

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

Схема усилителя приведена на рис. 1

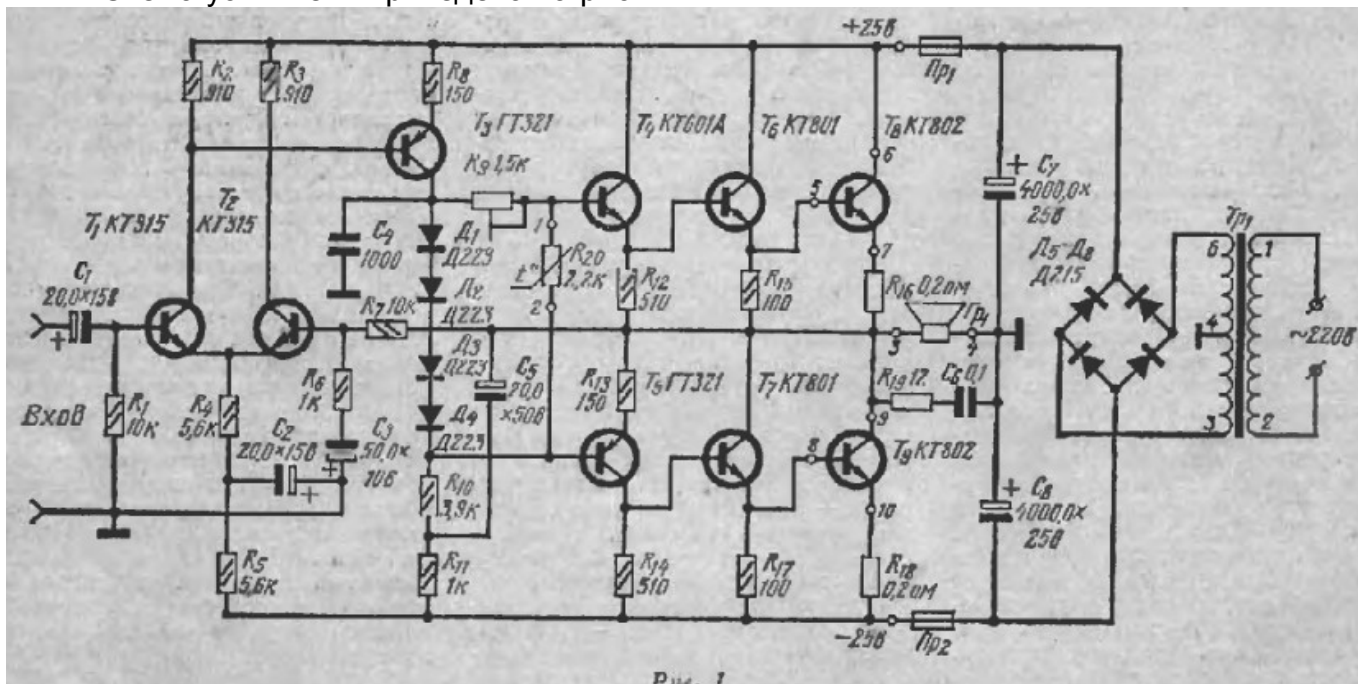


Рис. 1

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.

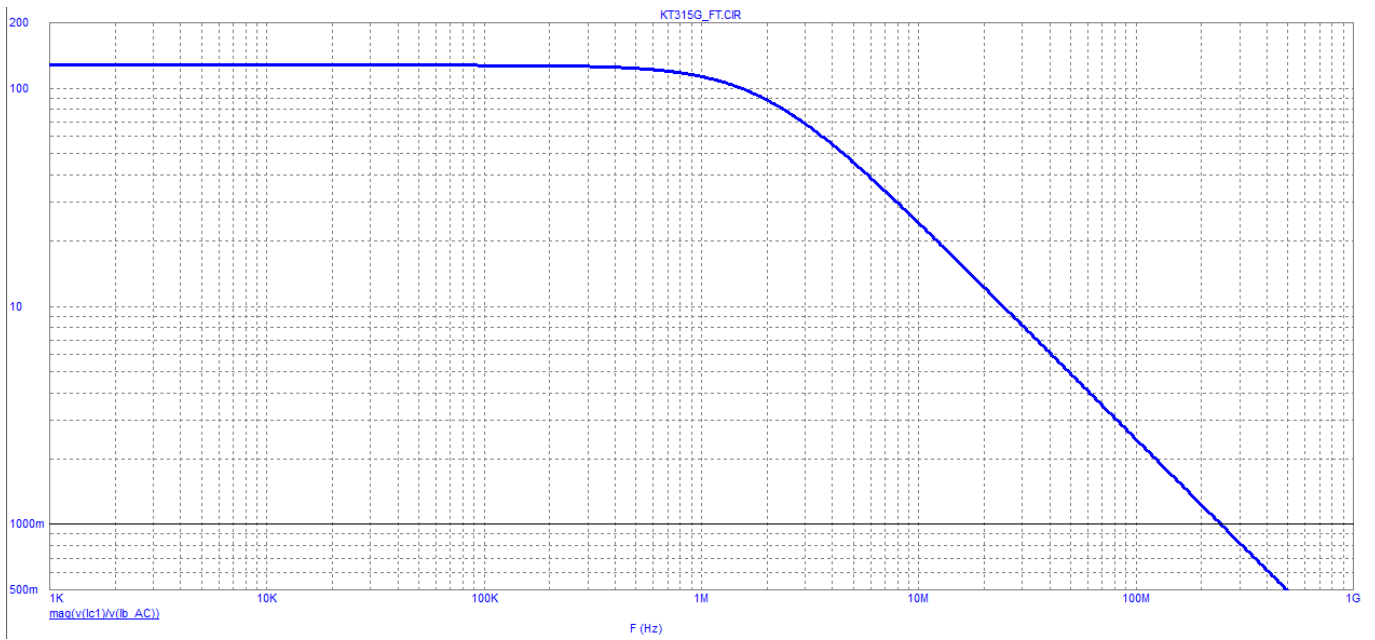
Основные параметры использованных транзисторов приведены в таблице 1

Таблица 1

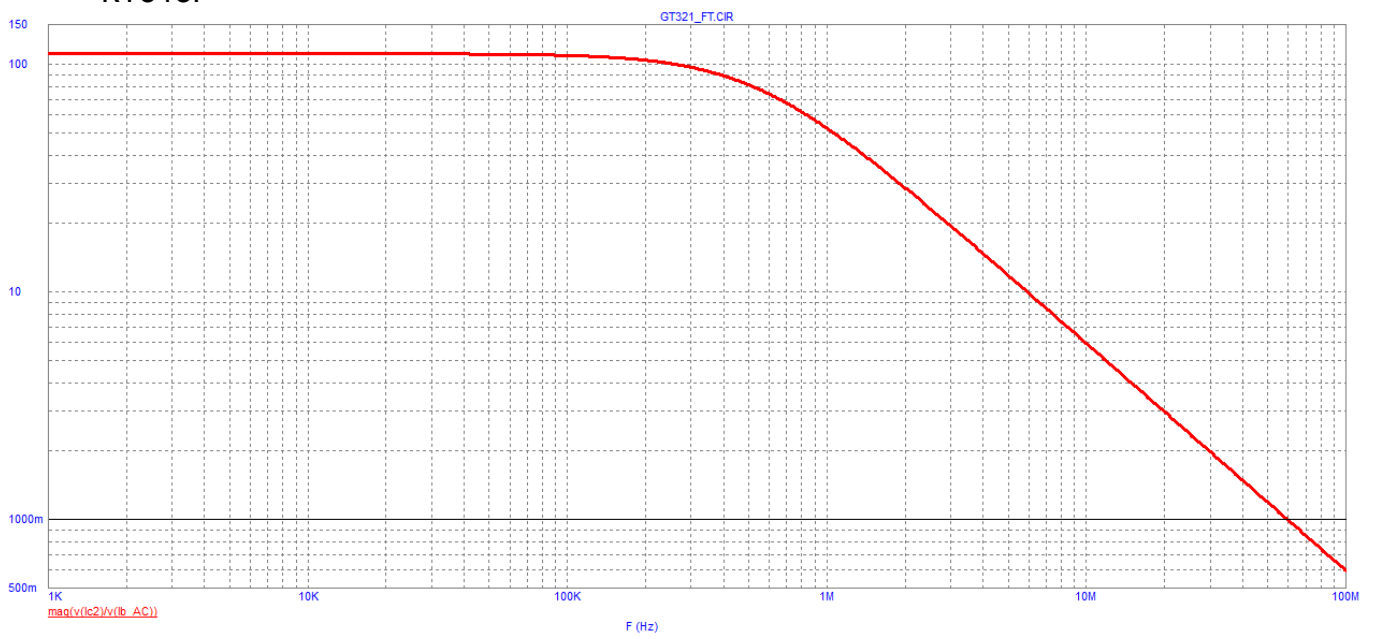
наименование	Ток, А	Мощность, Вт	Ft, MHz	Ск, пФ	h21
КТ315Г	0,1	0,15	250	7	160
ГТ321	0,2	0,16	60	80	100
КТ601	0,03	0,5	40	15	16
КТ801	2	5	10	-	40
КТ802	5	50	10	500	15

Примечание. При моделировании использовались модели транзисторов с BF (h21) из таблицы 1.

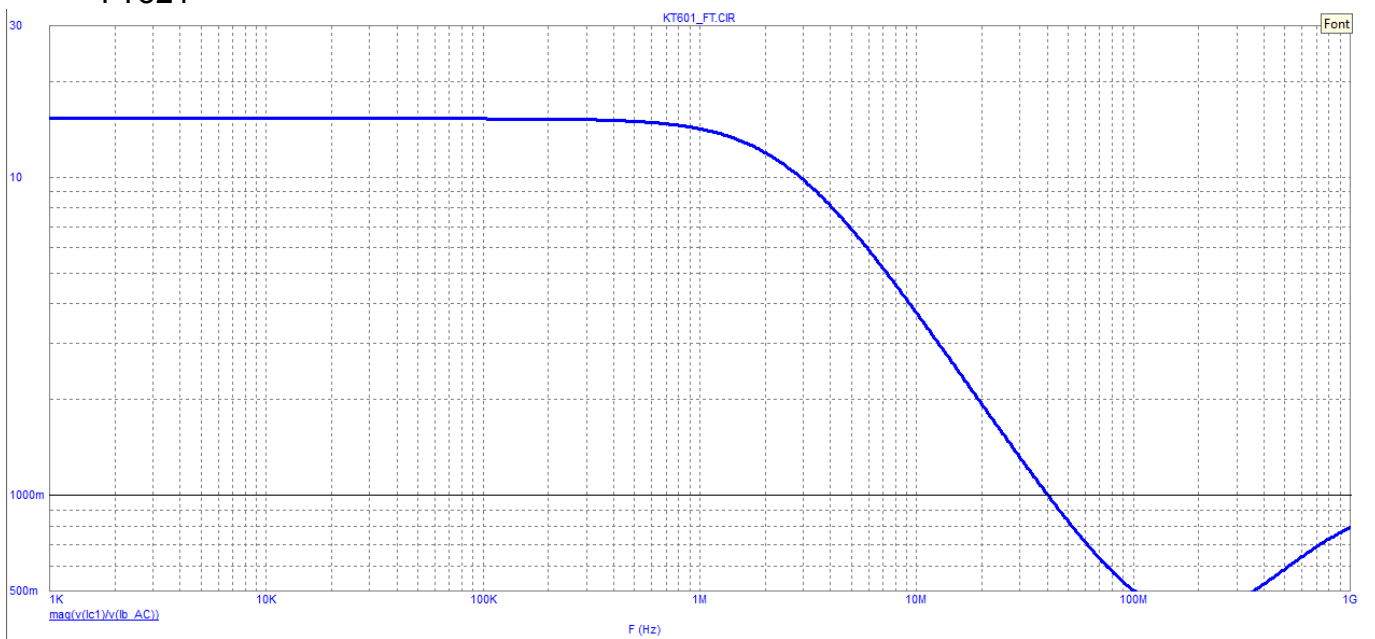
Для начала проверим частоту единичного усиления использованных моделей транзисторов, см. приведенные ниже графики тестирования.



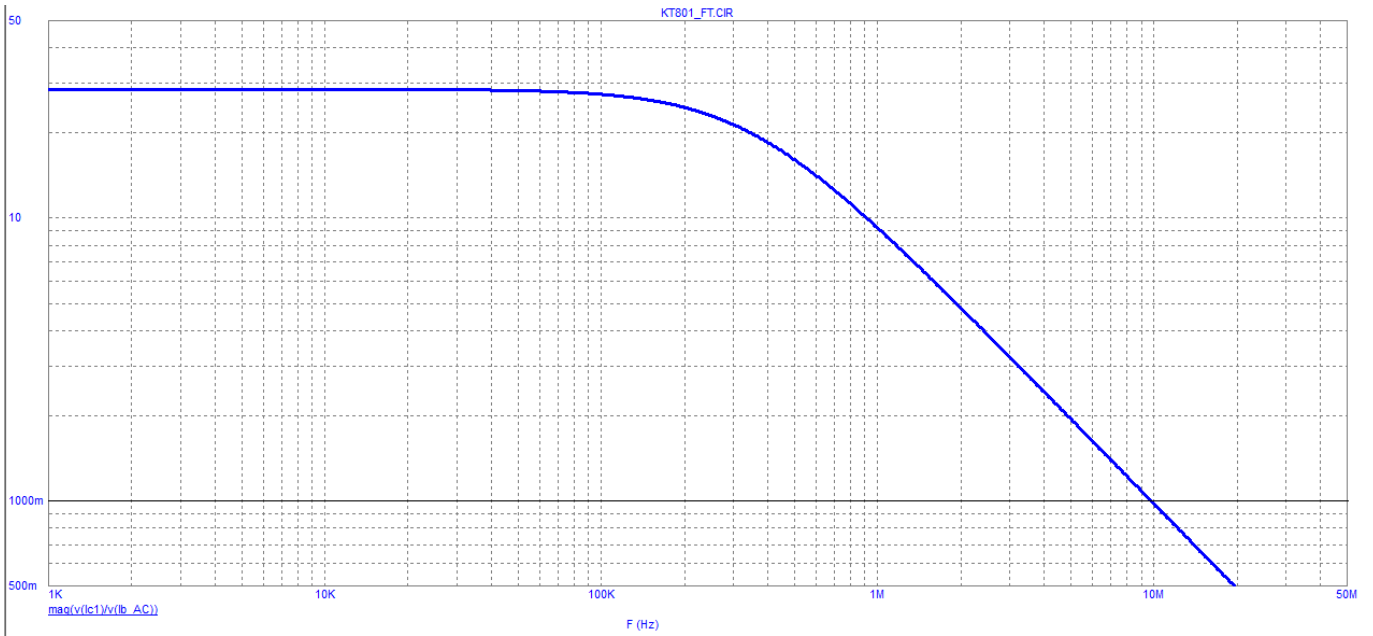
KT315Г



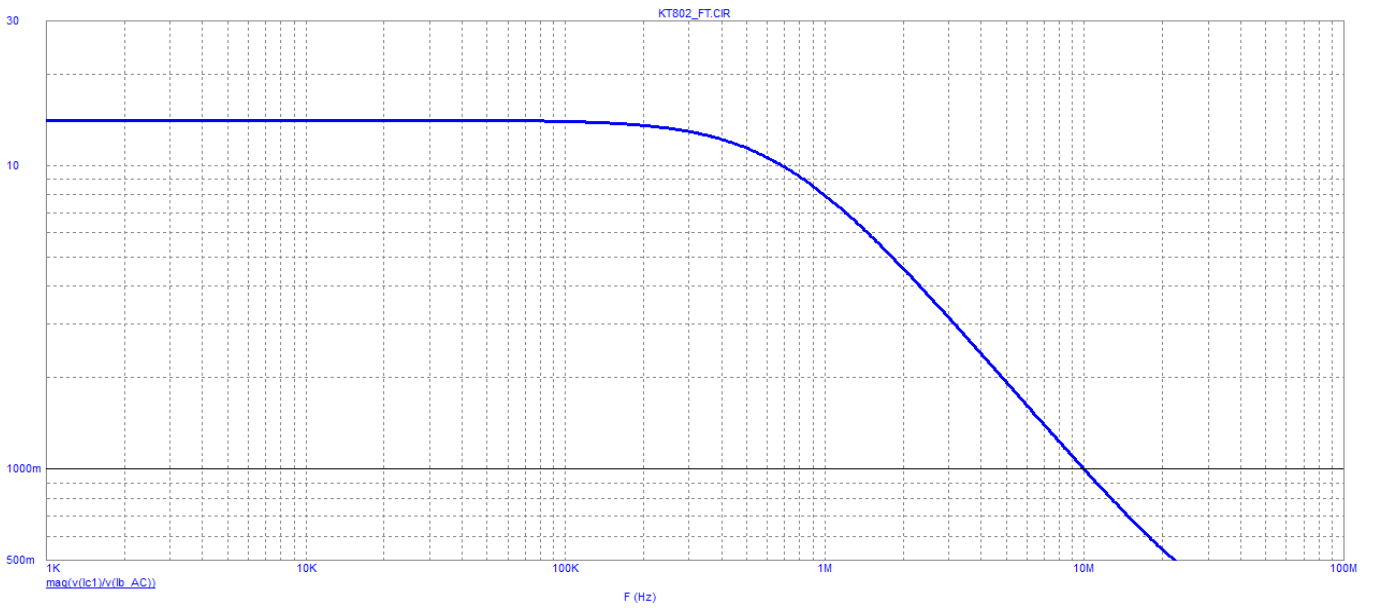
ГТ321



KT601



KT801



KT802

Диаграмма Бодe модели оригинала представлена на рис. 7

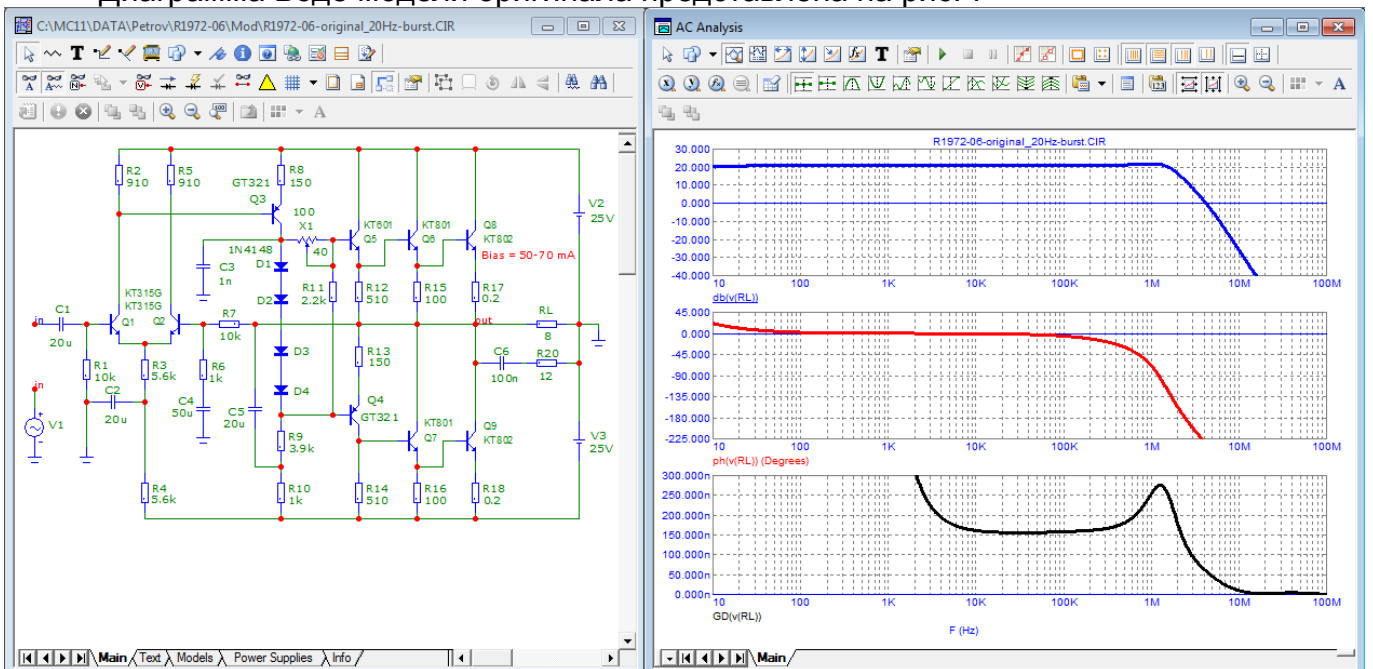


Рис. 7

Спектр сигнала частотой 20 кГц показан на рис. 8

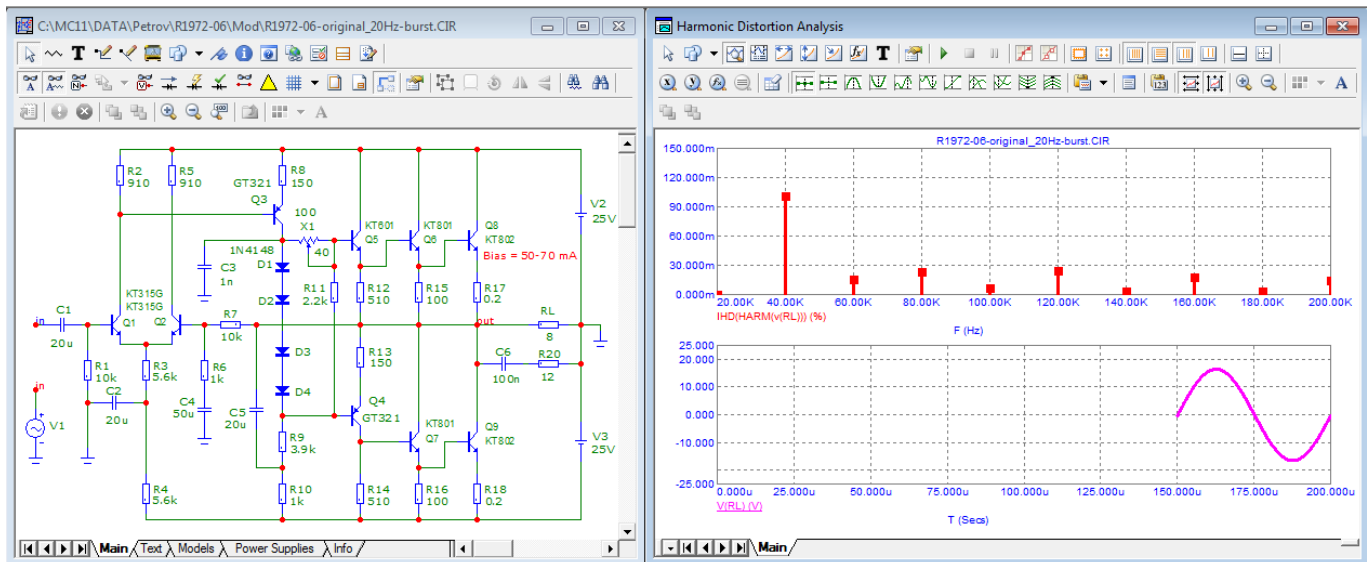


Рис. 8

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

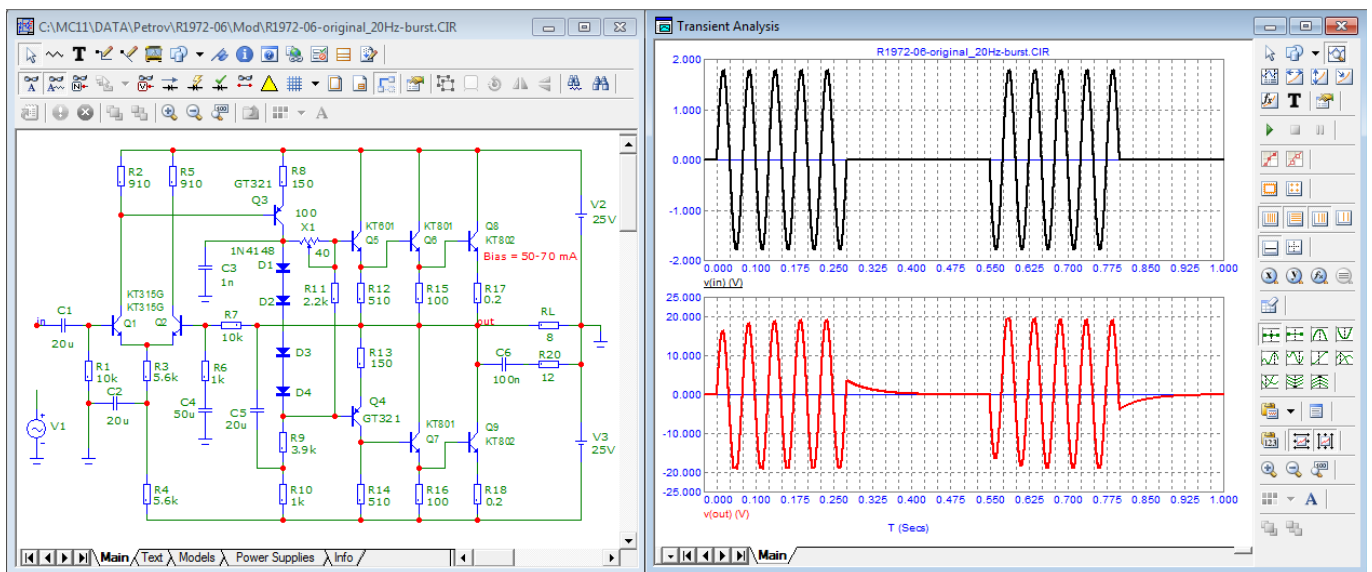


Рис. 9

Из диаграммы Бode (рис. 7) видно что время задержки прохождения сигнала (t_{PD} – time Propagation Delay) в области высших частот звукового диапазона равно 150 нс и постоянно примерно до 200 кГц. Далее наблюдается небольшой подъем ГВЗ который не оказывает существенного влияния на АЧХ.

На низшей частоте звукового диапазона (рис. 9) 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 ТИМ-искажения, рис. 10. Основная причина в том что в УН использован относительно маломощный транзистор с током покоя около 5 мА.

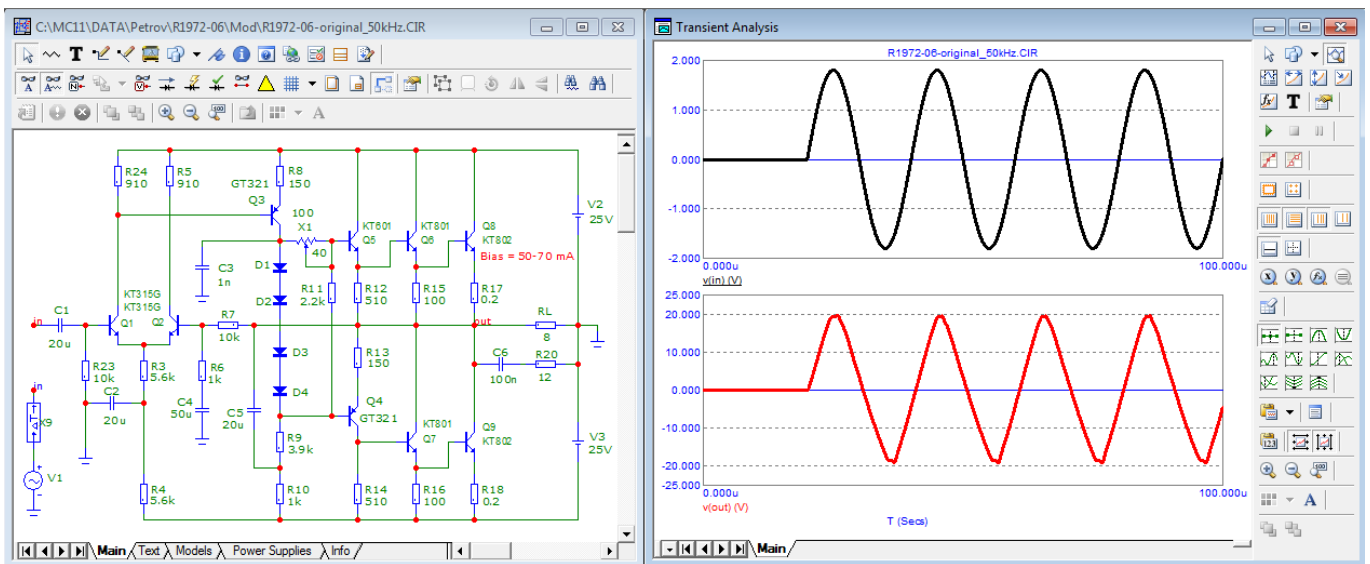


Рис. 10

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. Ток ДК несколько увеличен уменьшением резистора R4. С целью расширения полосы пропускания ток УН увеличен с 5 до 12 мА уменьшением резистора R13. С целью уменьшения коммутационных искажений ток покоя ВК увеличен с 50...70 до 100...120 мА.

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 Бode доработанной схемы показана на рис. 11

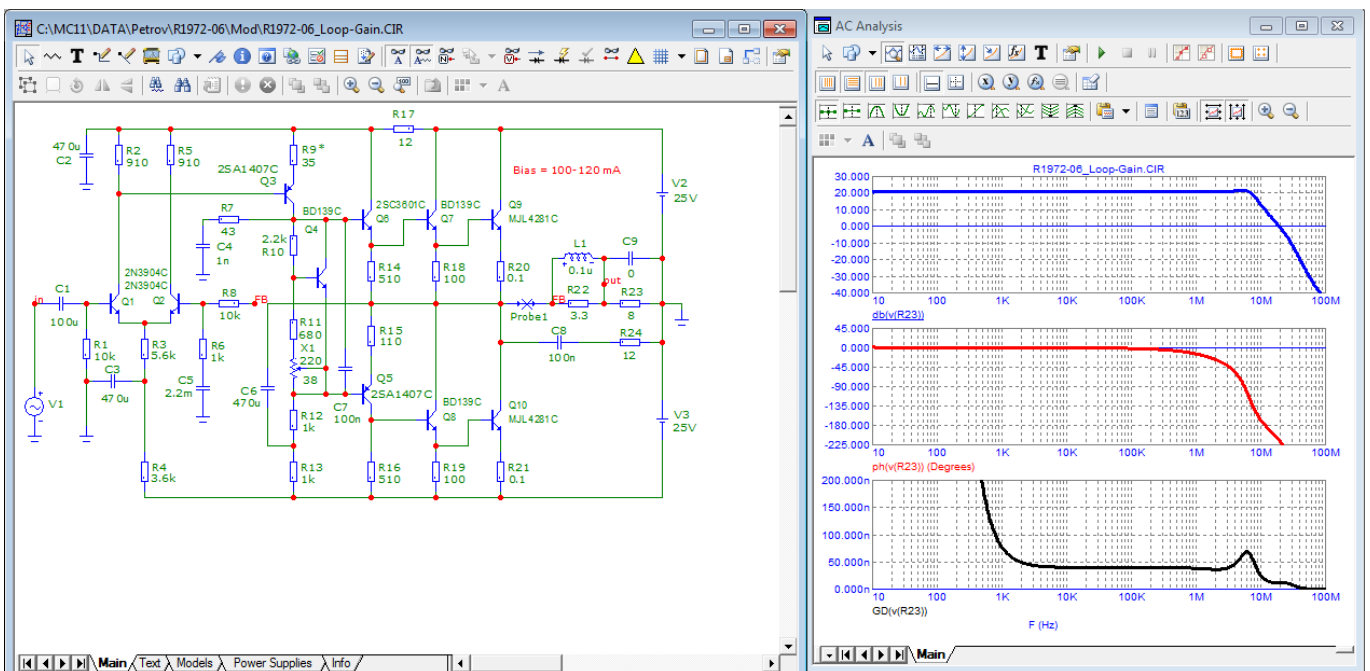


Рис. 11

Из диаграммы Бode видно что время прохождения сигнала снижено до 40 нс и оно постоянно до нескольких МГц.

Диаграмма петлевого усиления с емкостной нагрузкой до 2 мкФ показана на рис. 12

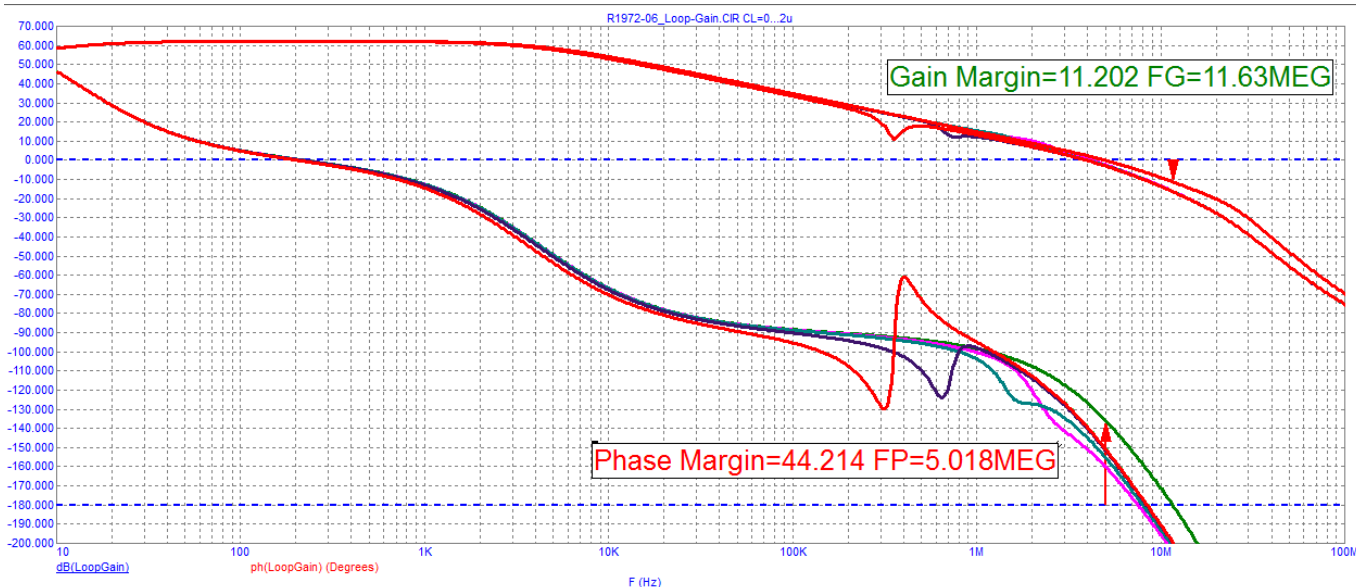


Рис. 12

Спектр сигнала частотой 20 кГц показан на рис. 13

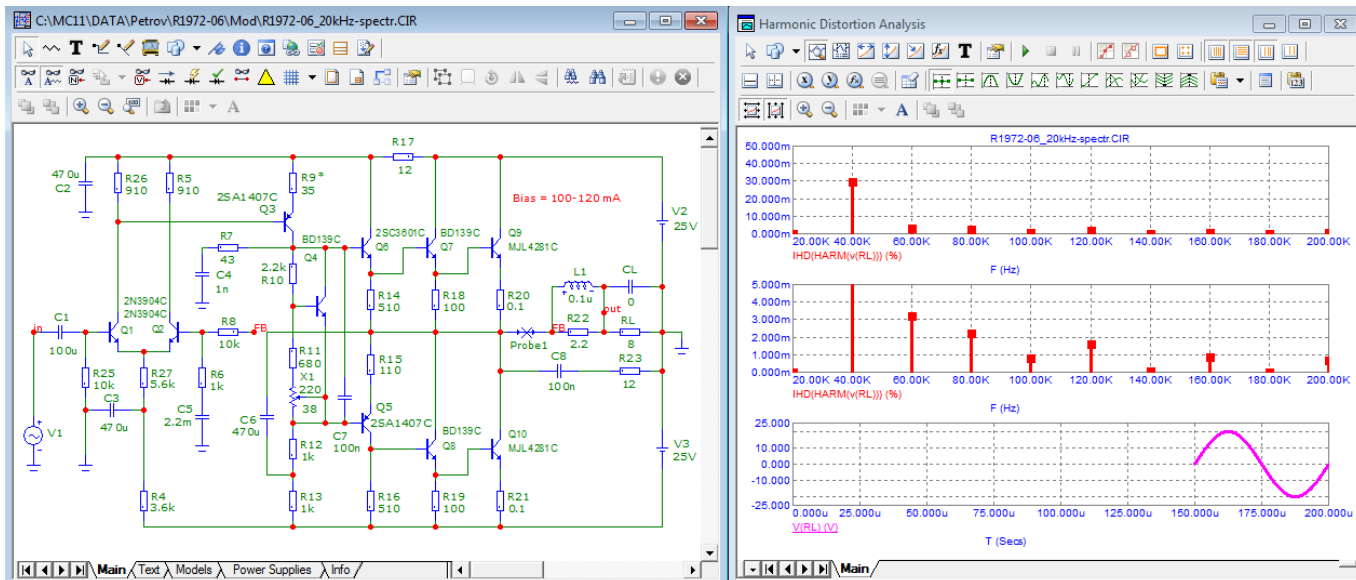


Рис. 13

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. Как видно из теста такие гармоники в спектре отсутствуют.

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

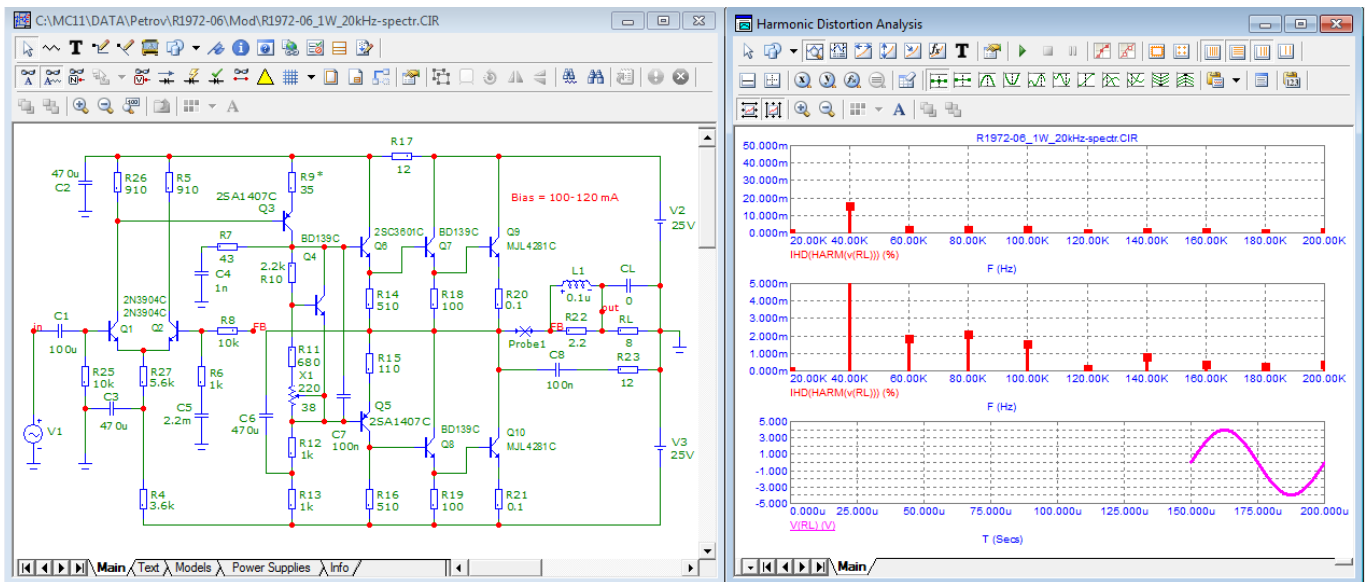


Рис. 14

И при малой мощности сохраняется такой же характер спектра. По мнению ныне покойного Владимира Лэмм (Шушурина) именно такая зависимость продуктов искажений от выходной мощности гарантирует хорошее качество звука.

Измерим компенсационным методом искажения сигнала частотой 10 кГц в виде бурстов, рис. 15. Чередование фазы первой полуволны бурстов позволяет выявить искажения памяти. Перед подачей на вход сигнал пропущен через ФНЧ 100 кГц.

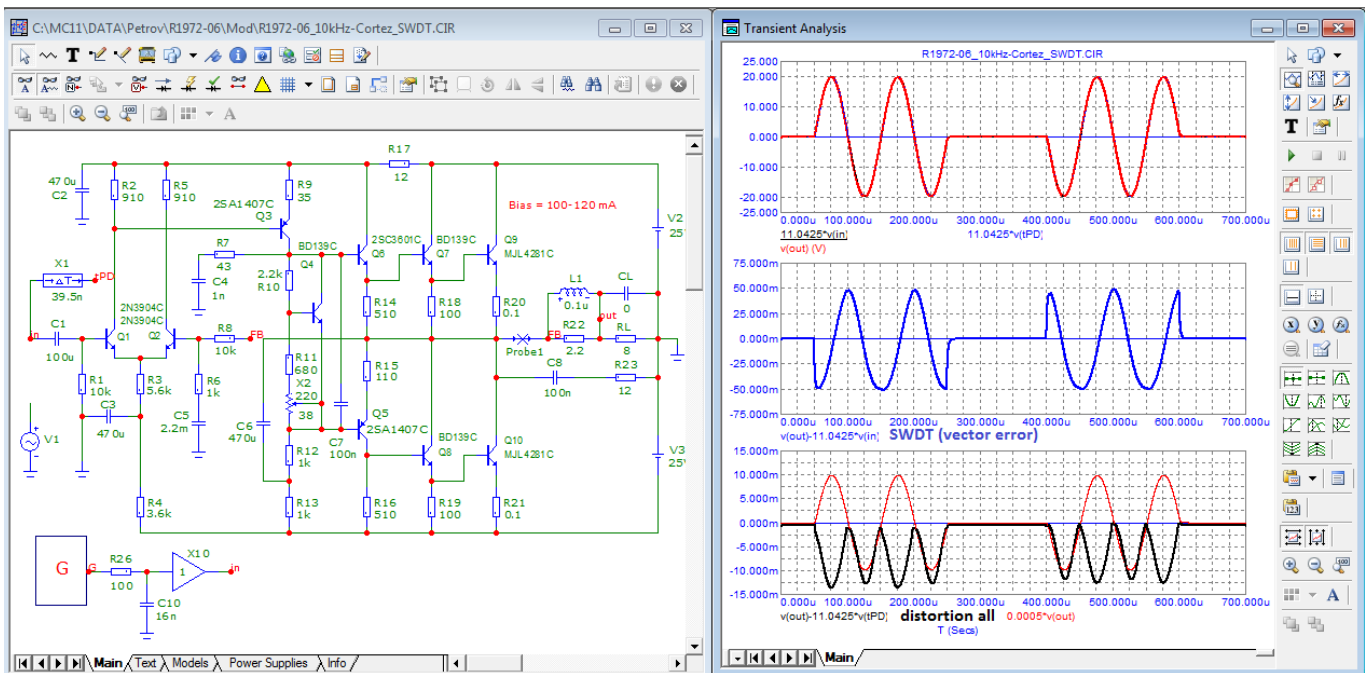


Рис. 15

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

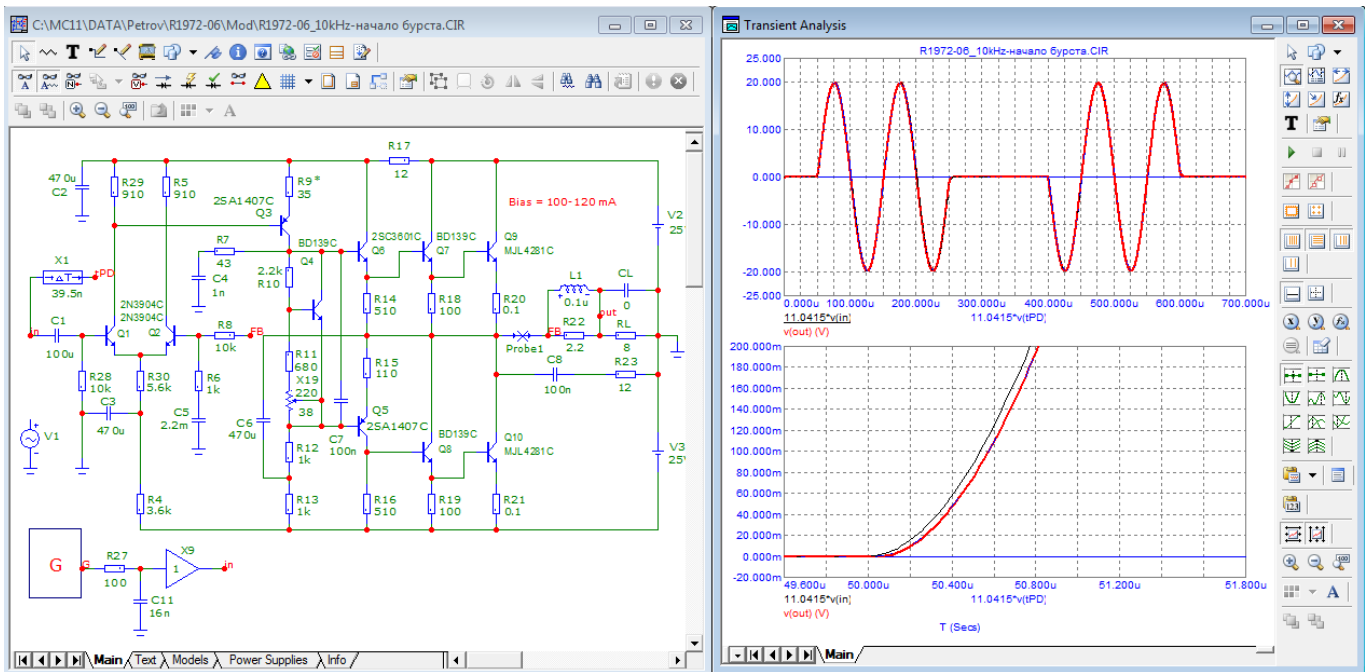


Рис. 16

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 до 500 мВ и более которыми страдает подавляющее большинство современных усилителей. Коммутационные искажения показаны на рис. 17

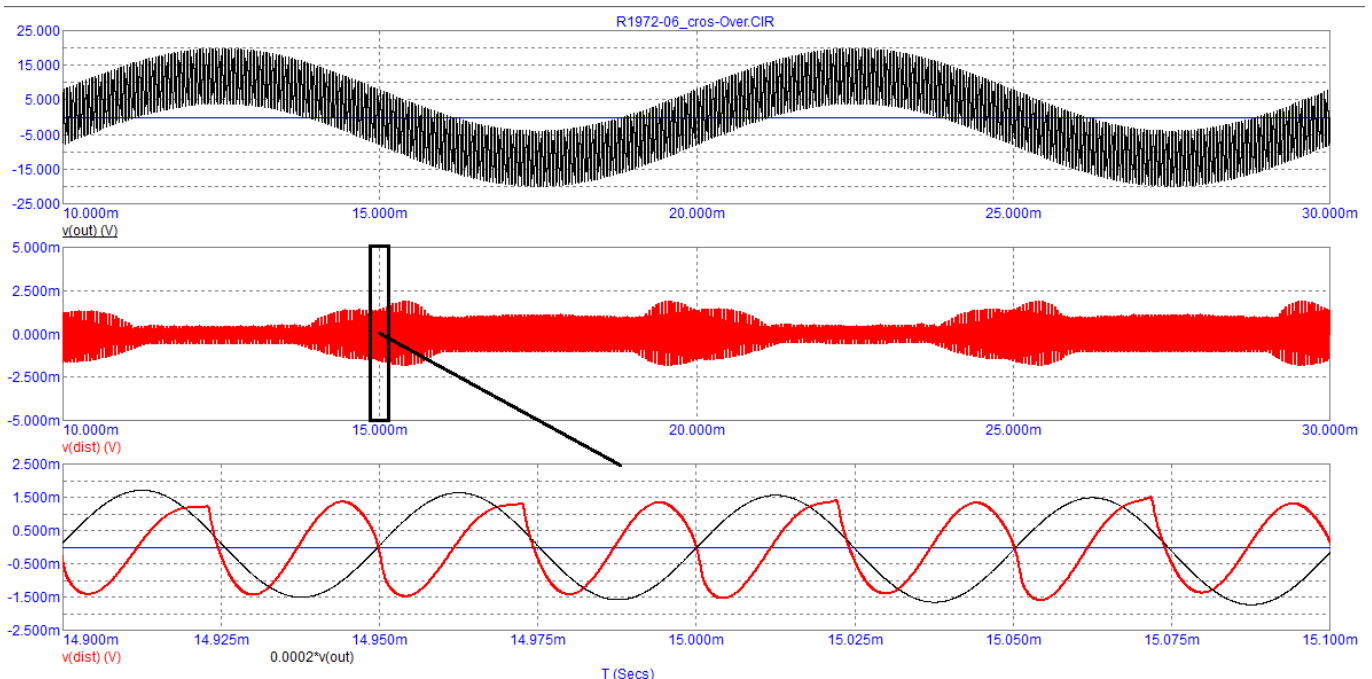


Рис. 17

В тесте использован сигнал частотой 20 кГц промодулированный частотой 100 Гц в соотношении 2:3.

На третьем графике продукты искажений показаны в растянутом виде.

Посмотрим как работает модель доработанного усилителя на частоте 100 кГц, рис.

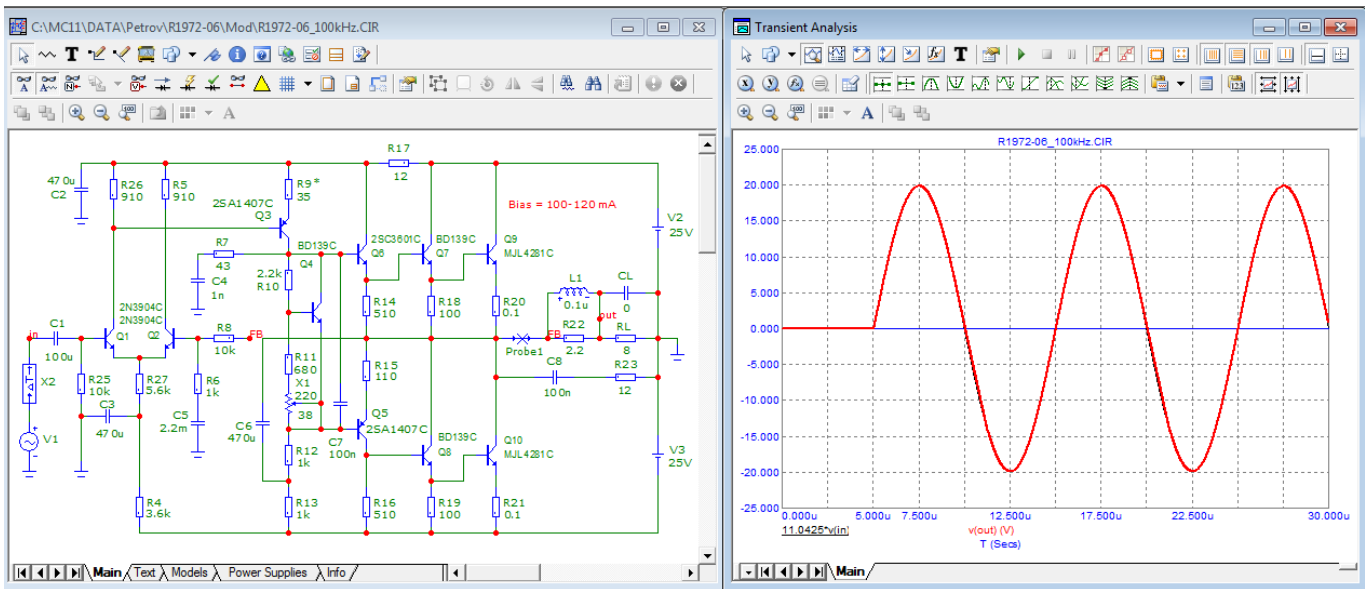


Рис. 18

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 (нет завала АЧХ), сигналы сливаются.

Посмотрим что дает увеличение номиналов конденсаторов C_1 и C_5 , рис. 19

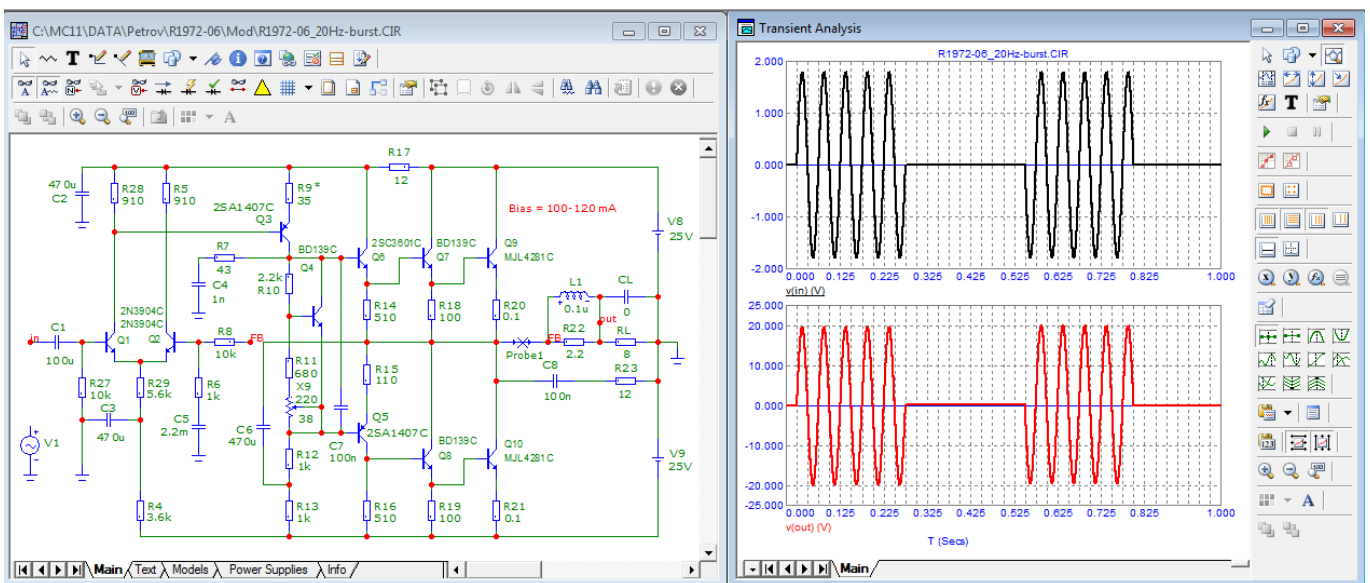


Рис. 19

Тест бурстами частотой 20 Гц подтверждает отсутствие линейных искажений и в области НЧ.

Проверим работу модели меандром частотой 20 кГц, рис. 20.

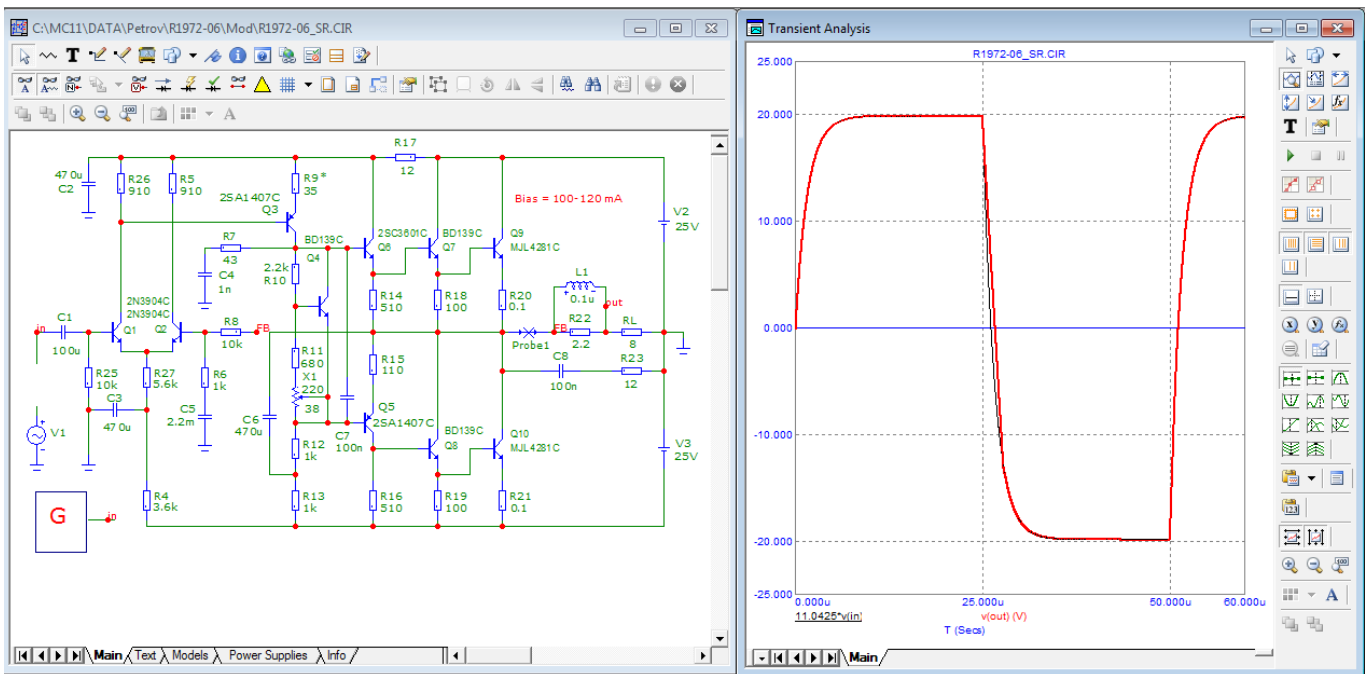


Рис. 20

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 только на отрицательном фронте. Хочется надеяться что это не окажет негативного влияния на качестве звука.

Хочется обратить внимание еще на одну особенность. Результаты приведенных тестов справедливы при работе модели от источника с низким выходным сопротивлением (не более 50 Ом). С ростом сопротивления источника сигнала будет расти и время задержки прохождения сигнала (t_{PD}) с вытекающими последствиями. Поэтому для получения хороших результатов необходимо использовать регуляторы громкости небольшого сопротивления (например, не более 10 кОм) а еще лучше использовать на входе буфер или предварительный усилитель с низким выходным сопротивлением.

Следует отметить что с сопротивлением $R_i = 2,5$ кОм что соответствует потенциометру 10 кОм в среднем положении движка время задержки прохождения сигнала в модели доработанного усилителя изменяется незначительно, рис. 21.

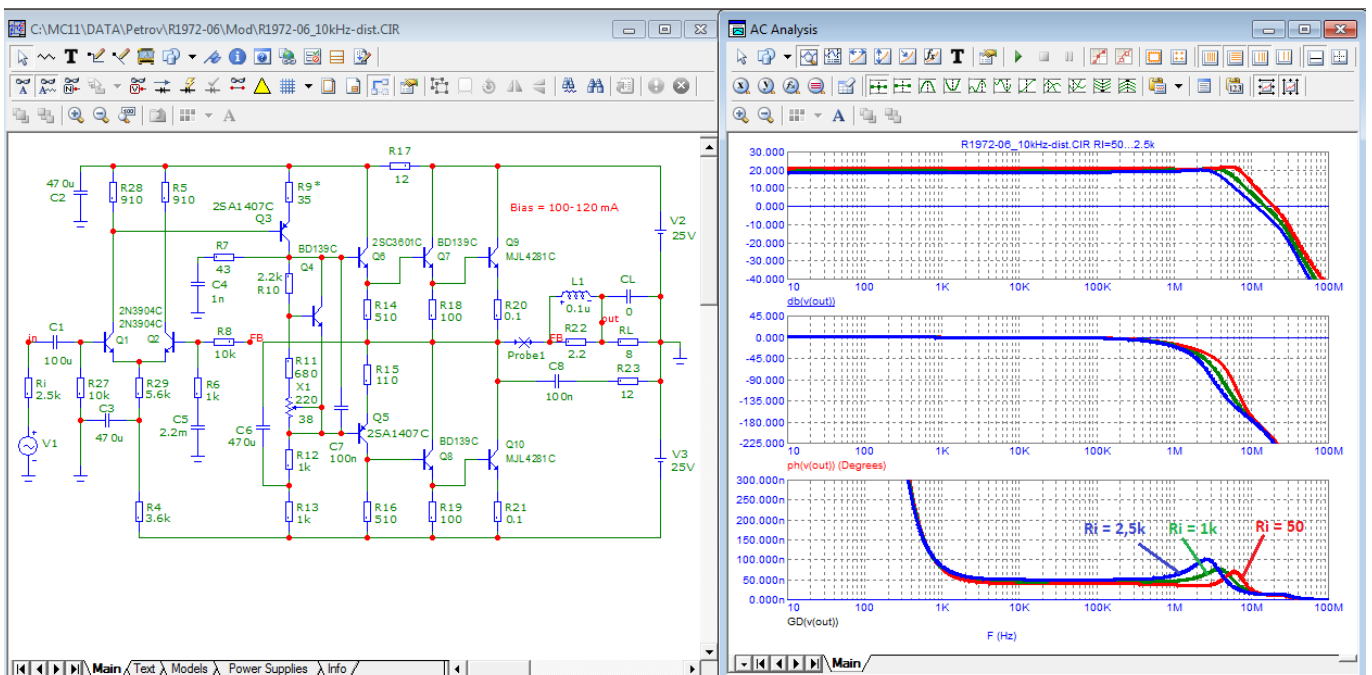


Рис. 21

С наилучшими пожеланиями
Александр Петров

p.s.

По этой схеме с небольшими изменениями выпускались усилители Электрон 103 и Электрон 104. Эта же схема была использована и в электробаяне.

К недостаткам промышленных образцов можно отнести то, что в них применялись более низкочастотные транзисторы: транзисторы КТ315 с $F_t = 250$ МГц заменены на КП307 с $F_t = 20$ МГц, транзисторы ГТ321 с $F_t = 60$ МГц заменены на КП605 с $F_t = 5$ МГц.

Более того, в Электрон 103 несколько уменьшен ток УН что также снижает полосу пропускания.