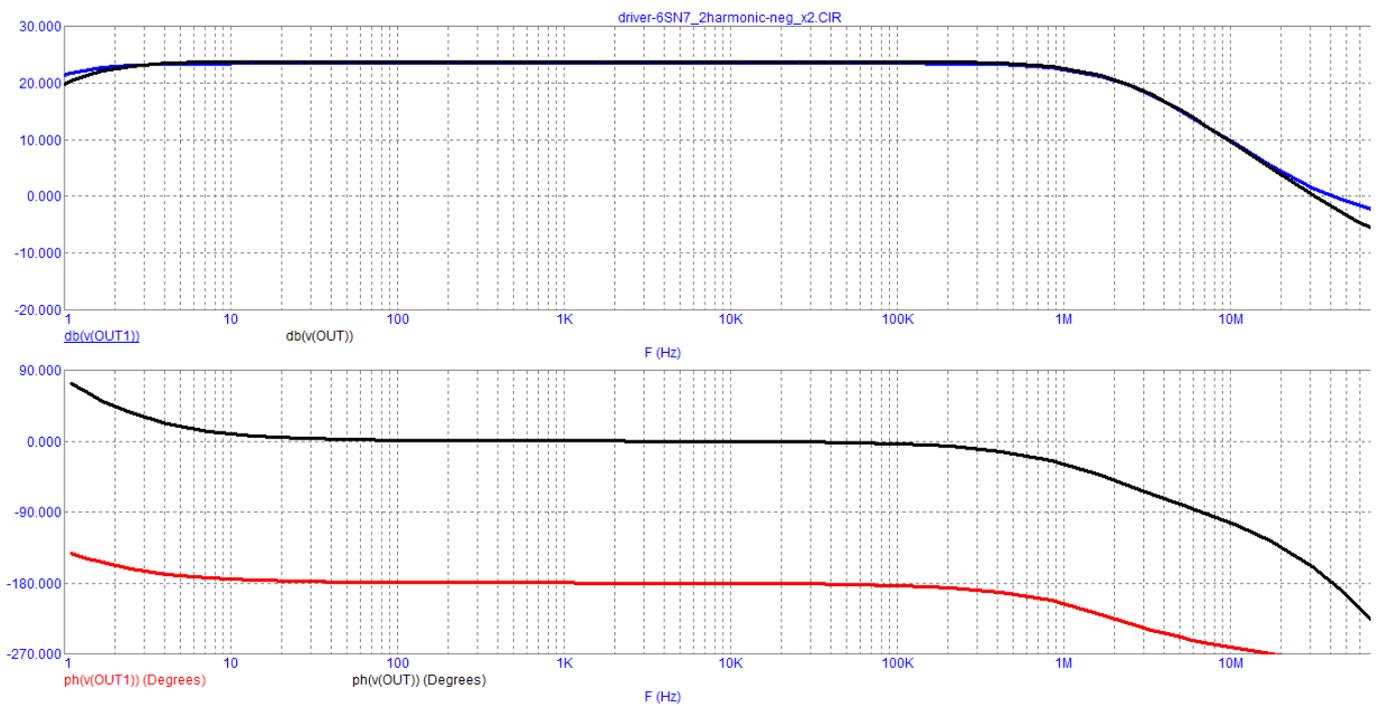


Без ВЧ-коррекции подавление 2-й гармоники всего в 9 раз (с 2,4% до 0,28%), 3-я гармоника осталась такого же уровня как и на частоте 1 кГц (0,45%) и имеет место небольшой рост высших гармоник (обведено зеленым). Это говорит о том что и высшие гармоники определенным образом привязаны к фазе основного сигнала и также в значительной степени компенсируются. Как только фазы каскадов расходятся растут и высшие гармоники. Измерения проведены на первом периоде, на последующих периодах (в установившемся режиме, как принято измерять) уровень высших гармоник ниже.

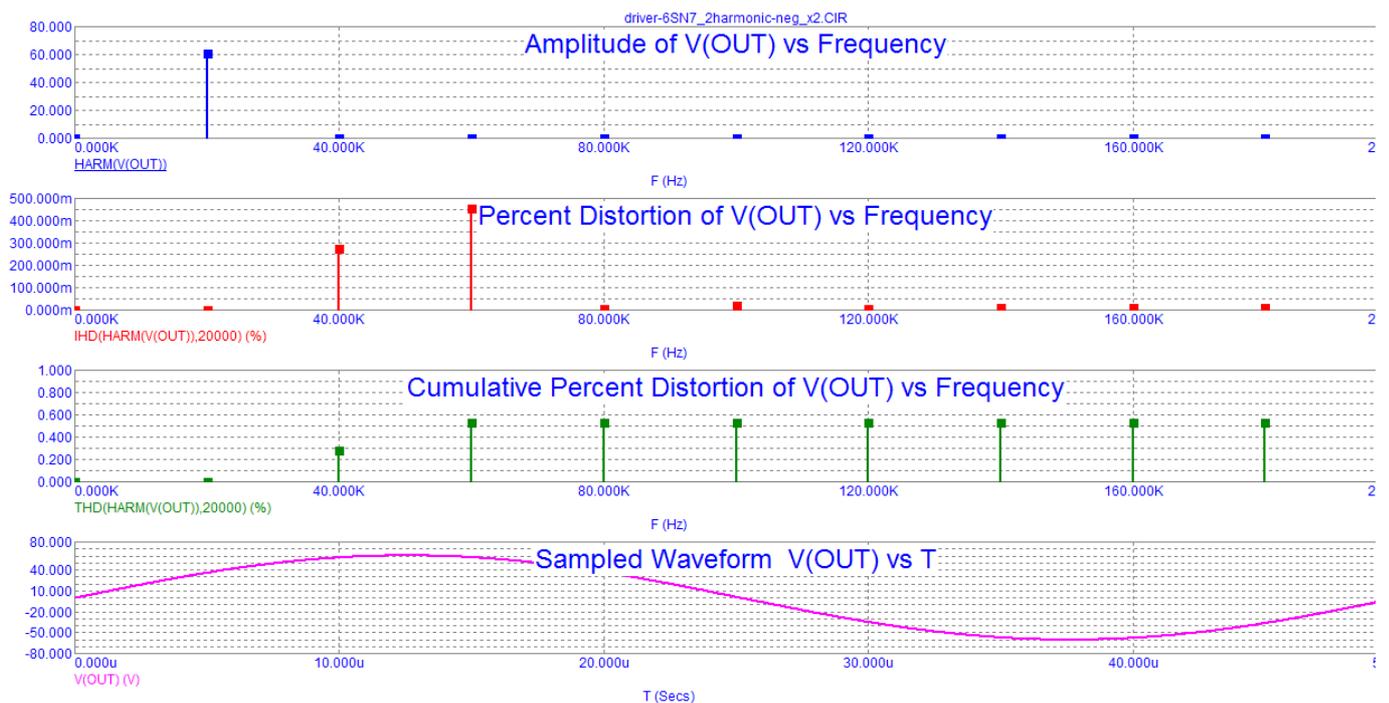
Посмотрим что нам даст простейшая ВЧ-коррекция



АЧХ с коррекцией



Как видно из диаграммы Бode АЧХ двух каскадов с коррекцией (черная линия) совпадает с АЧХ первого каскада (синяя линия). На частоте 20 кГц не видно фазового сдвига. Посмотрим что нам дает такая коррекция по искажениям на частоте 20 кГц



Благодаря выравниванию АЧХ каскадов существенно снижен уровень высших гармоник. При этом 2-я и 3-я гармоники остались без изменений так как коррекция их не коснулась.

21 августа 2016 г.  
Александр Петров