

Краткий анализ модели усилителя из Радио 1972-06 и реализация его модели на современной элементной базе

Схема усилителя приведена на рис. 1

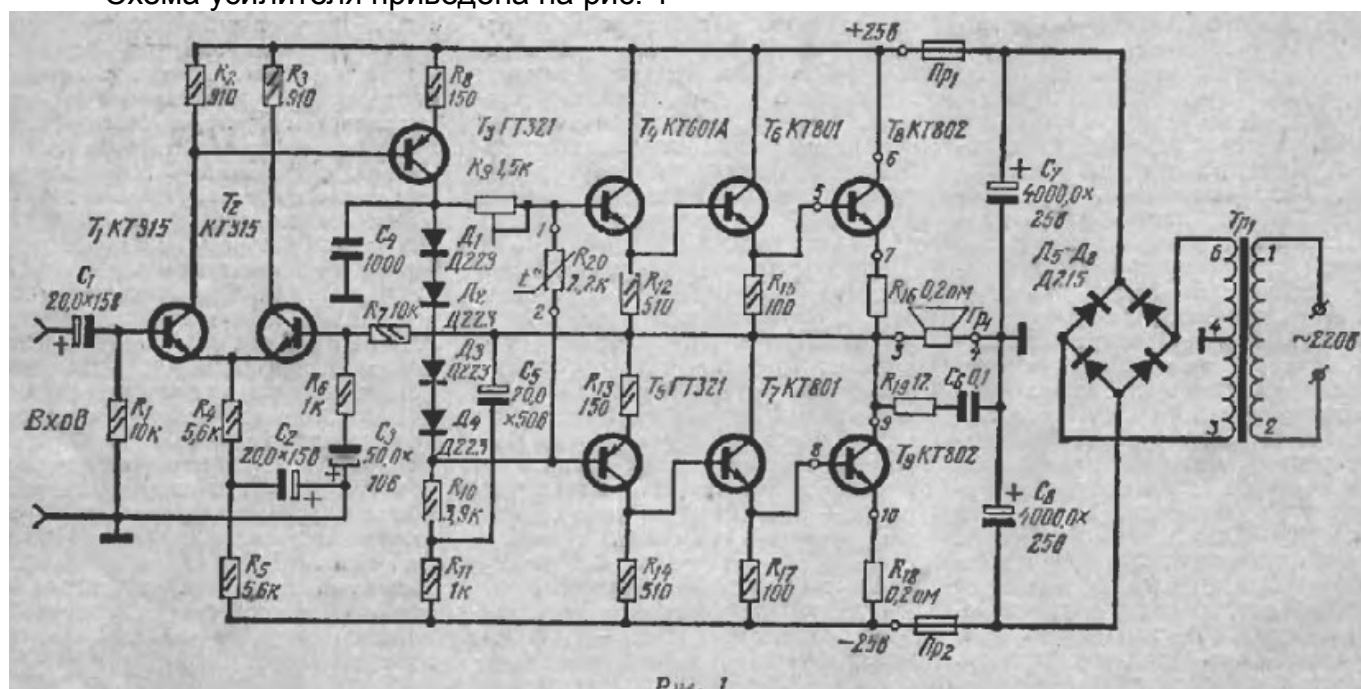


Рис. 1

О работе этого усилителя в интернете можно встретить противоречивые высказывания: от восторженных до откровенно отрицательных.

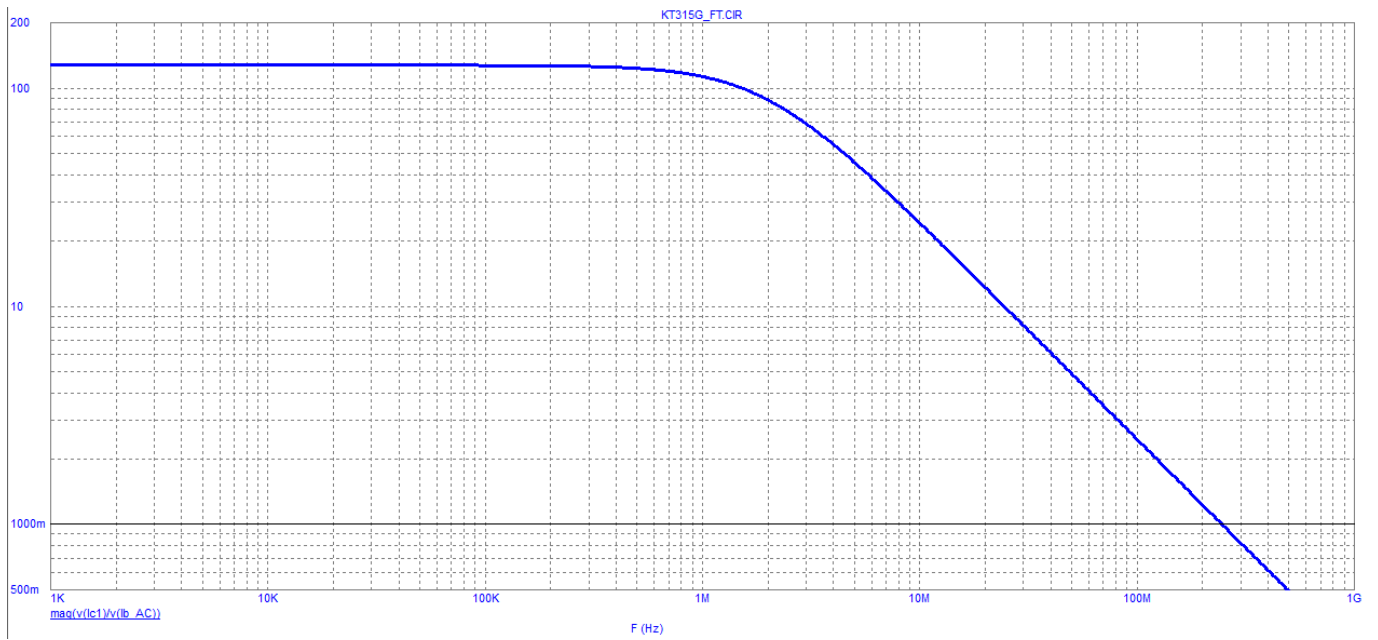
Попробуем разобраться.

С одной стороны в то время были определенные проблемы с приобретением кондиционных транзисторов, а те что продавались в магазинах были по большей части некондиционными. С другой стороны транзисторы той поры были с низкими коэффициентами передачи тока базы и приходилось собирать из того что удалось достать.

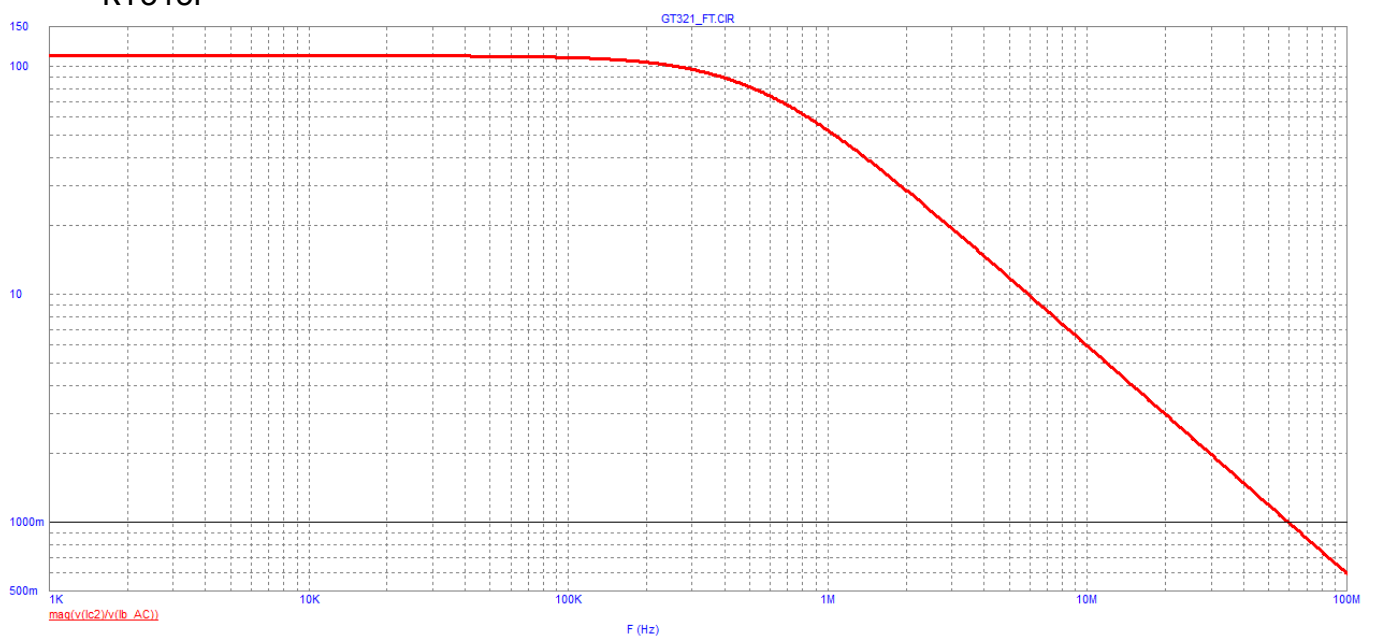
Основные параметры использованных транзисторов приведены в таблице 1

наименование	Ток, А	Мощность, Вт	Ft, MHz	Ск, пФ	h21
КТ315Г	0,1	0,15	250	7	160
ГТ321	0,2	0,16	60	80	100
КТ601	0,03	0,5	40	15	16
КТ801	2	5	10	-	40
КТ802	5	50	10	500	15

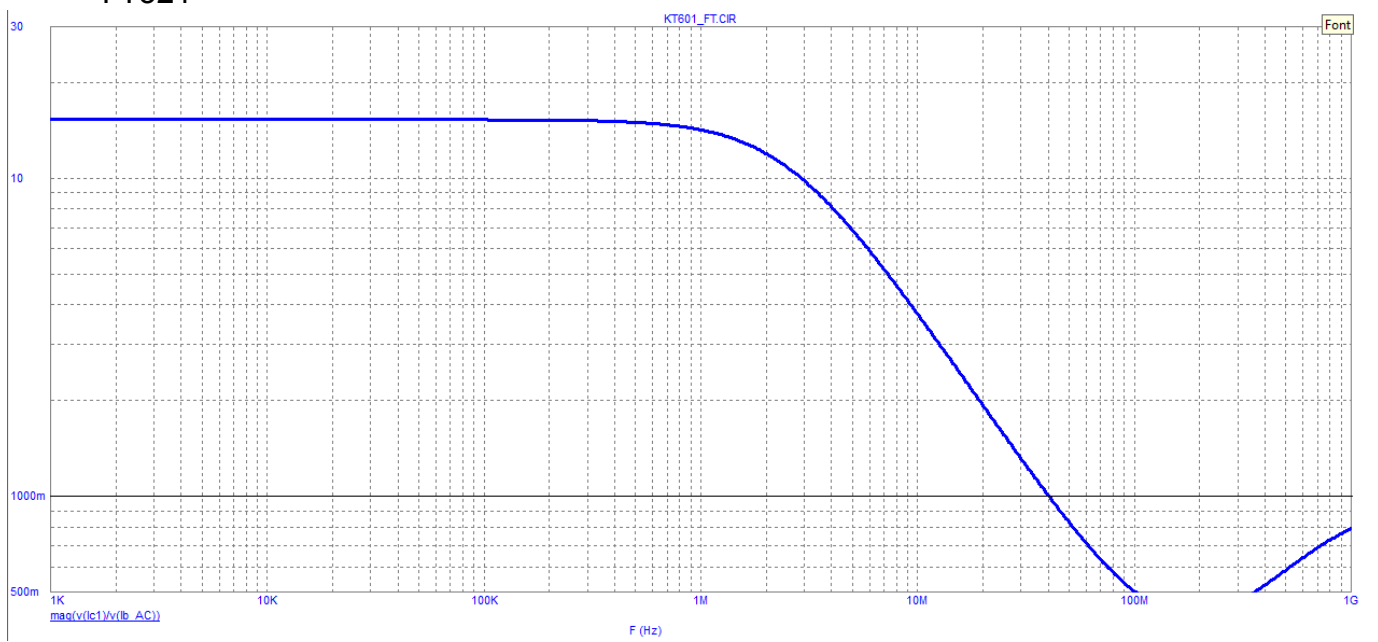
Для начала проверим частоту единичного усиления использованных моделей транзисторов



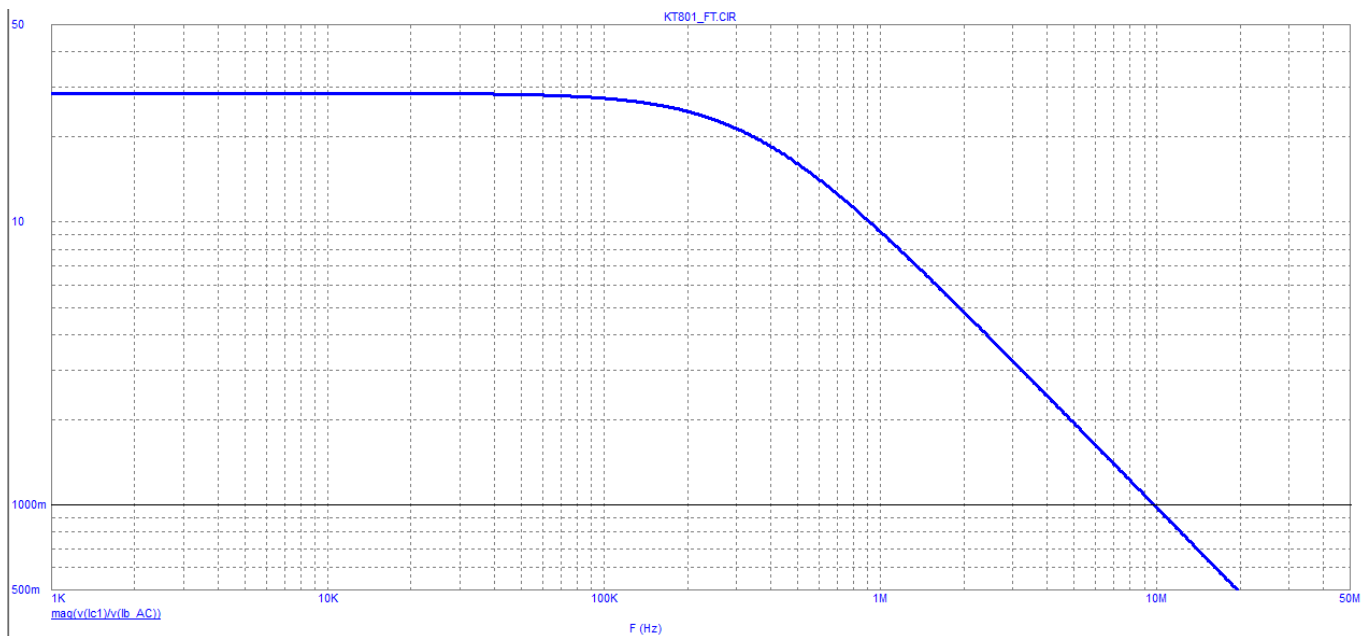
KT315Г



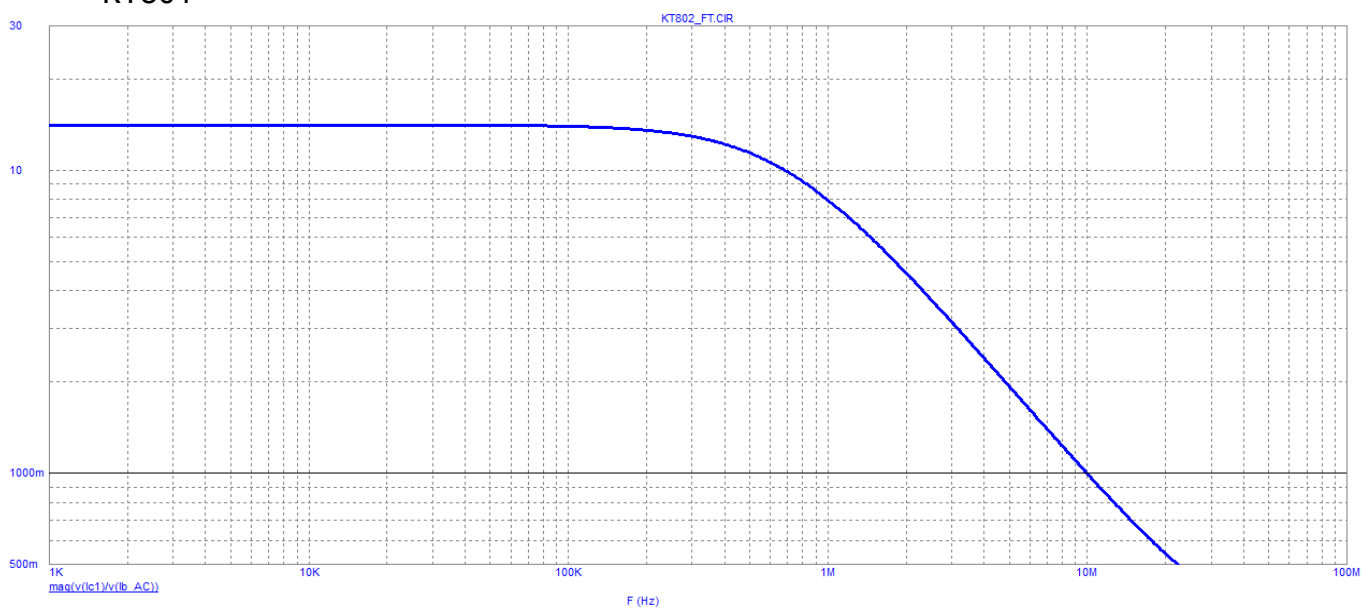
ГТ321



KT601



KT801



KT802

Диаграмма Бode модели оригинала представлена на рис. 7

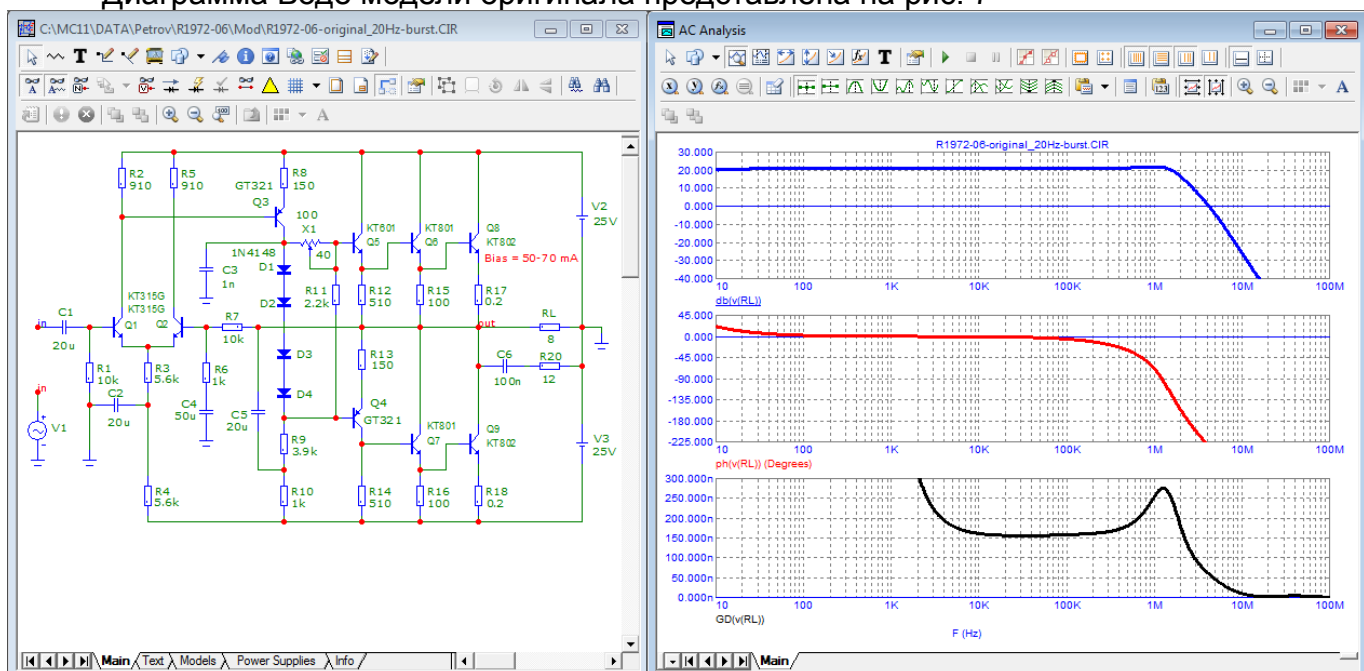


Рис. 7

Спектр сигнала частотой 20 кГц показан на рис. 8

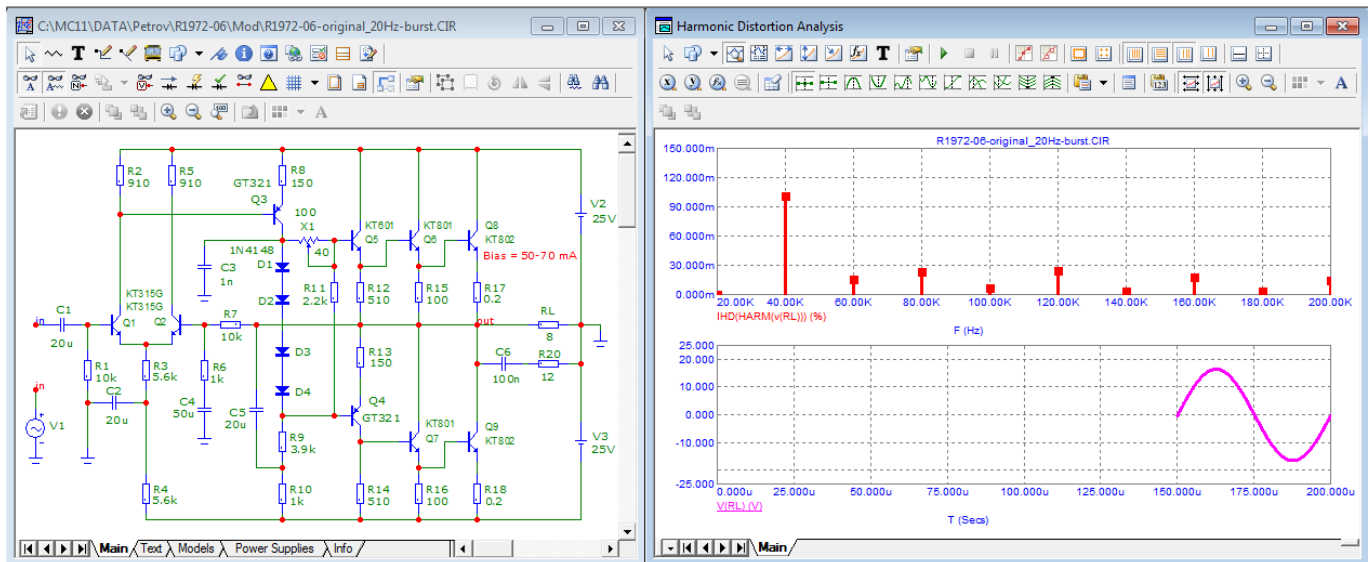


Рис. 8

На нагрузке 8 Ом в спектре преимущественно 2-я гармоника. Остальные гармоники существенно ниже, особенно нечетные гармоники.
Посмотрим как работает модель на буре частотой 20 Гц, рис. 9

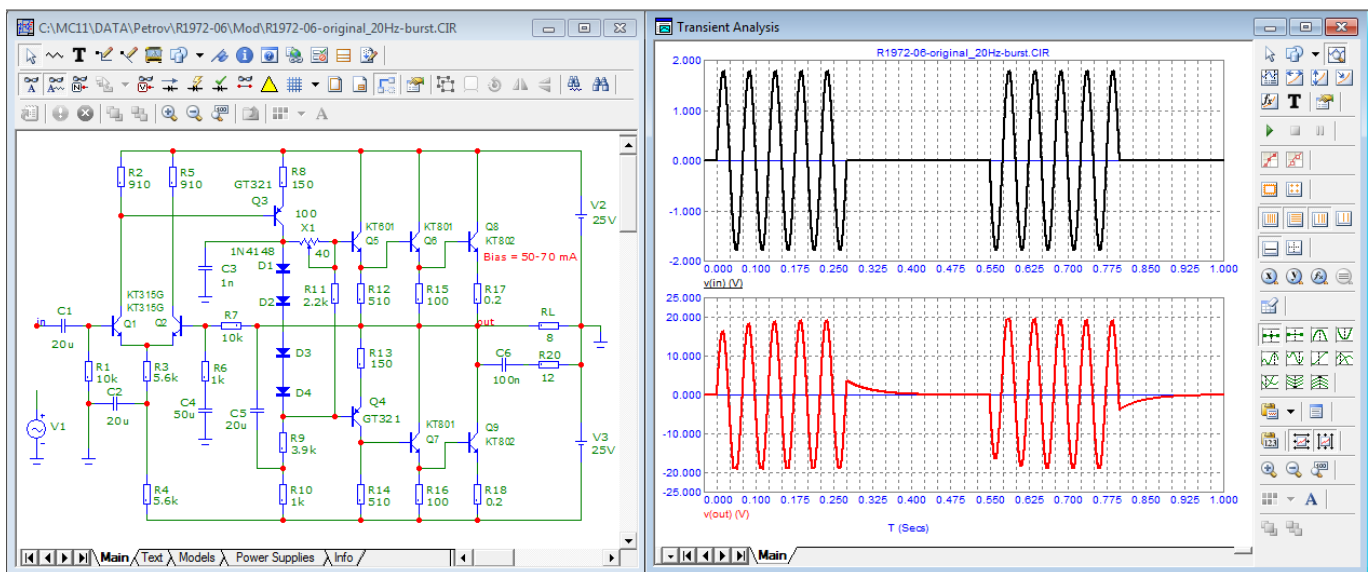


Рис. 9

На низшей частоте звукового диапазона явно выражены линейные искажения из-за раннего подрезания диапазона снизу.

Модель усиливает без явно выраженных искажений сигнал частотой до 30 кГц. На частоте 50 кГц имеют место явно выраженные ТИМ-искажения, рис. 10.

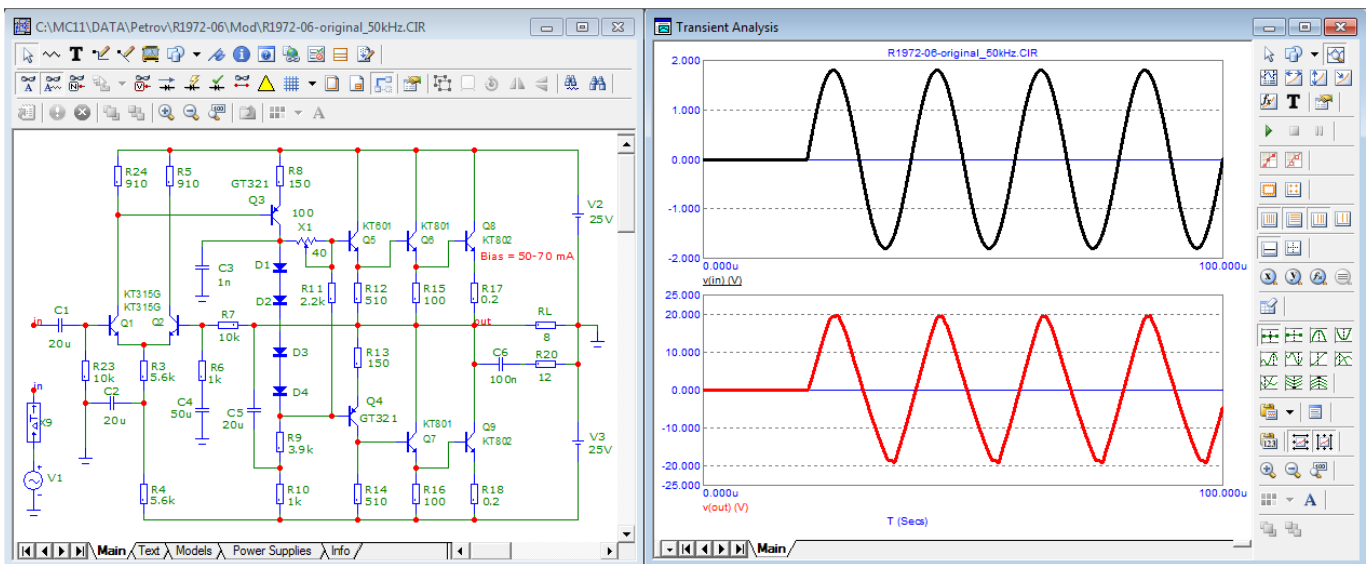


Рис. 10

Посмотрим что можно выжать с данной схемы используя современные транзисторы. С целью упрощения схемы температурной стабилизации и ухода от необходимости применения терморезистора применена схема умножения напряжения на транзисторе который устанавливают на корпусе теплоотвода.

Диаграмма Бode доработанной схемы показана на рис. 11

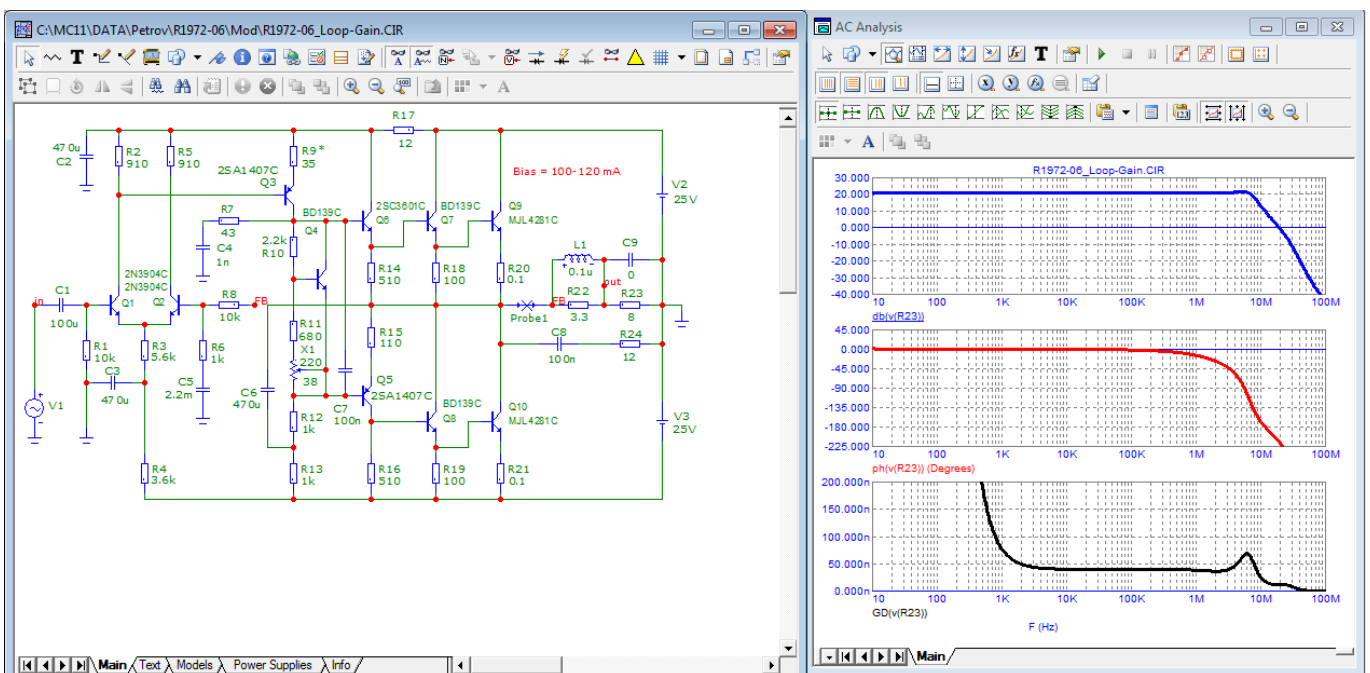


Рис. 11

С целью улучшения PSRR по плюсовой шине добавлен резистор R17 и конденсатор C2. Емкости конденсаторов C1 и C5 увеличены. На выходе модели добавлена индуктивность 0,1 мкГн (такую индуктивность имеет проводник длиной 10 см). С целью уменьшения коммутационных искажений ток покоя увеличен с 50...70 мА до 100...120 мА. Время задержки прохождения сигнала (tPD - time Propagation Delay) менее 40 нс и постоянно до нескольких МГц.

Диаграмма петлевого усиления показана на рис. 12

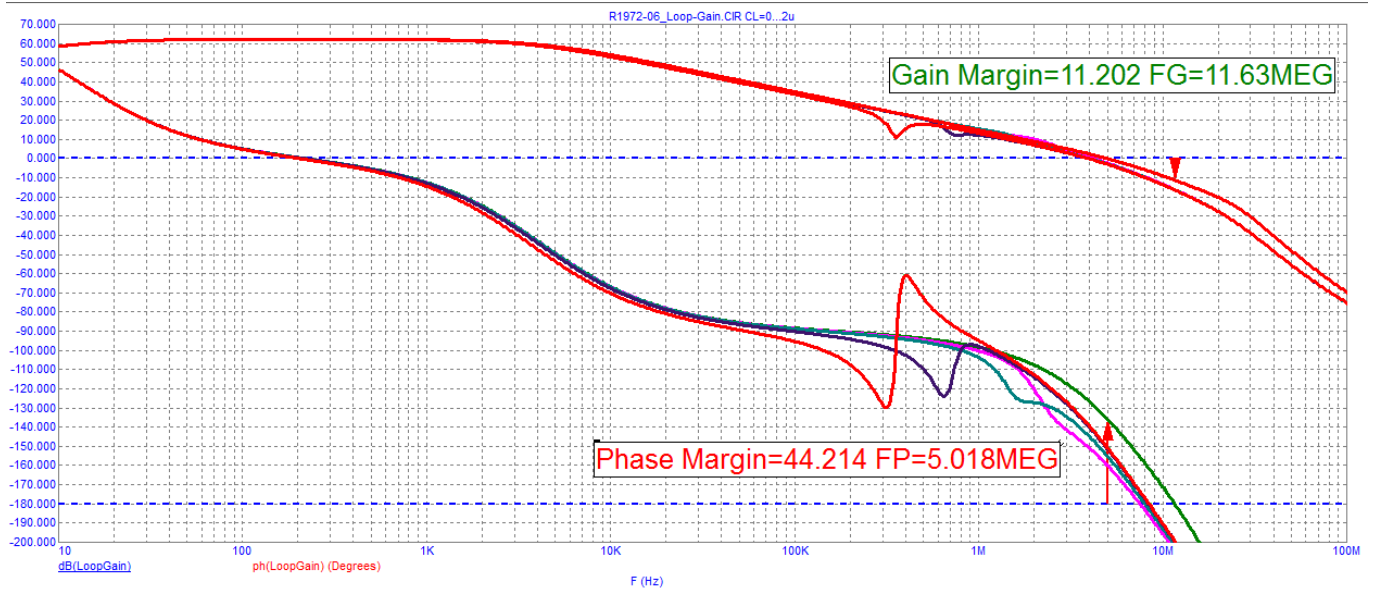


Рис. 12

Спектр сигнала частотой 20 кГц показан на рис. 13

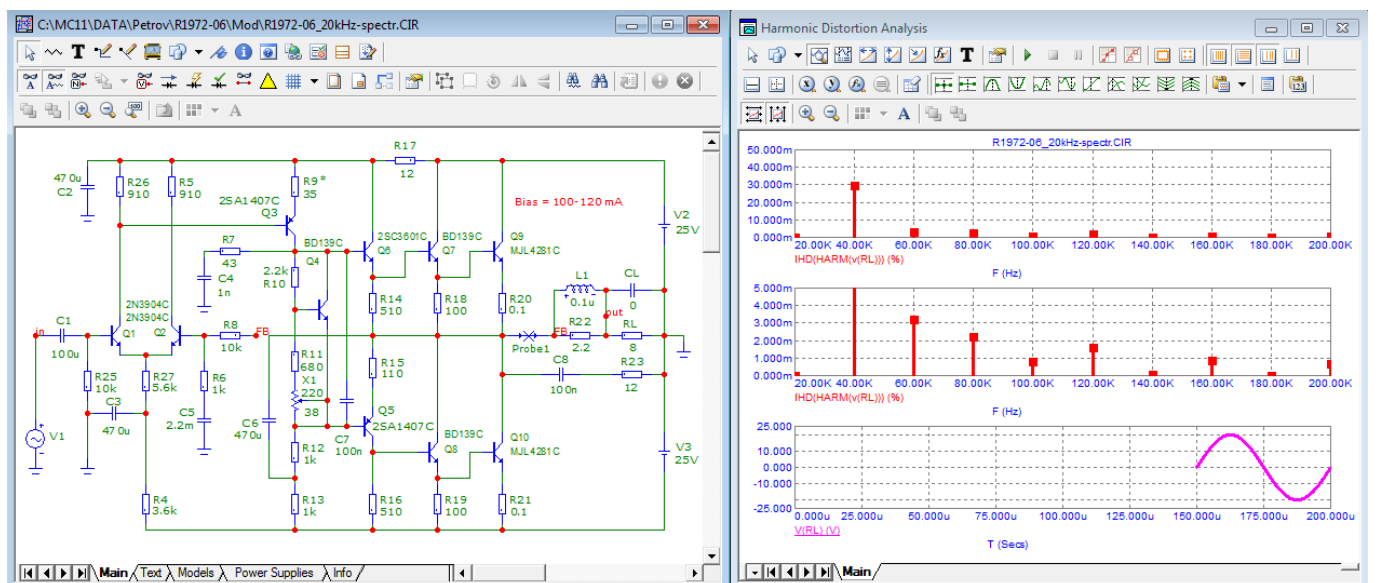


Рис. 13

Как показывает тест в спектре преимущественно одна 2-я гармоника небольшой величины. Судя по ушным гармоникам человек не слышит 2-ю гармонику до нескольких процентов. Диссонансными гармониками считаются нечетные гармоники начиная с 7-й гармоники и выше.

Принято считать что определяющими качество звучания являются параметры при выходной мощности 1 Вт, рис. 14

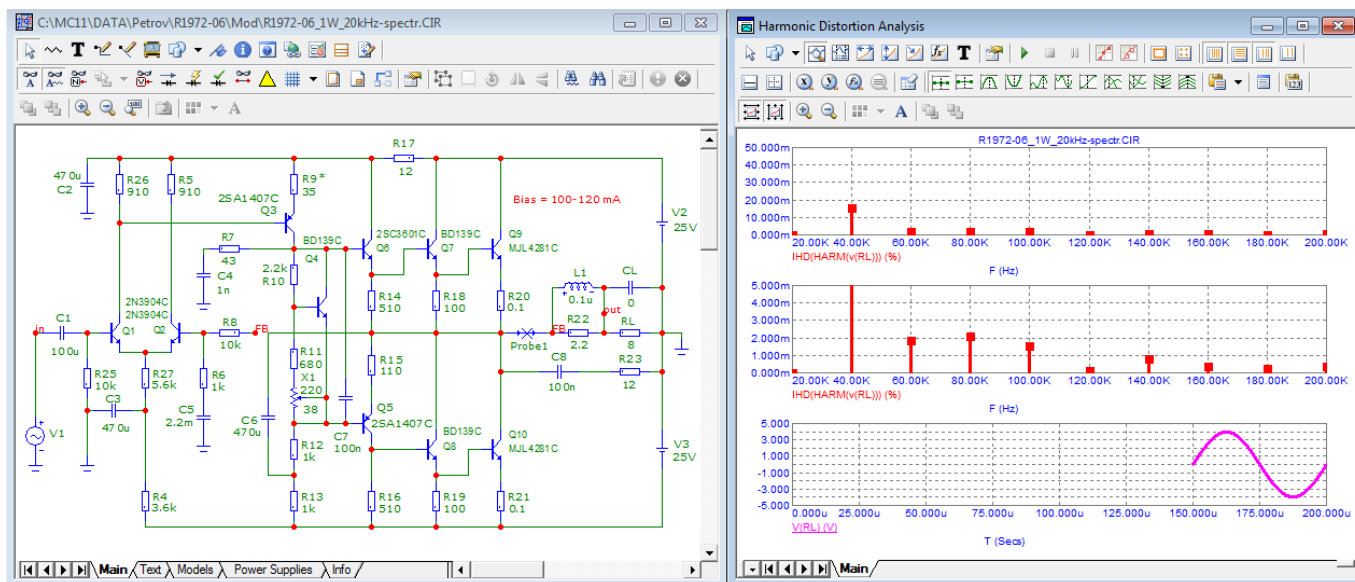


Рис. 14

И при малой мощности сохраняется такой же характер спектра. По мнению Владимира Лэмм (Шушурина) именно такое поведение продуктов искажений в зависимости от выходной мощности гарантирует хорошее качество звука.

Измерим компенсационным методом искажения сигнала частотой 10 кГц в виде бурстов, рис. 15

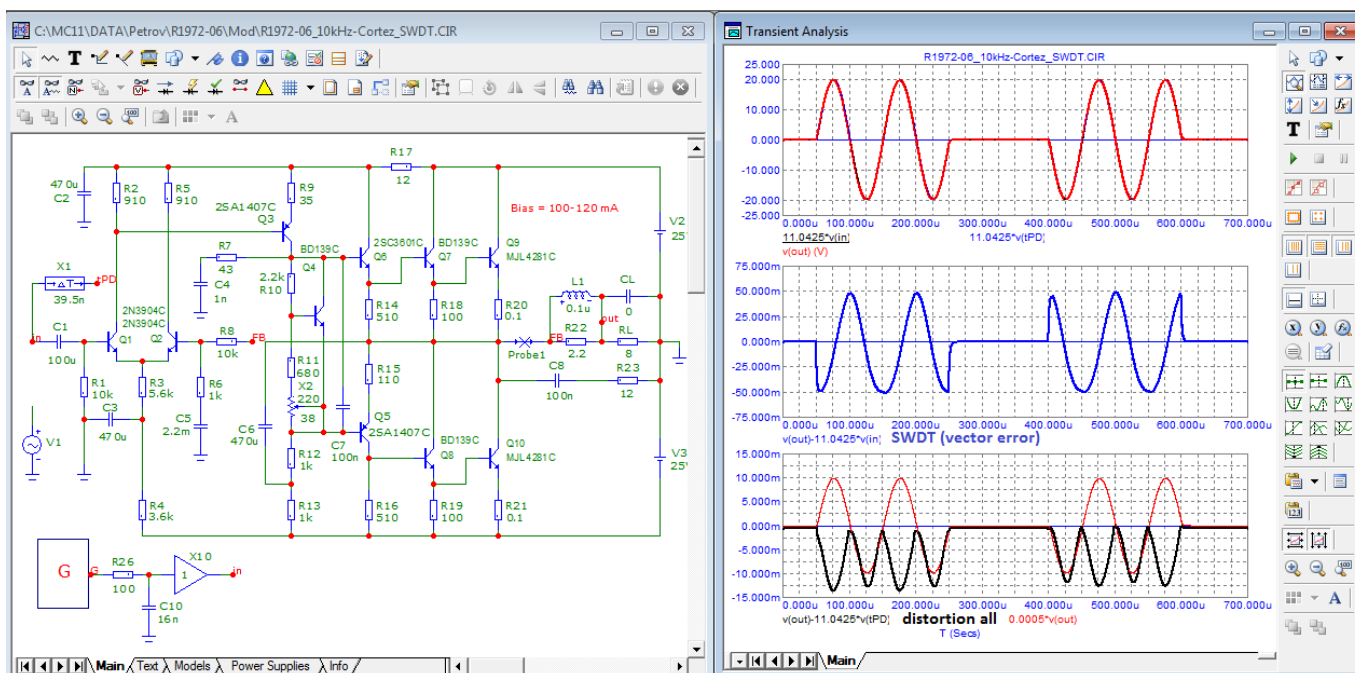


Рис. 15

Компенсационный метод измерения искажений подтвердил спектр измеренный с помощью FFT-анализа имеющегося в программе Micro-Cap и не выявил дополнительных искажений в начале и конце бурстов. Нет и искажений памяти (болтанка продуктов искажений в зависимости от полярности первого полупериода бурста).

Для большей наглядности растянем начало бурста, рис. 16

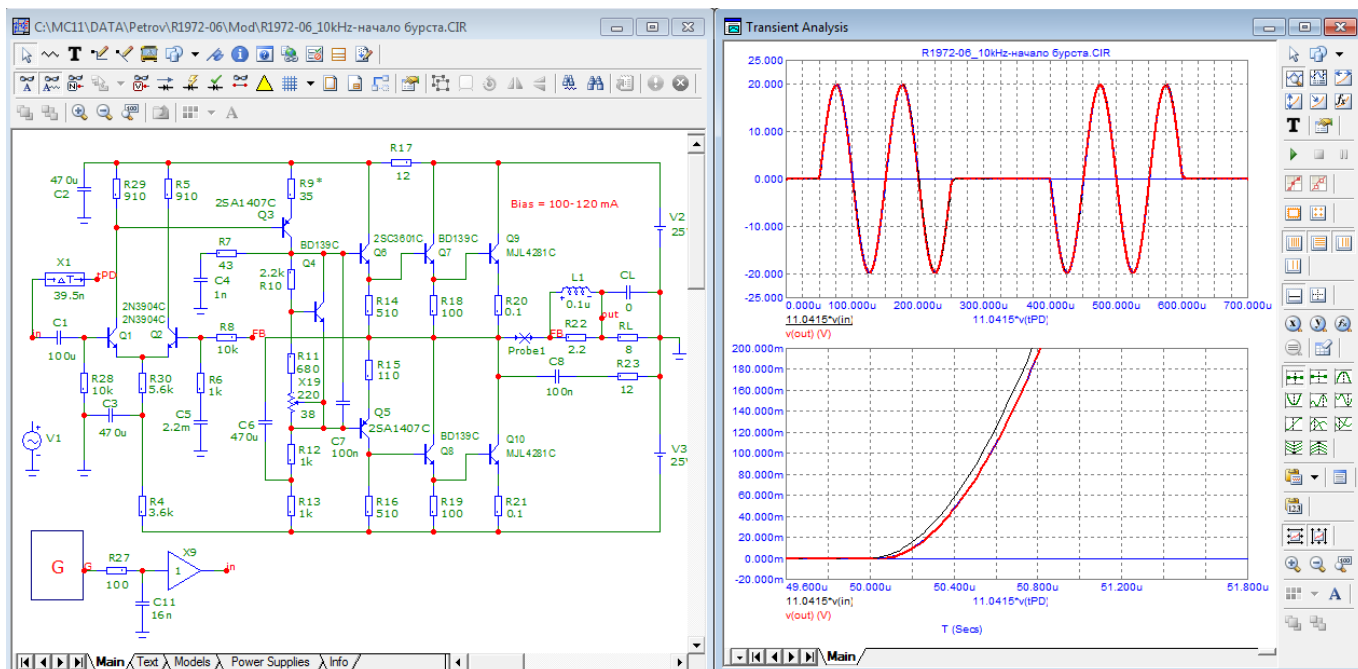


Рис. 16

Из рисунка 16 хорошо видно что выходной сигнал с самого начала в точности повторяет приведенный к уровню выходного входной сигнал задержанный на время t_{PD} . Это и обеспечивает отсутствие дополнительных искажений в начале и конце бурстов которыми страдает подавляющее большинство современных усилителей.

Коммутационные искажения показаны на рис. 17

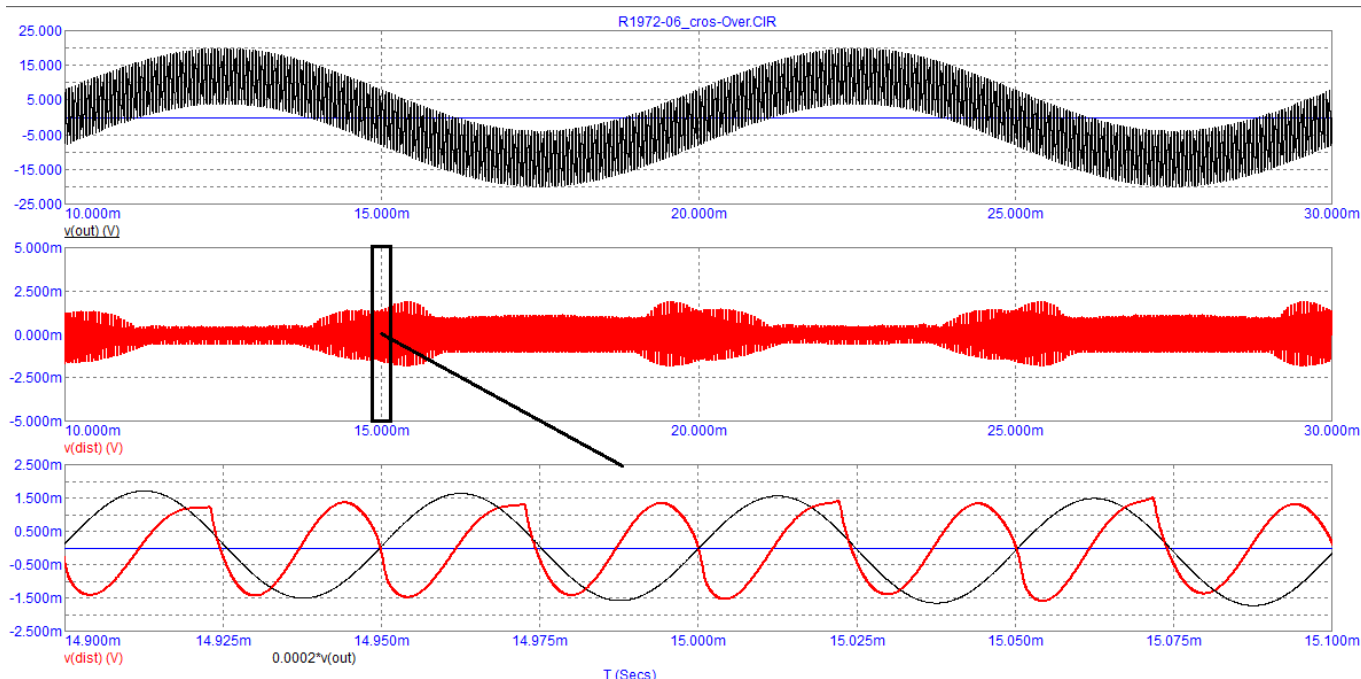


Рис. 17

На третьем графике продукты искажений показаны в растянутом виде. Посмотрим как работает модель доработанного усилителя на частоте 100 кГц, рис.

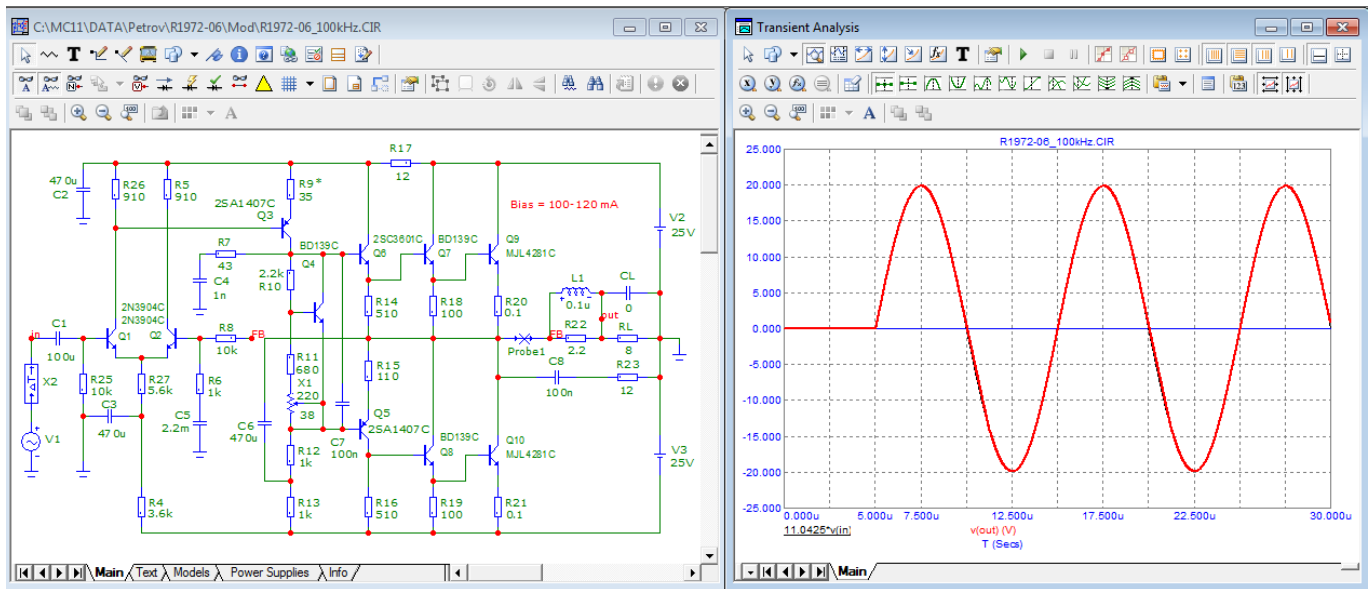


Рис. 18

На один график выведен выходной сигнал и входной сигнал умноженный на K_u . Обратите внимание что K_u использован того значения что и при усилении сигнала частотой 10 кГц (рис. 15 и рис. 16). Даже на частоте 100 кГц нет линейных искажений, сигналы сливаются.

Посмотрим что дает увеличение номиналов конденсаторов C1 и C5, рис. 19

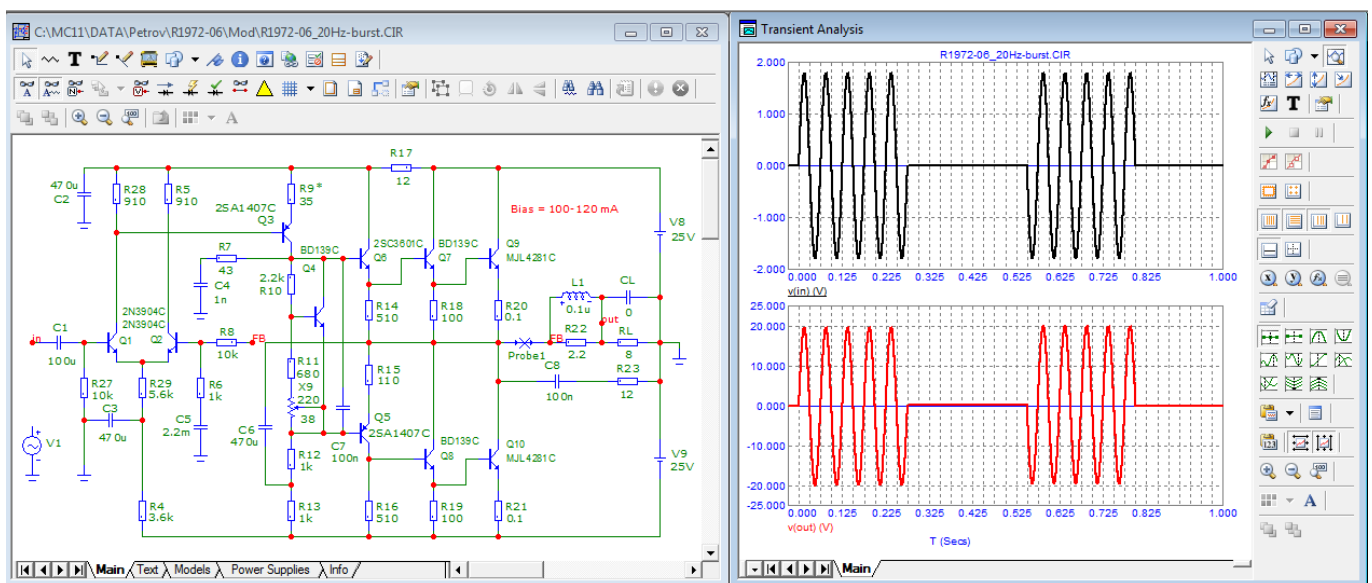


Рис. 19

Тест бурстами частотой 20 Гц подтверждает отсутствие линейных искажений. Проверим работу модели меандром частотой 20 кГц, рис. 20.

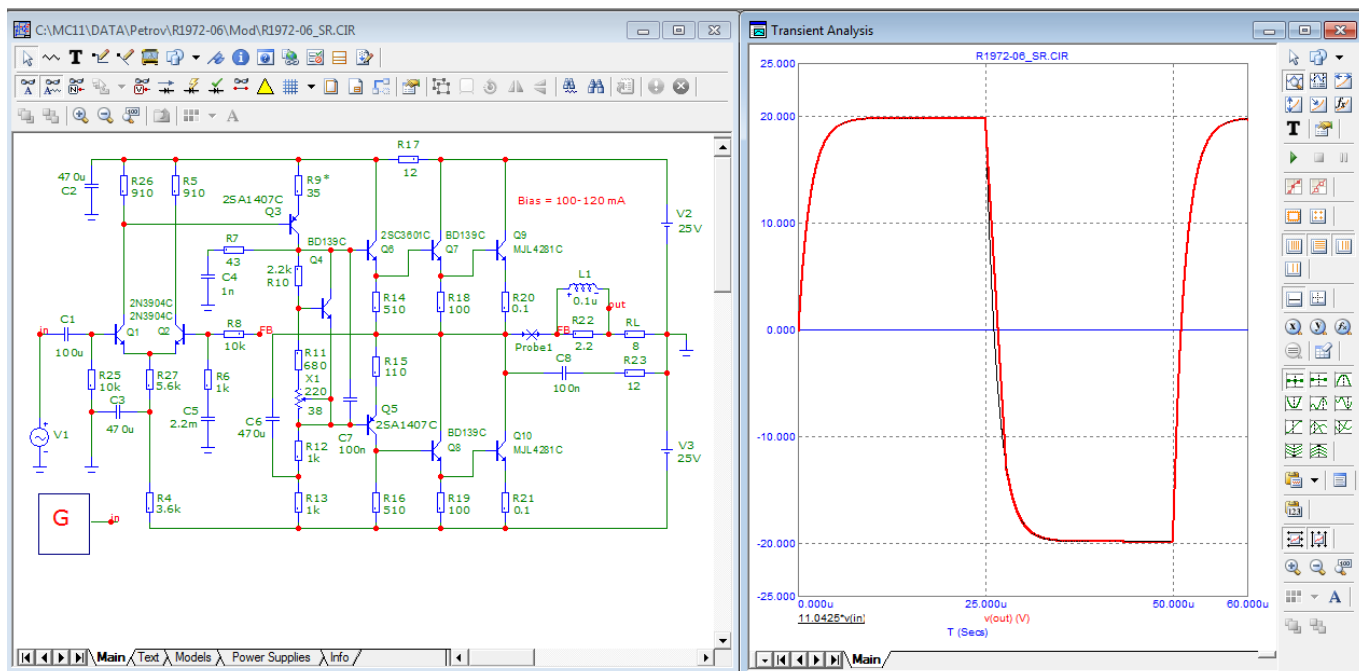


Рис. 20

Перед подачей на вход сигнал был обработан ФНЧ первого порядка с частотой среза 100 кГц. Выходной сигнал выведен на один график входной сигнал умноженный на тот же K_u что и в предыдущих тестах. Небольшое отклонение от входного сигнала имеет место на отрицательном фронте. Хочется надеяться что это не скажется отрицательно на качестве звука.

С наилучшими пожеланиями
Александр Петров