

# Философия дизайна Джона Керла

(на основании публикаций, интервью и высказываний на форумах)

Джон Кёрл (John Curl) вполне заслуженно является легендой среди аудиофилов. Известный аудиоинженер работал в „Ampex“ (1967 - 1969), с 1971 года был независимым консультантом ряда фирм, включая: Mark Levinson Audio Systems (в которой разработал легендарные JC-2/JC-3, ML-2), Gale Electronics and Design (London), I.H.E.M. (Switzerland), and Alembic Inc. (San Francisco). Вместе с EERO LEINONEN и MATTI OTALA занимался исследованиями Transient Intermodulation Distortion (TIM) [1].

Он работал консультантом по дизайну в ряде компаний высокого класса, включая Parasound (разработчик-консультант с 1989 года), Audible Illusions и Constellation Audio. Его фонокорректор Vendetta Research SCP-2 [2] считается одним из величайших достижений в области воспроизведения фонокорректора. Его партнерами были такие светила как Дэйв Уилсон и Джефф Роланд.

В 2019 году Джон Керл начал свое сотрудничество с английскими iFi Audio и Abbingdon Music Research (AMR) в качестве технического консультанта.

Из высказываний в [3]:

«Раньше я старался изо всех сил и вручную балансировал любые остаточные гармоники четного порядка, чтобы получить как можно меньше искажений. Сегодня я оставляю в конечном итоге немного или много гармоник четного порядка, потому что эта гипотеза имеет некоторые достоинства. Я согласен с правом высказать мнение, что большая 2-я гармоника делает усилитель хорошо звучащим. Можно спорить, действительно ли 2-я гармоника необходима для хорошего воспроизведения звука. Тем не менее, мы не можем полагаться на необходимость дополнительных искажений, чтобы все звучало наилучшим образом. Аналоговая лента, например, практически не имеет искажений 2-й гармоники, только 3-ю, а иногда и 5-ю гармонику, но ее очень приятно слушать без добавления 2-й гармоники в микс. Большая проблема - это НЕЧЕТНЫЕ ГАРМОНИКИ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА. Например, 7-я и 9-я гармоники, которых следует избегать любой ценой.

Факты таковы, что легко сделать усилитель, который хорошо измеряется при высоких уровнях и плохо измеряется при низких уровнях сигнала. Причина в том что кроссоверные искажения часто скрываются в остаточном шуме (80 кГц или около того). Мы обнаружили, что остаются различия в конструкциях усилителей, которые все еще не поддаются нашему полному пониманию.

В дальнейшем я руководствовался рекомендациями Отала, создавая линейные дискретные конструкции с высокой полосой пропускания разомкнутого контура. Что беспокоило Матти, так это то, что искажения генерировались НАМНОГО НИЖЕ ограничения скорости нарастания.

К сожалению, вы так мало доверяете сочетанию человеческого уха и мозга. Немногие дизайнеры доверяют своим ушам больше, чем своему измерительному оборудованию. Я доказал себе, что мои проекты могут звучать паршиво, но измеряться просто отлично. Почему? Не знаю, но проверяю это постоянно. Только наши уши могут заметить разницу в этих условиях.

Например, около 25 лет назад, когда я был в Японии, меня попросили вслепую прослушать 3 отдельные аудиосхемы, сделанные не мной. Я мог различить их и указать, какие из них были лучшими. Это поразило японцев, но не удивило меня. Я делаю это все время.»

**Примечание.** Следует отметить что на высокую полосу пропускания разомкнутого контура М.Отала обратил внимание еще в работе [4] и старался придерживаться этих рекомендаций. Таким подходом заразился и Джон Керл.

**Итак, основная философия дизайна Джона Керла заключается в следующем:**

1. Во всех каскадах полностью симметричная конструкция. Балансные схемы значительно улучшают характеристики перегрузки усилителя, обеспечивают мгновенное восстановление после ограничения и позволяют избежать проблем динамического сдвига уровня постоянного тока, которые могут вызвать серьезное несимметричное ограничение переходных сигналов и которые часто встречаются в несимметричных конструкциях. Входной каскад должен быть на JFET-транзисторах.
2. Все каскады используются в классе А, за исключением силовых транзисторов, которые работают в классе АВ с высоким током покоя, обеспечивая работу в классе А как можно выше, желательно не менее 10 Вт. Это полностью устраняет перекрестные искажения.
3. Полоса пропускания с разомкнутым контуром должна быть высокой (выше звукового диапазона). Это обеспечивает постоянство глубины ООС в звуковом диапазоне, постоянство выходного сопротивления и малые фазовые искажения. Более того это обеспечивает высокое быстродействие ООС что способствует снижению кроссоверных искажений.
4. Петлевое усиление не более 30...40 дБ (в этом он доверял выводам М.Оталы).
5. Скорость нарастания выходного напряжения не менее 100 В/мкс. Если есть возможность получить 500 В/мкс, тоже не повредит.
6. Тщательный подбор транзисторов по всем параметрам, как пар дифкаскадов, так и комплементарных транзисторов.
7. Строгий подход к выбору пассивных компонентов высокого качества не взирая на их цену.

На днях мне попалась на глаза сравнительно простая схема клона JC-3 и я решил набрать ее модель и провести краткий анализ. Диаграмма Бode показана на рис. 1

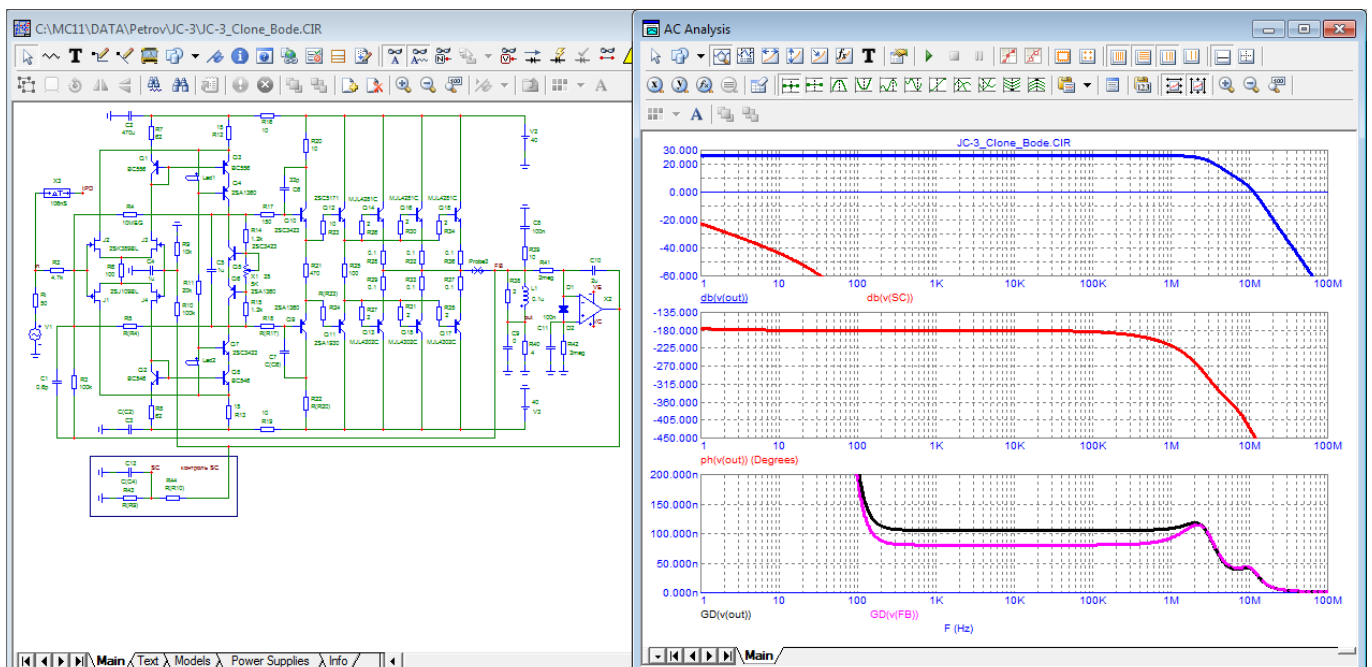


Рис. 1. Диаграмма Бode

Диаграмма Бode показала низкое и постоянное значение ГВЗ в широком диапазоне частот. Фиолетовый график ГВЗ характеризует time Propagation Delay до точки с которой берется ОС и соответственно характеризует быстродействие ООС.

График петлевого усиления показан на рис. 2.

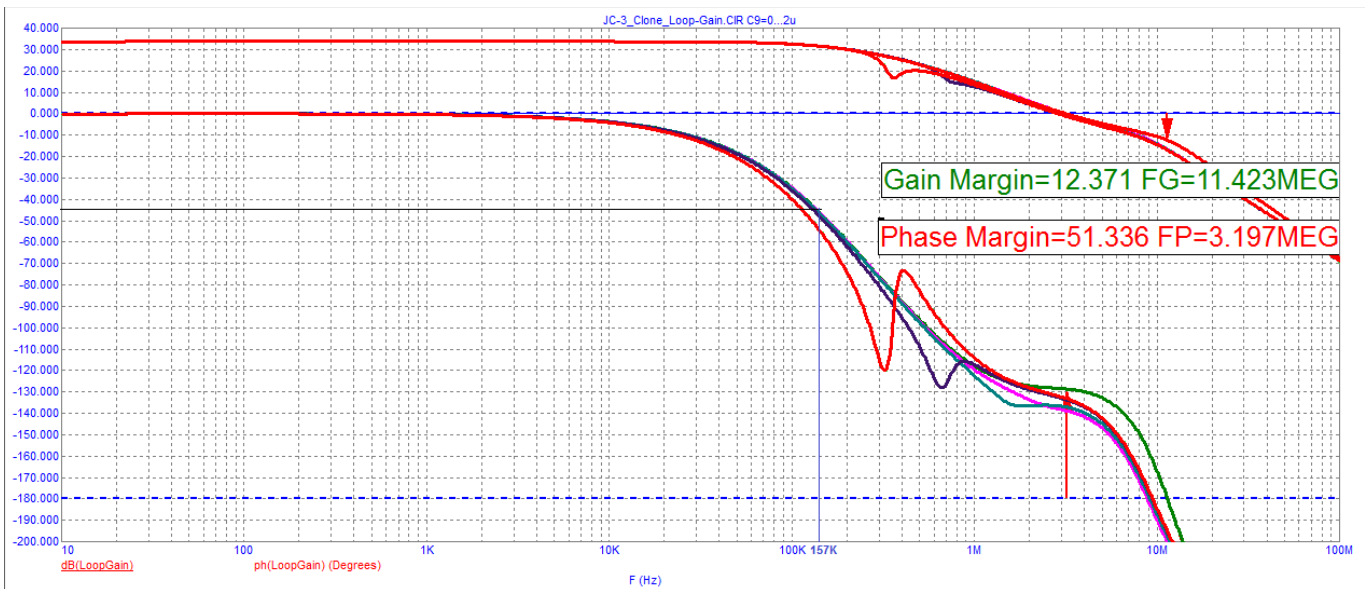


Рис. 2. График петлевого усиления

Из графика видно что петлевое усиление равно 34 дБ и постоянно от инфранизких частот до 100 кГц. Полоса с разомкнутым контуром на уровне -3 дБ равна 157 кГц. Посмотрим спектр гармоник на верхней частоте звукового диапазона, рис.3.

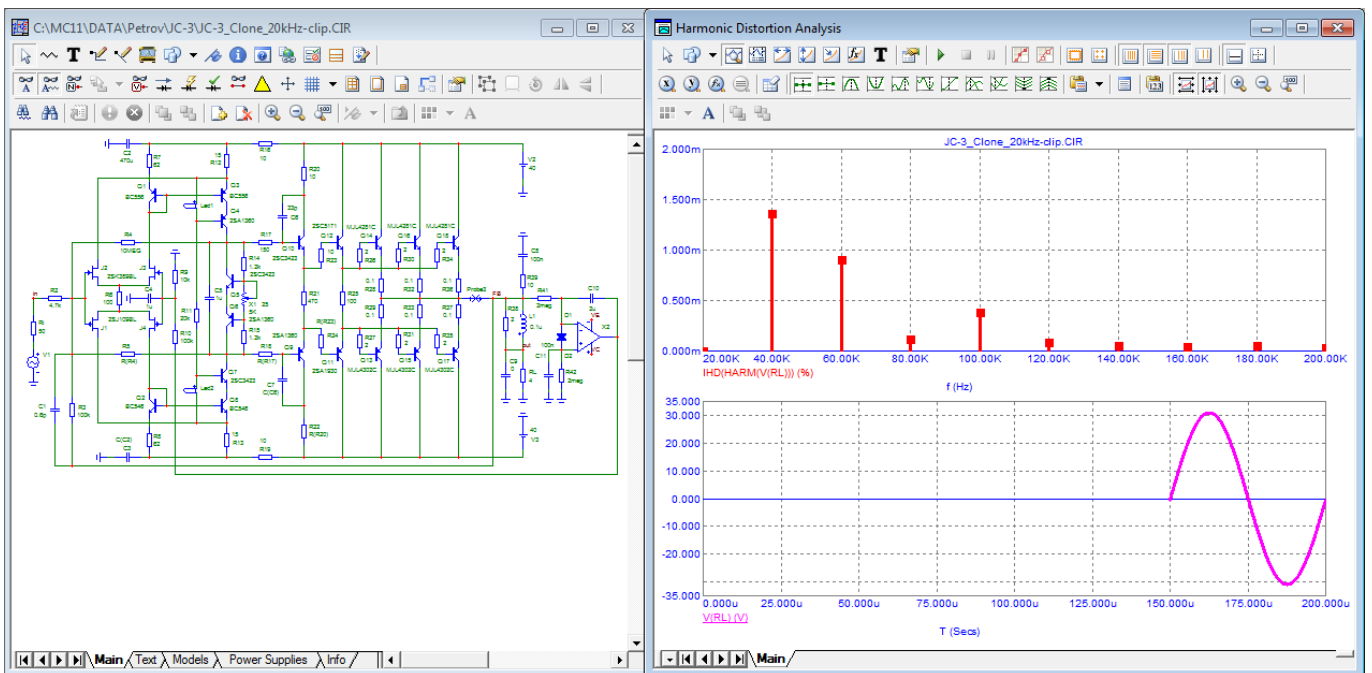


Рис. 3. Спектр искажений на частоте 20 кГц

Из теста видно что спектр спадающий, начиная с 6-й гармоник и выше ничего нет. Посмотрим продукты искажений во временной области на частоте 10 кГц, рис. 4.

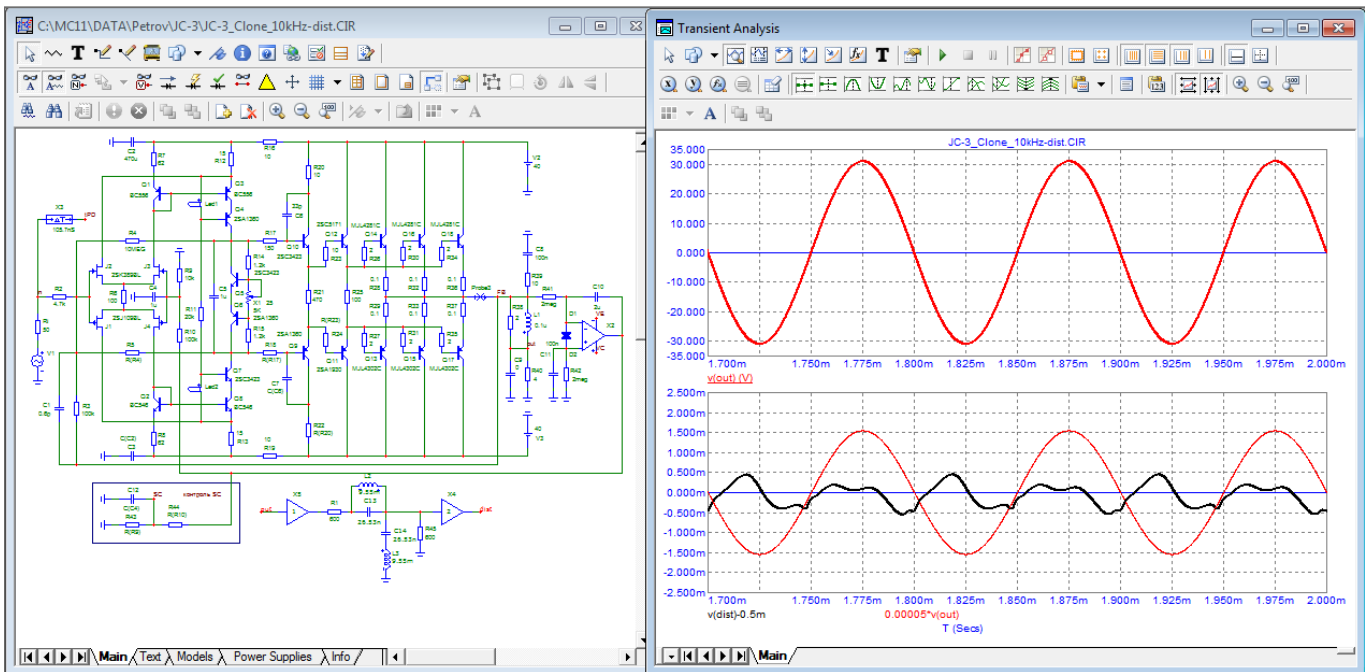


Рис. 4. Продукты искажений сигнала частотой 10 кГц.

Напротив переходов через ноль мы видим незначительные кроссоверные искажения. Ток покоя выставлен около 130 мА на выходной транзистор. Посмотрим какой мощности будет соответствовать класс А при таком токе покоя, рис. 5.

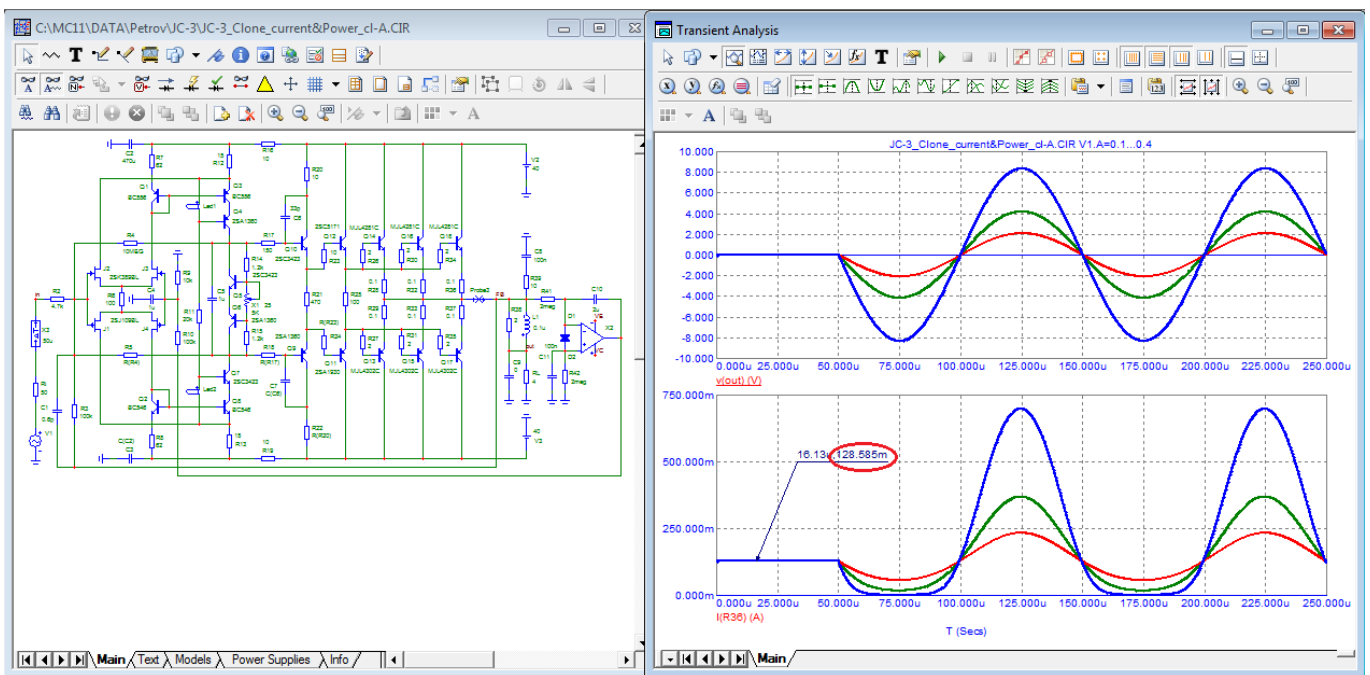


Рис. 5. Токи выходных транзисторов

Как видим при пиковом выходном напряжении 4 В на нагрузку 4 Ома еще отсутствует отсечка, что соответствует выходной мощности 2 Вт. Но даже такого тока покоя достаточно в классе АВ чтобы свети коммутационные искажения к ничтожно малой величине без каких либо усложнений схемы смещения (например, Super-A).

Работа в режиме клиппирования показана на рис. 6.

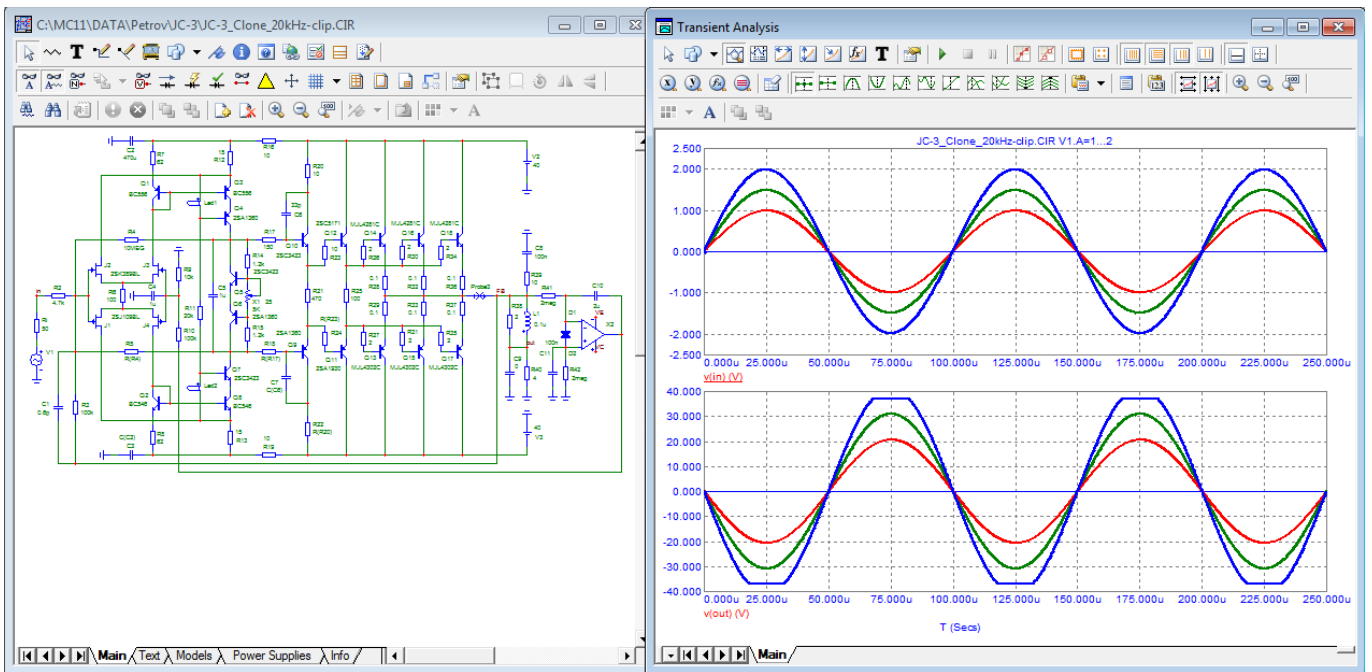


Рис. 6. Работа на частоте 20 кГц в режиме клиппирования

Как видим, выход из клиппирования не имеет никаких проблем  
 Проверим работу модели в режиме атаки/спада на частоте 10 кГц, рис. 7

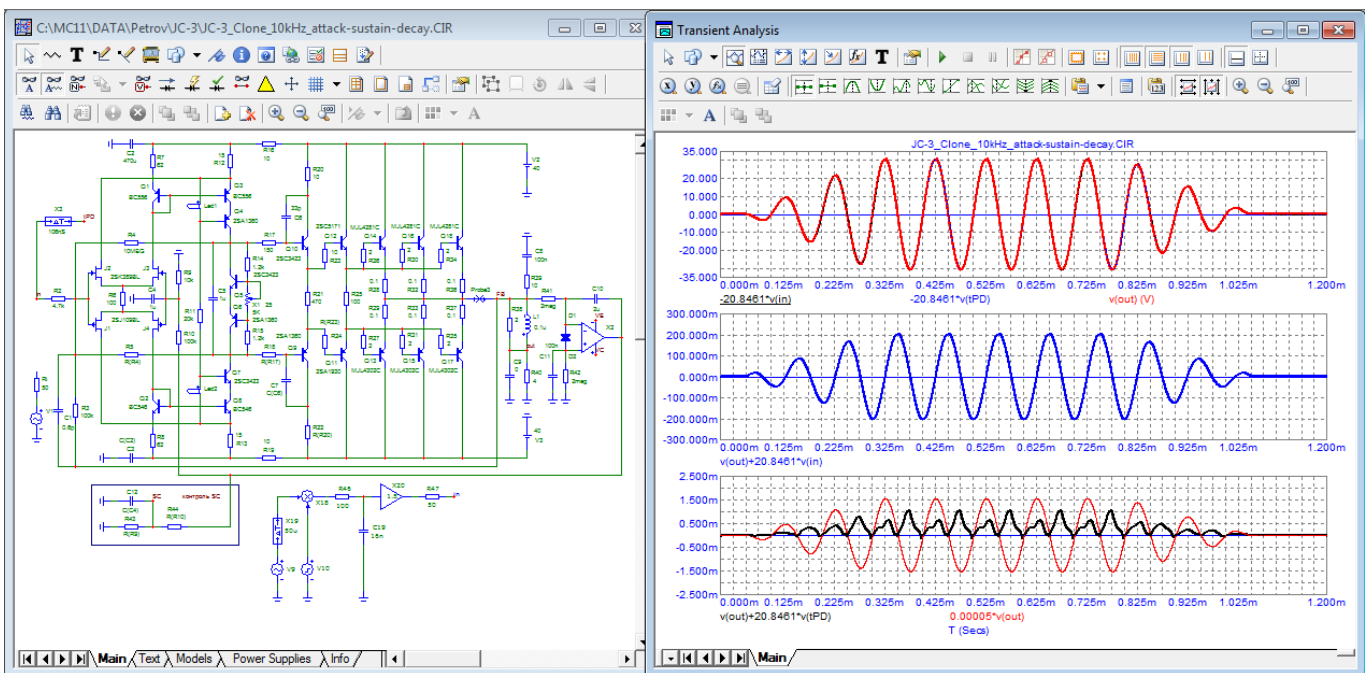


Рис. 7. Работа модели с бурстом 10 кГц

Как видим, во временной области нет искажений связанных с вращением фронтов сигнала типа SID в атаке. На линейном участке бурста уровень искажений соответствует искажениям рис. 4 и не превышает 1 мВ от пика до пика.

Измерим выходное сопротивление модели в точке съема ООС. Для большей наглядности диапазон частот разбит на 3 участка: 20...200; 200...2 кГц и 2...20 кГц, рис. 8 - 10.

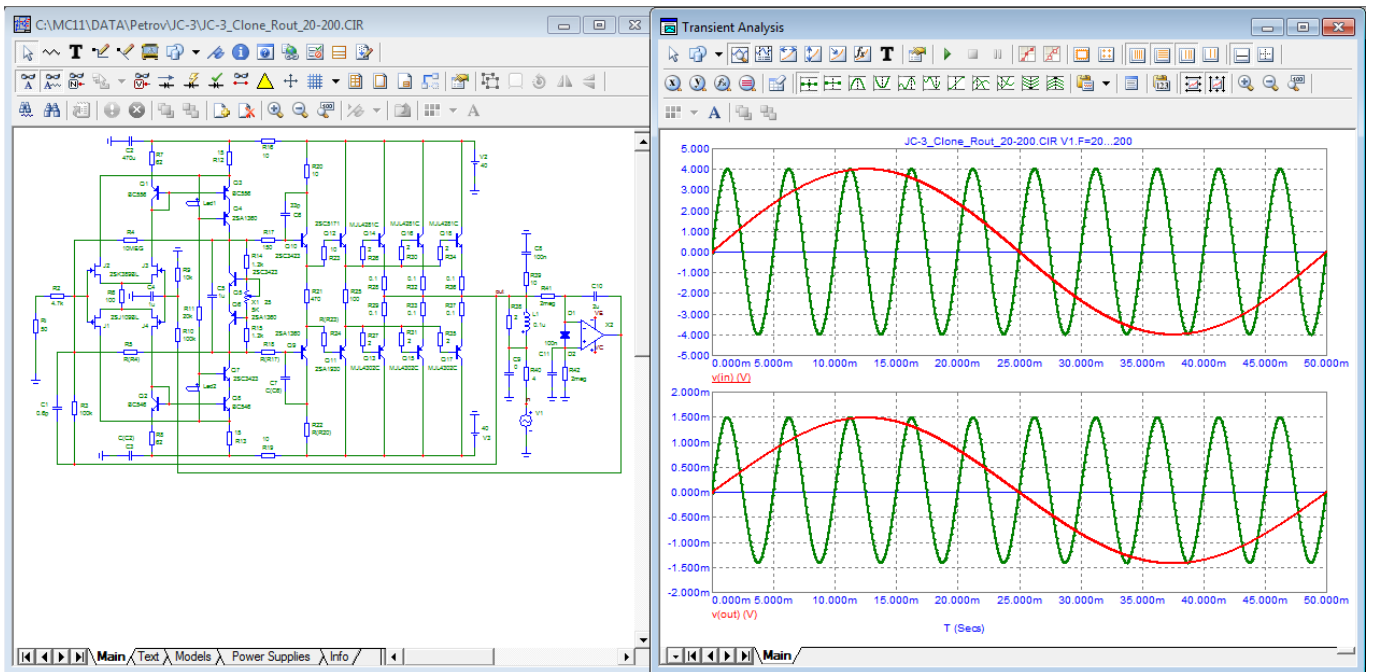


Рис. 8. Результат измерения выходного сопротивления на частоте 20 и 200 Гц.

С генератора подается сигнал амплитудой 4 В. При нагрузке 4 Ома напряжение в точке контроля в Вольтах соответствует выходному сопротивлению в Омах. Как видим выходное сопротивление стабильно, строго в фазе с тестовым сигналом и равно около 0,0013 Ом.

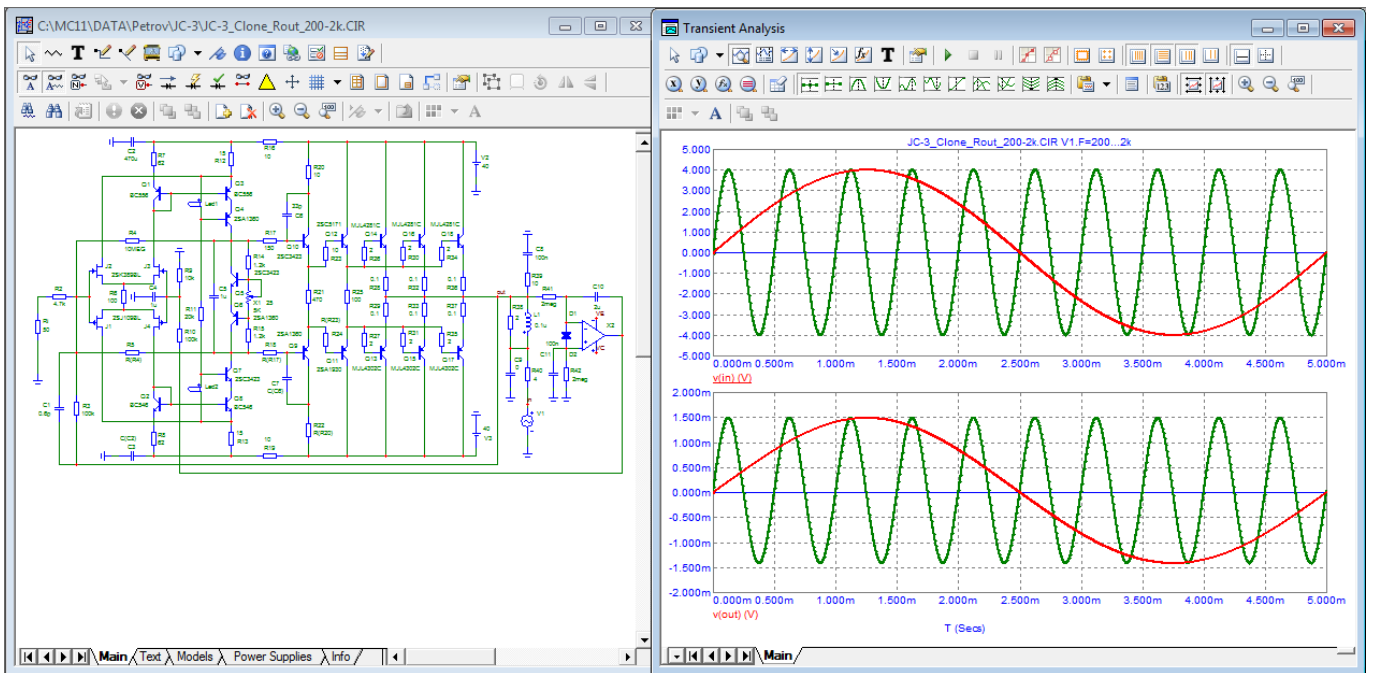


Рис. 9. Результат измерения выходного сопротивления на частоте 0,2 и 2 кГц.

Как показывает тест и на частотах 200 Гц и 2 кГц имеем тот же результат.

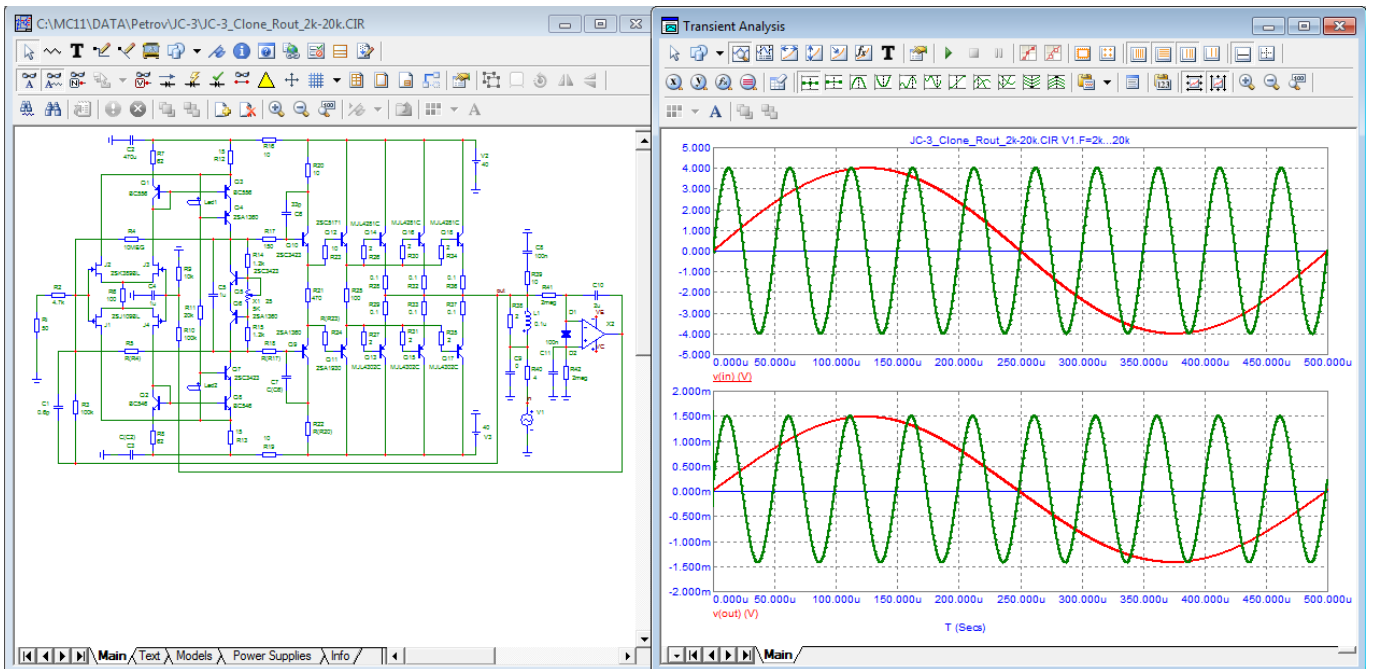


Рис. 10. Результат измерения выходного сопротивления на частоте 2 и 20 кГц.

Благодаря высокой частоте первого полюса во всем звуковом диапазоне частот выходное сопротивление стабильно и строго в фазе с тестовым сигналом!

Заодно проверим работу модели с суммой меандра частотой 20 кГц и синуса 1 МГц, рис. 11. Это более сложный тест по сравнению с тестом DIM-100 где используется меандр частотой 3,15 кГц и синус частотой 15 кГц.

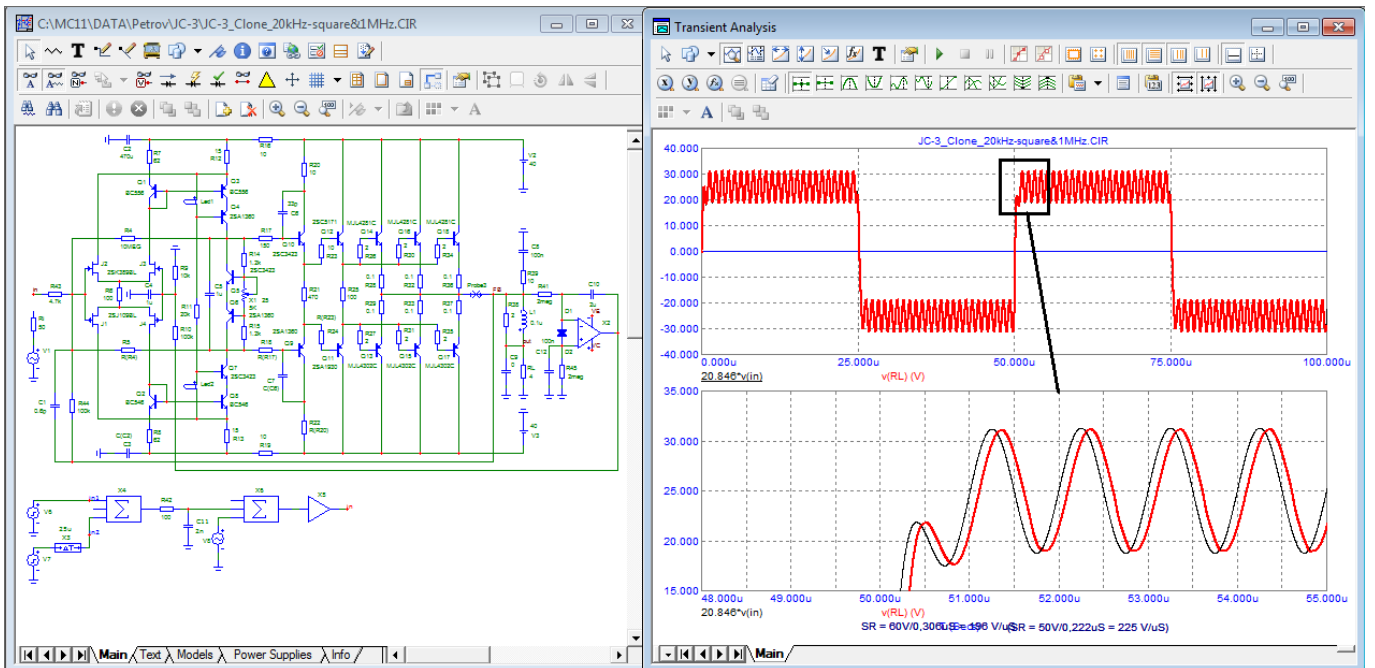


Рис. 11. Усиление сигнала из суммы меандра 20 кГц и синуса 1 МГц.

Соотношение амплитуд сигналов 4:1.

Как видим сигнал частотой 1 МГц усиливается с таким же  $K_u$  как и сигналы звукового диапазона без каких либо видимых искажений.

Из недостатков я бы отметил сравнительно низкое входное сопротивление и рекомендовал бы использовать на входе буферный каскад.

## Литература:

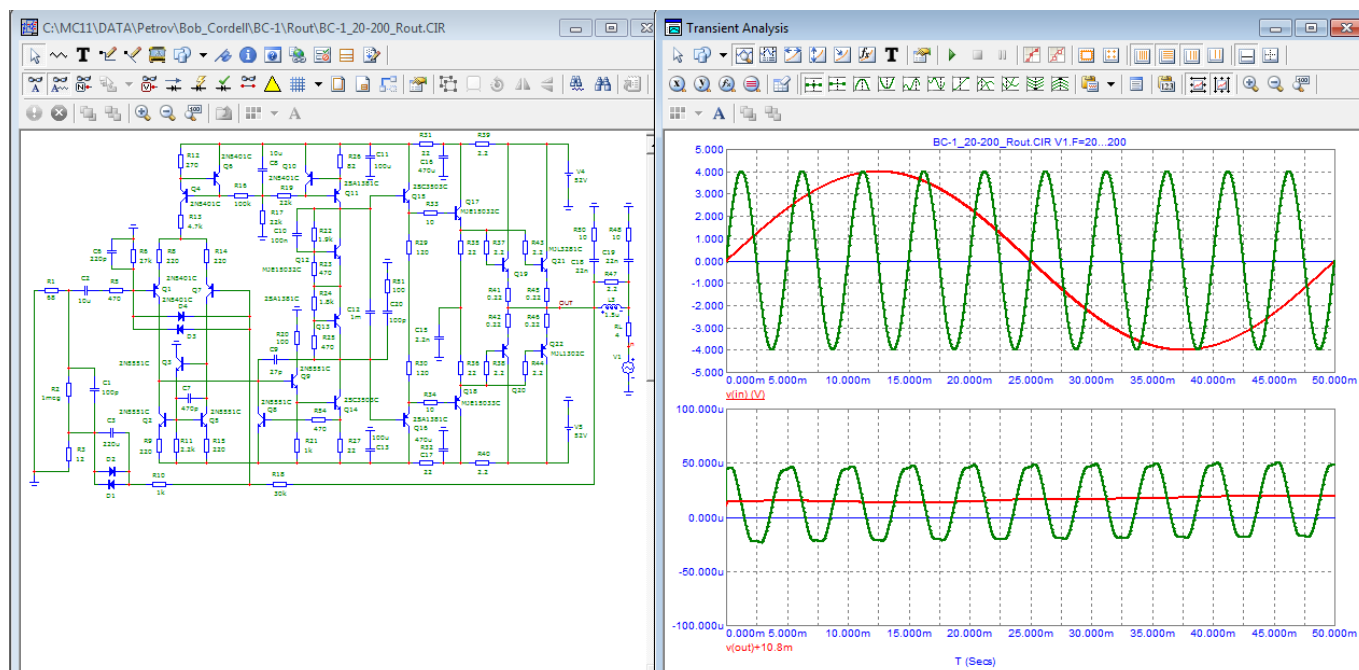
1. EERO LEINONEN, MATTI OTALA, AND JOHN CURL, A Method for Measuring Transient Intermodulation Distortion (TIM)\*, Presented October 30, 1976, at the 55th Convention of the Audio Engineering Society, New York.
2. The Absolute Sound\_ May-June 2012, <https://www.moremusic.nl/reviews/passlabs/XP-30-TAS.pdf>
3. John Curl, Condemnation without Examination is Prejudice, or Words of Wisdom, may 2006
4. Daugherty and Greiner, "Some Design Objectives for Audio Power Amplifiers." 'IEEE Transactions Audio Electroacoustics' pp43-48 Mar 1966.
5. David Sheriff, An oldie but goodie Interview with John Curl.  
[https://parasound.com/blogs/news/an-oldie-but-goodie-interview-with-john-curl?srsId=AfmBOopNgk86Y4tvol\\_\\_29IGUZvL0-8Vr8vP3bcyJ2G4UXID-cR64nvq](https://parasound.com/blogs/news/an-oldie-but-goodie-interview-with-john-curl?srsId=AfmBOopNgk86Y4tvol__29IGUZvL0-8Vr8vP3bcyJ2G4UXID-cR64nvq)

Краткий анализ провел

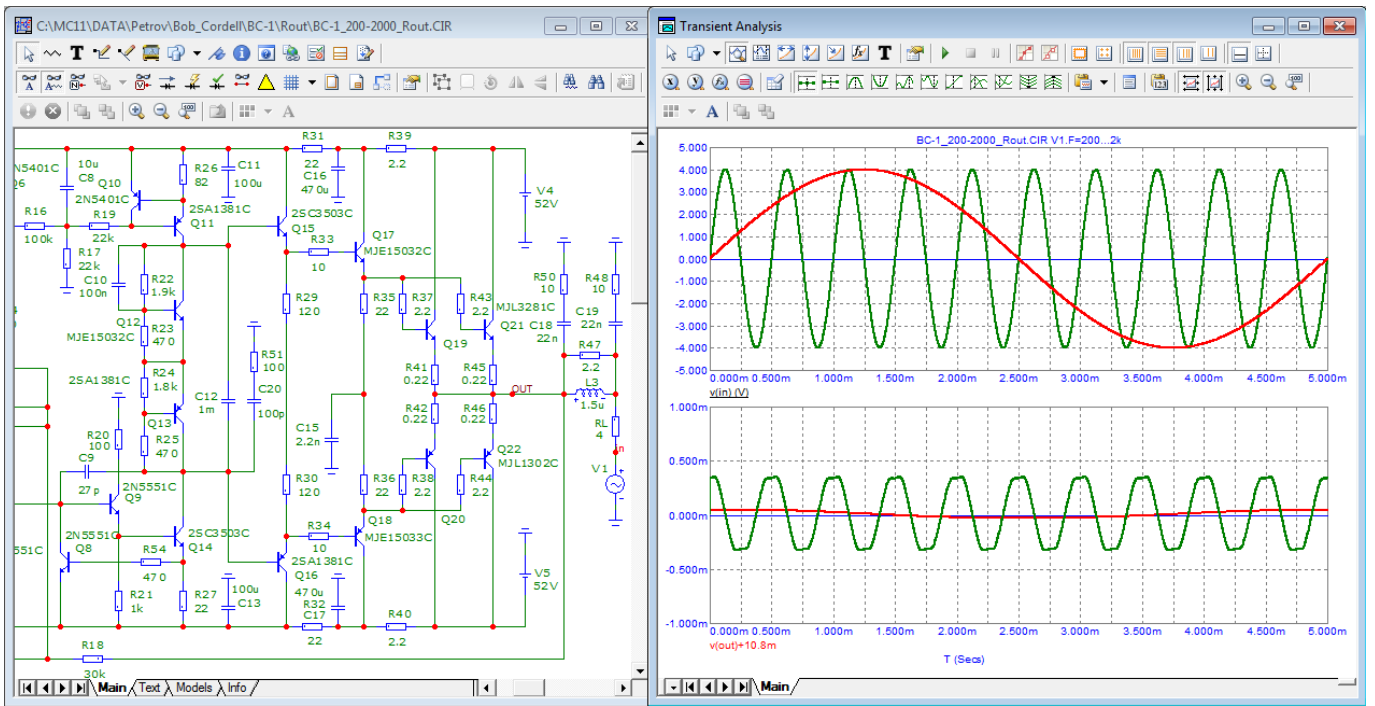
Александр Петров  
10 декабря 2024 года

## Приложение.

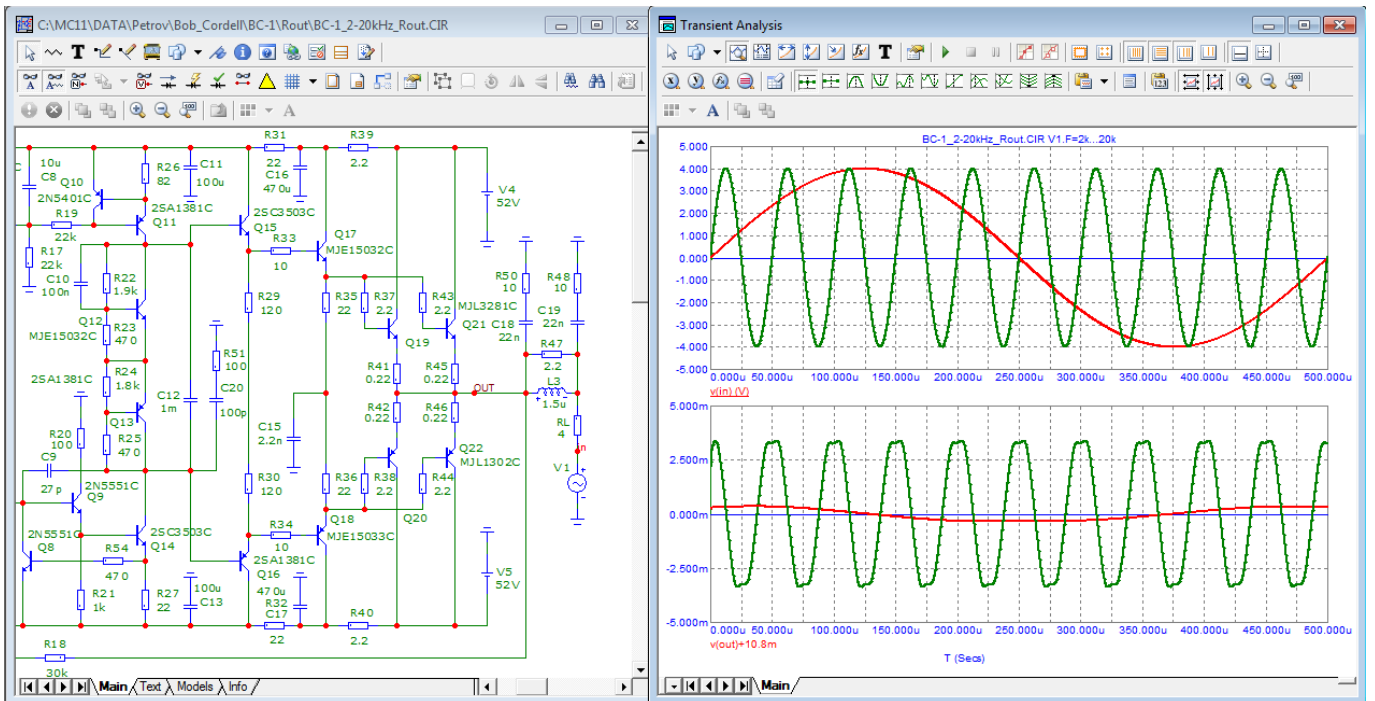
Для сравнения тесты выходного сопротивления одной из последних разработок Боба Корделла



Результат измерения выходного сопротивления на частотах 20 и 200 Гц



Результат измерения выходного сопротивления на частотах 200 и 2000 Гц



Результат измерения выходного сопротивления на частотах 2 и 20 кГц

Нетрудно убедиться в каких широких пределах находится выходное сопротивление что не может не сказываться на качестве звука. Более того даже при таких низких токах нагрузки (всего 1 Ампер пиковое) имеют место явно выраженные искажения.