

Секреты УНЧ Сокол. Новинки схемотехники.



Звукотехника. Особенности схемы УНЧ Сокол
Александр Соколов 1t308a@gmail.com
Любителям и профессионалам

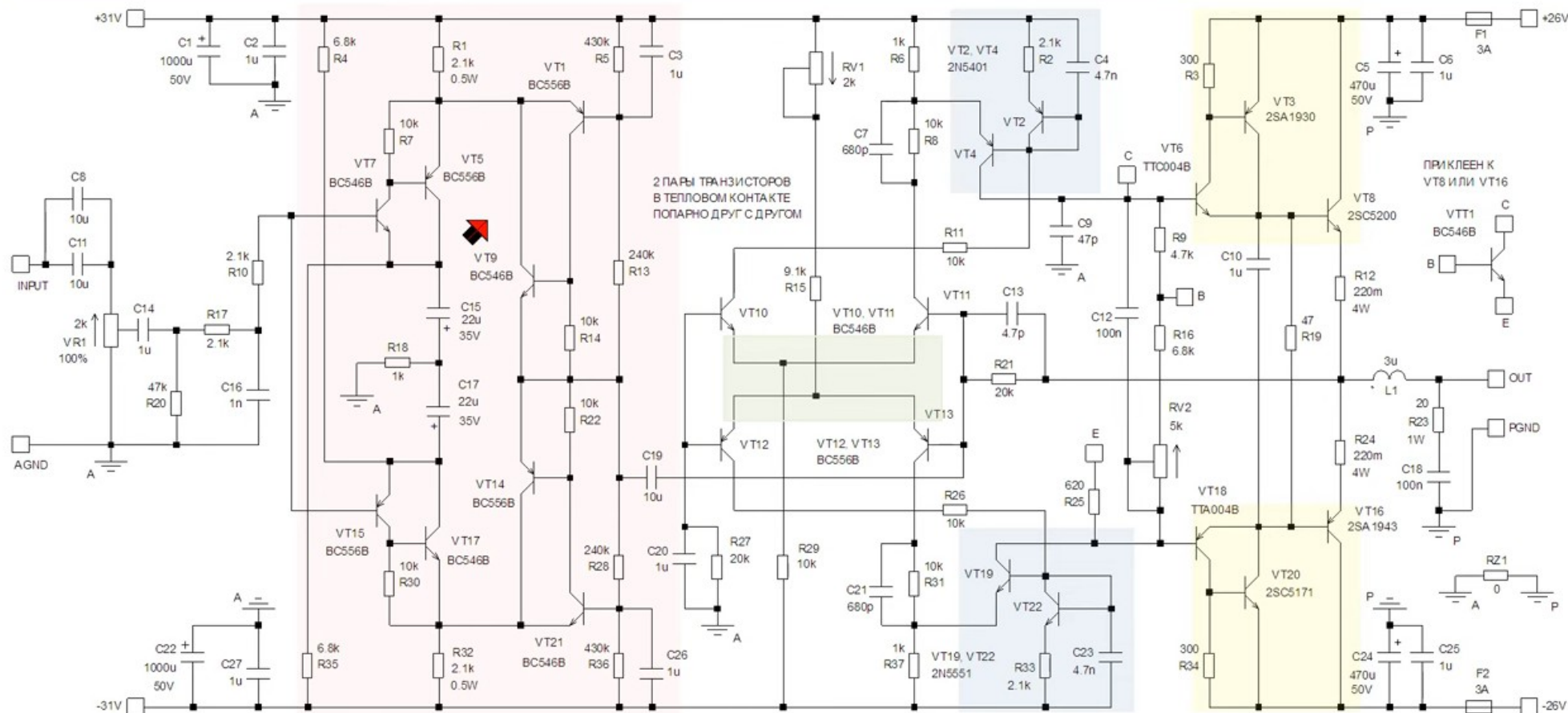


Тема этой лекции: особенности схемотехники УНЧ Сокол и каким образом достигнуто качество звучания, по мнению уже многих собравших его, значительно превосходящее все слышанное прежде. В былинном 1979 году я заинтересовался, почему транзисторные и ламповые УНЧ звучат по-разному, причем ламповые явно лучше. Ну и начал свое расследование. И, хотя тема УНЧ истоптана вдоль и поперек, я все же нашел некоторые ранее не применяемые технические решения, позволившие мне частично, а может и полностью, нивелировать разницу между транзисторами и лампами. И, судя по уже многочисленным отзывам, попытка удалась. Я предложил два новых технических решения, это токовый вход с ИТУН в качестве предусилителя, а также токовое зеркало с двойным управлением. В дополнение я улучшил уже известные решения, убрав эмиттерные резисторы из двойного диффкаскада и заменив на выходе тройку Локанти на тройку Шиклаи. Кроме того, исходя из мысли, что одна лишь сверхлинейность еще не гарантирует хорошего звучания, обратил внимание на АЧХ и ФЧХ петли ООС. Идея такая, расширить полосу петли ООС по возможности до 10 МГц для ускорения реакции, и не допускать фазового сдвига более 300° во всей этой полосе. Важно, для измерения линейности не использовать КНИ по спектру, как малоинформативный фактор, а измерять размах внесенных усилителем артефактов (мусора). Только так можно судить об истинной, а не формальной линейности. Вот три условия, или, по Сухову, тантры, на мой взгляд, определяющие качество УМЗЧ с общей ООС, независимо от использованных в нем деталей:

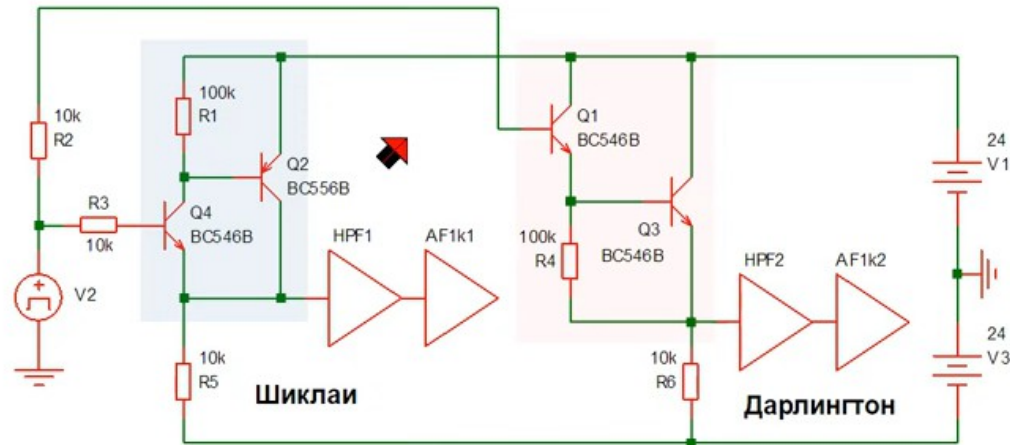
1. Высокая линейность, а именно, размах артефактов на выходе не должен превышать 300 мкВ на 1 кГц и 1.5 мВ на 10 кГц, т.е. быть всегда ниже порога слышимости при любой акустике.
 2. АЧХ петли ООС 80-100 дБ на 1 кГц, не менее 75 дБ на 10 кГц и 0 дБ на 10 МГц или выше.
 3. ФЧХ петли ООС с запасом по фазе не менее 65° и без провалов ниже 55° во всей полосе.
- При невыполнении любого из условий, УМЗЧ нельзя считать высококачественным. Вот так. В этом ролике я объявляю конкурс схемотехников на лучший дискретный ИТУН. Условия далее. Итак, какие же схемотехнические изыски выделяют Сокол среди других УНЧ? Вперед и по пунктам.



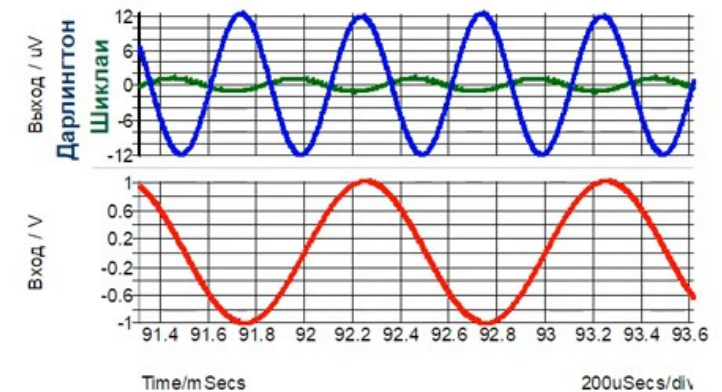
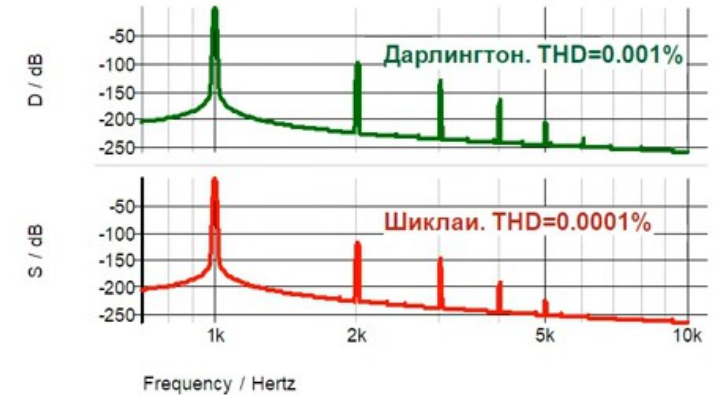
Для анализа выбран Sokol-4TD, но и другие версии аналогичны по построению. Сюжетно важные узлы выделены цветом. Слева направо: параллельный каскодный ИТУН на составных транзисторах Шиклаи; двойной дифференциальный каскад без эмиттерных резисторов; токовые зеркала с двойным управлением; тройки Шиклаи вместо стандартных троек Локанти.



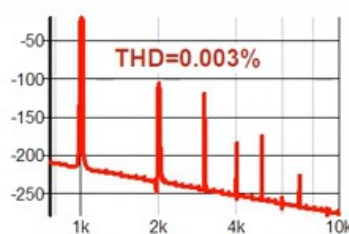
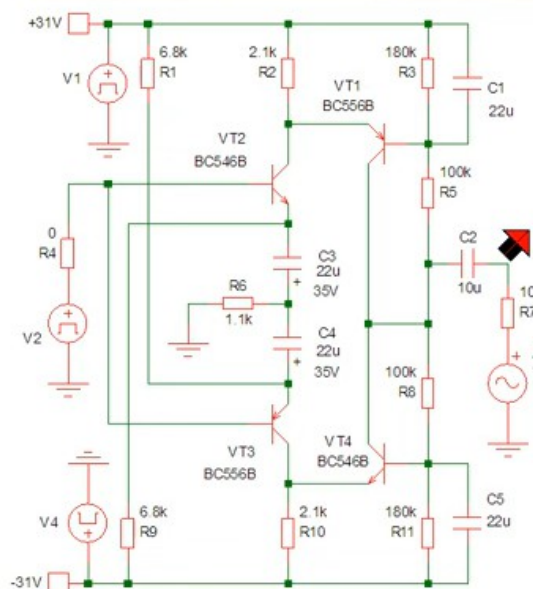
Сравниваю линейность составных транзисторов в схеме эмиттерного повторителя. Замечу, что составной транзистор и субербета транзистор – это не одно и то же. Субербета – это одиночный транзистор с очень тонкой базой, в результате переход коллектор-база проводит в обоих направлениях, как туннельный диод. Из-за этого такой транзистор работает только при нулевом напряжении коллектор-база, поэтому применяется только в составе микросхем. Дискретных субербета транзисторов не бывает. А теперь сравню линейность пары Шиклаи с парой Дарлингтона. Модель внизу.



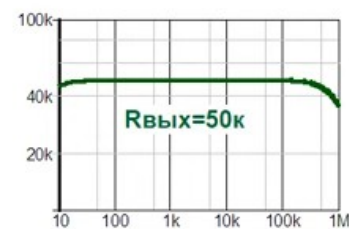
Здесь два эмиттерных повторителя на составных транзисторах. Слева – Шиклаи, справа – Дарлингтон. Оба повторителя запитаны от одного двухполярного источника $\pm 24V$ и нагружены на сопротивление 10к каждый. На входы обоих подается синусоида 1кГц с амплитудой 1В. Внутреннее сопротивление источника сигнала 10к. На выходе каждого повторителя расположен режекторный фильтр, который полностью вырезает частоту 1кГц, оставляя только внесенные повторителем искажения, или, попросту, добавленный мусор. На графиках справа – результаты моделирования. Вверху показаны спектры выхода. Видно, что повторитель Шиклаи вносит в 10 раз меньше искажений, чем Дарлингтон. Внизу показан выделенный мусор. Для обеих схем он состоит в основном, из второй гармоники, но ее амплитуда у Шиклаи в 10 раз меньше, чем у Дарлингтона. Так что, Шиклаи здесь явно предпочтительнее.



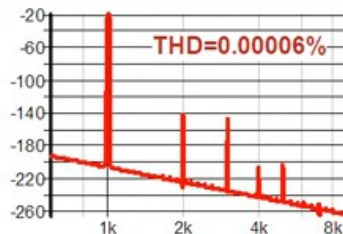
Очень непростая задача – это сконструировать ИТУН с высокой линейностью на дискретных транзисторах. Дело в том, что ввести ООС не по выходному напряжению, а по выходному току является непосильной задачей. Расскажу подробнее о моих схемах, которыми я по праву горжусь. Я разработал два вида дискретных ИТУН: параллельный каскодный и последовательный. Первый тип не требует высокого напряжения питания, он вполне может работать от $\pm 15\text{В}$. Он также меньше чувствителен к разбросу величин резисторов, но его линейность несколько хуже, чем у последовательного. Последовательный требует не менее $\pm 30\text{В}$ и чувствителен к разбросу резисторов, но его линейность повыше, да и схема заметно проще. Для раздельного питания можно выбрать последовательный вариант. В предыдущих лекциях я показывал только менее капризный параллельный каскодный вариант.



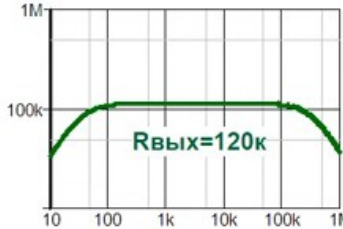
Frequency / Hertz



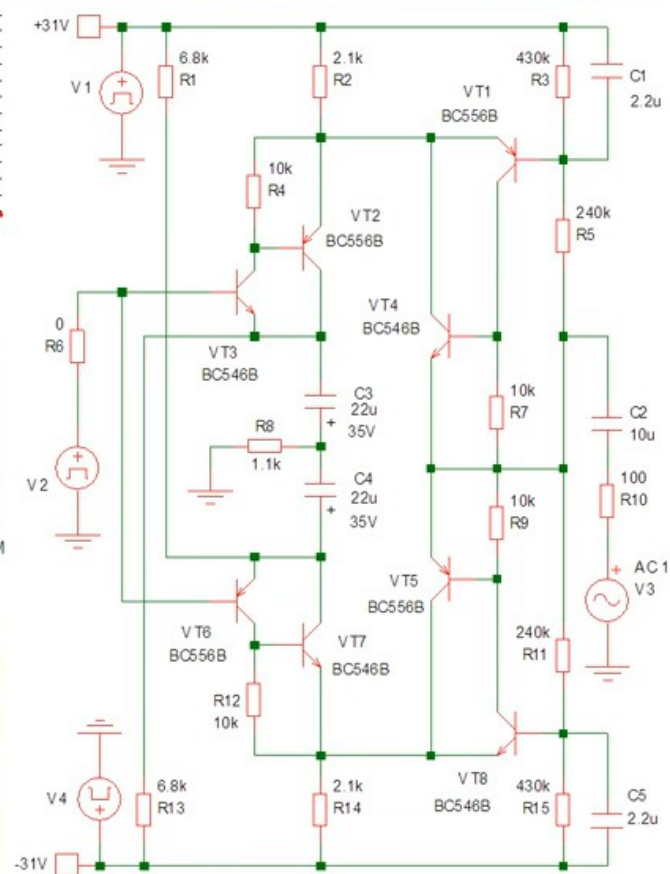
Frequency / Hertz



Frequency / Hertz

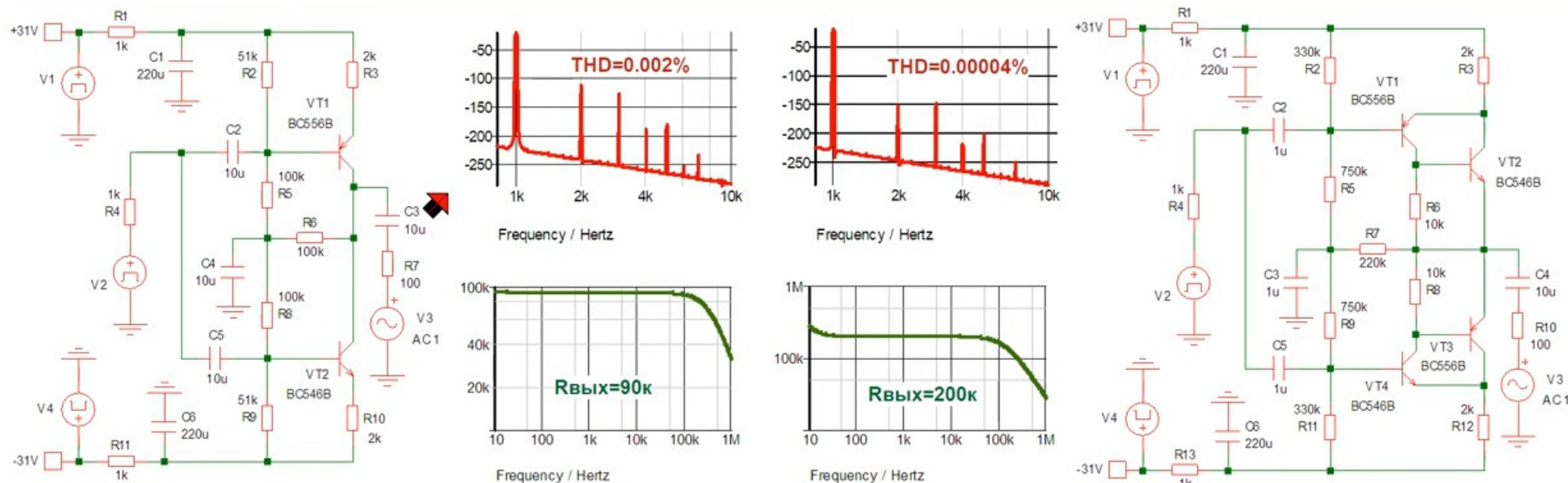


Frequency / Hertz



Слева – моя первоначальная модель ИТУН на двух встречно включенных каскодах оэ-об. Общей ООС нет. Токи всех транзисторов 4.5мА заданы резисторами R1 и R9. На входе напряжение с амплитудой 1В, а на выходе ток 1мА, т.е. крутизна преобразования 1мА/В. Она задается резистором R6. Характеристики слева. ИТУН работает в классе А и не имеет в спектре гармоник выше третьей, поэтому, в отличие от УМЗЧ, КНИ по спектру здесь полностью информативен. У этого ИТУН КНИ=0.003% и выходное сопротивление 50к. Хотелось бы иметь результат получше. И я заменил все одиночные транзисторы на составные двойки Шиклаи, которые лучше Дарлингтона, поменяв и величины некоторых резисторов. Принцип работы и потребляемый ток не изменились, но параметры улучшились. Они на правых графиках. КНИ теперь 0.00006%. Это уже стотысячные доли процента. Такого, пожалуй, сложно достигнуть даже на лучших аутентичных ОУ, и уж никак на китайских подделках.

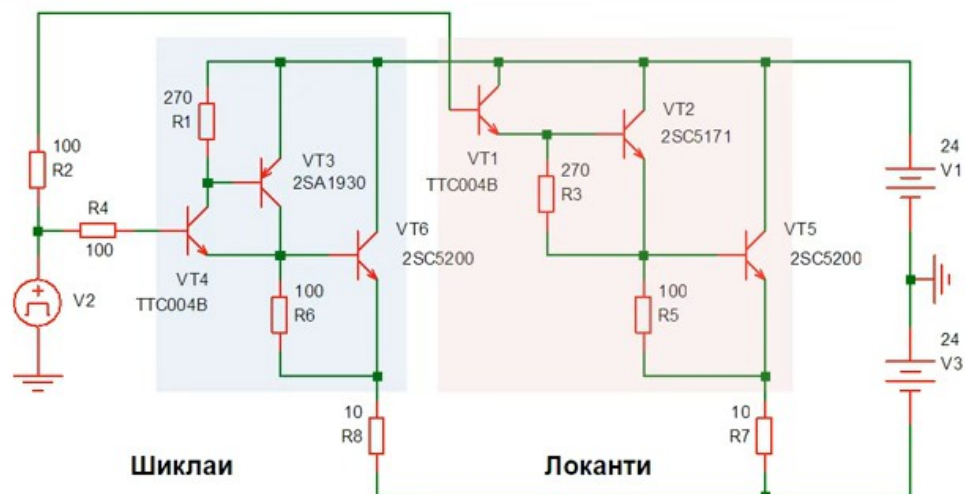
Внимание, конкурс! Придумайте дискретный ИТУН с лучшими параметрами и не сильно сложнее по схеме. Присылайте чертежи в графическом формате на мой e-mail. Все подробно исследую на моделях. Результаты и имя изобретателя опубликую на своем канале и буду указывать имя автора схемы везде, где она будет фигурировать. Теперь подробнее о моем новом последовательном ИТУН. По схеме он проще параллельного, хотя добавлена пара больших оксидных конденсаторов 220мкФ 50В, и линейность его повыше. Этот ИТУН также требует более высокого напряжения питания, чем параллельный, не менее $\pm 30\text{В}$ и, кроме того, он чувствителен к разбросу величин резисторов. А это вызывает необходимость подстройки нуля на выходе изменением R2 или R11 на правой схеме. Входное сопротивление тоже пониже, всего 100к против более 1М параллельного. Но это обычно не проблема.



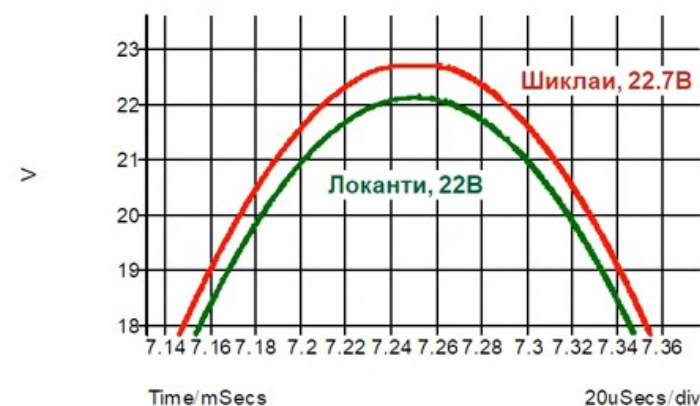
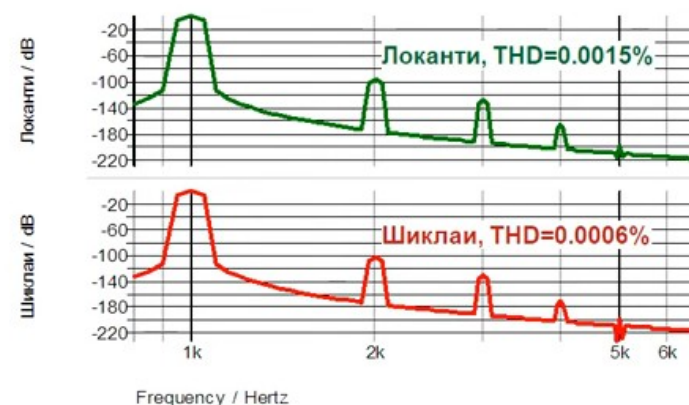
Слева – моя первоначальная простейшая модель ИТУН на двух транзисторах. Общей ООС нет. Токи всех транзисторов 4 мА заданы резисторами R3 и R10. На входе напряжение с амплитудой 1В, а на выходе ток 1мА, т.е. крутизна преобразования 1мА/В. Она задается теми же резисторами R3 и R10. Эта схема может работать только от низкоомного источника сигнала, не более 1к. Характеристики слева. КНИ=0.002% и выходное сопротивление 90к. Терпимо, но хотелось бы лучше. И здесь я заменил все одиночные транзисторы на составные двойки Шиклаи, поменяв и величины некоторых резисторов. Принцип работы и потребляемый ток не изменились, но параметры значительно улучшились. И входное сопротивление резко возросло, теперь сопротивление источника сигнала может доходить до 5к. Новые характеристики на правых графиках. КНИ теперь 0.00004%. Это всего четыре стотысячных доли процента. Результат чуть лучше, чем у параллельной каскодной схемы и трудно достижим, если вообще возможен, даже на лучших ОУ. И шумит ОУ сильнее. Этот ИТУН можно применить в УНЧ Сокол с раздельным питанием взамен параллельного каскодного, но придется подстраивать нуль. Он также потребляет меньший ток, не более 5мА. Отмечу, что конденсатор C4 включен последовательно с источником тока, поэтому изменение его емкости от напряжения никак не влияет на КНИ. Смело ставьте керамику!

Сравнение составных троек транзисторов. Локанти или Шиклаи?

Перечислю с объяснением и проверю по отдельности все введенные мной схемные решения для улучшения линейности и частотной характеристики. Проведу сравнение с традиционными решениями. Я предложил два новых технических решения, это токовый вход с ИТУН в качестве предусилителя, а также токовое зеркало с двойным управлением. В дополнение я улучшил уже известные решения, убрав эмиттерные резисторы из двойного диффкаскада и заменив на выходе тройки Локанти на тройки Шиклаи. Вот и все. Проверяю эффективность моих улучшений по отдельности, если возможно, а если нет – то в составе модели УМЗЧ. На этом слайде сравниваю линейность и энергоэффективность составных троек в выходном каскаде УМЗЧ. Модель внизу.

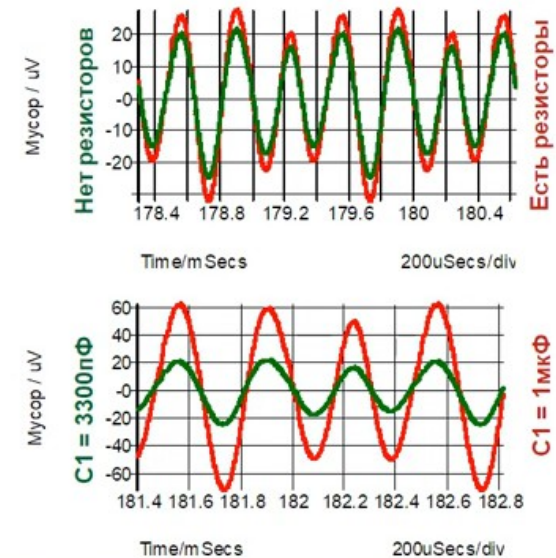
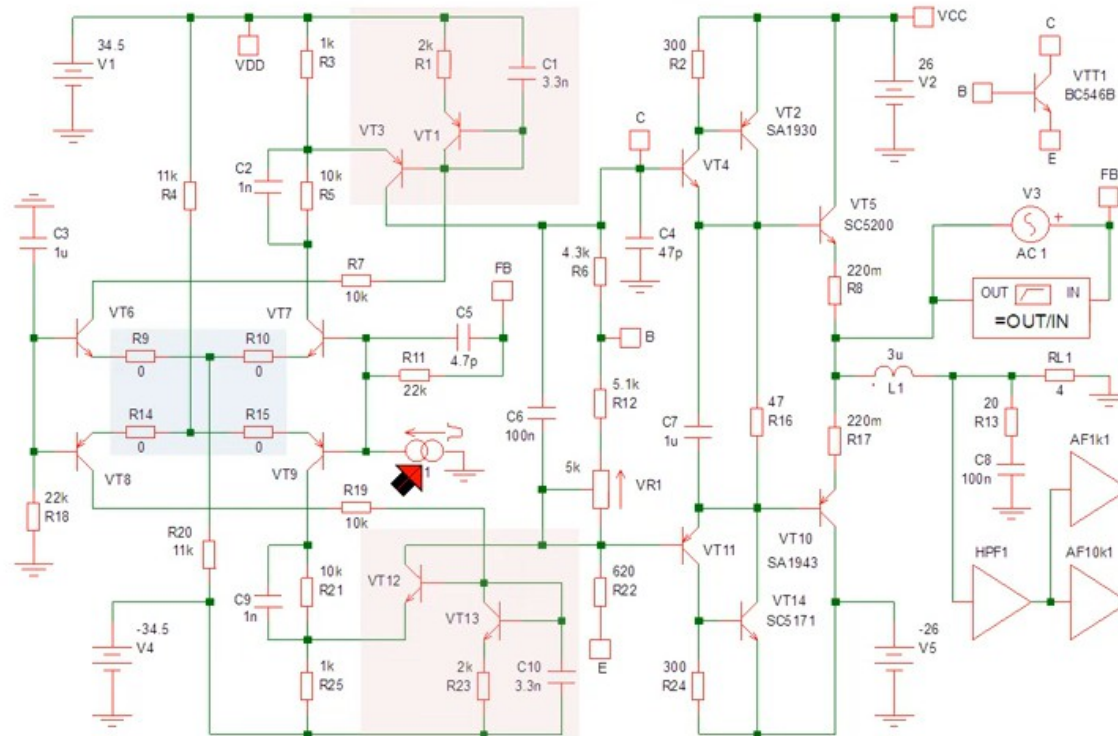


Здесь две тройки, включенные по схеме эмиттерных повторителей на составных транзисторах. Слева – Шиклаи, справа – Локанти. Обе тройки запитаны от одного двухполярного источника $\pm 24\text{В}$ и нагружены на сопротивление 10 Ом каждая. На входы обеих троек подается синусоида с частотой 1кГц и амплитудой 1В для измерения линейности на малом сигнале и 24В для измерения падения в клипе. Результаты моделирования справа. При малом входном сигнале тройка Шиклаи вносит в 2.5 раза меньше нелинейных искажений, чем тройка Локанти. Кроме того, максимальная амплитуда выходного напряжения в случае тройки Шиклаи на 0.7В выше, чем в случае тройки Локанти. Следовательно, тройка Шиклаи превосходит тройку Локанти по всем параметрам. Именно по этой причине в УМЗЧ Сокол применены комплементарные тройки Шиклаи, а не Локанти.



Другие схемные решения, повышающие линейность.

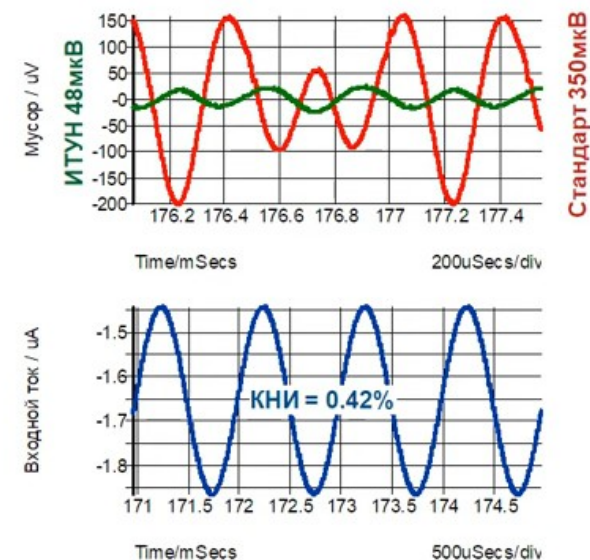
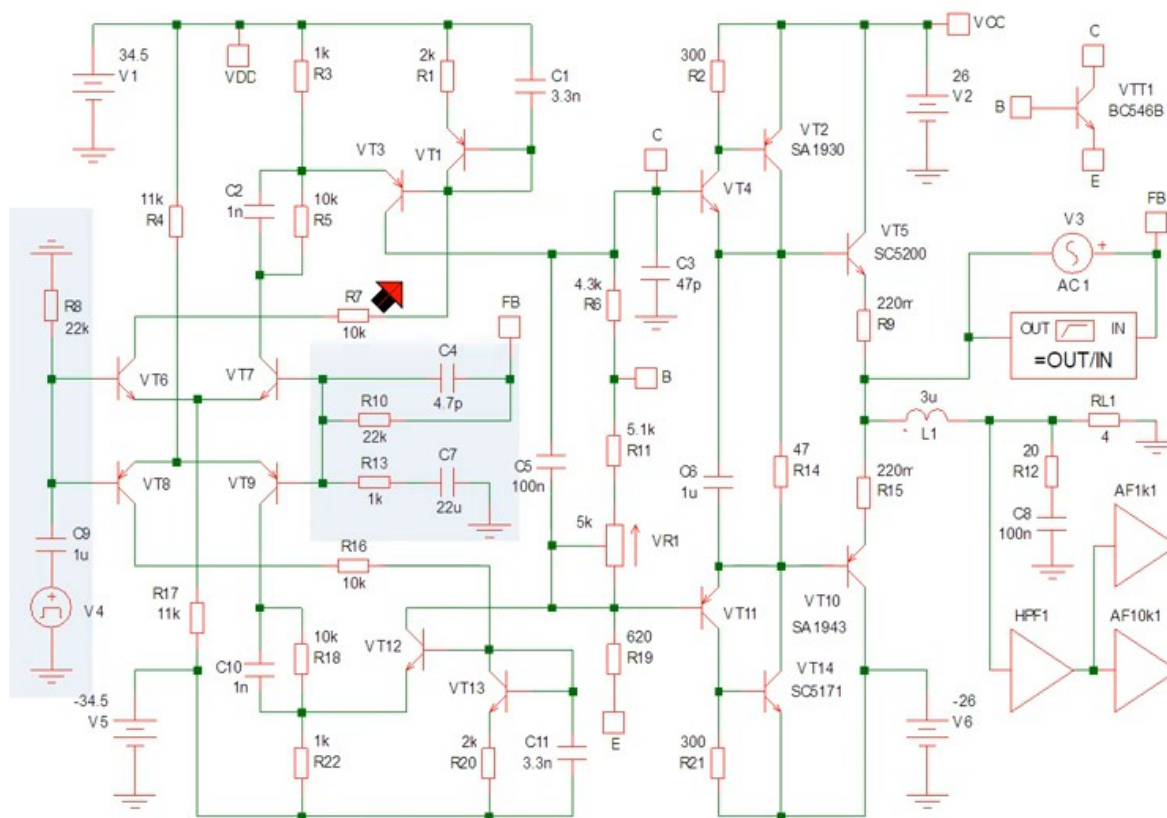
Модель для проверки схемных решений внизу. ИТУН уже рассмотрен ранее и в этой модели он заменен на идеальный источник тока I1. Сначала проверю влияние эмиттерных резисторов R9, R10, R14, R15. В схеме Ланзара они по 22 Ом, в схеме Сокола их нет. На верхнем правом графике мусор на выходе при 1кГц и 35Вт мощности. Без резисторов амплитуда мусора меньше на 30%. Вопрос, а зачем их вообще поставили? А без них Ланзар теряет устойчивость и возбуждается. Теперь о токовых зеркалах с двойным управлением, выделенных бежевым цветом. Какой общий электрод у VT3? А никакой, он с двойным управлением и по базе от VT6, и по эмиттеру от VT7. Такой вот дифференциальный каскад на одном транзисторе. Но двойное управление имеет место лишь на звуковых частотах. А на высоких частотах, на мегагерцах, VT3 включен с общей базой из-за конденсатора C1. Двойное управление теряется. Зачем такой трюк? Для устойчивости. Без C1 запас по фазе резко падает, а при слишком большой величине C1 пропадает двойное управление VT3 и на звуковых частотах, отчего ухудшается линейность. На нижнем графике показан мусор на выходе при C1=3300пФ и C1=1мкФ, когда нет двойного управления.



Двойное управление снижает мусор на выходе и, соответственно, КНИ в 3 раза! Так что, хорошая была мысль использовать этот трюк для управления транзисторами раскачки выходного каскада (они же токовые зеркала с двойным управлением). Вроде простая идея, но раньше меня никто не догадался.

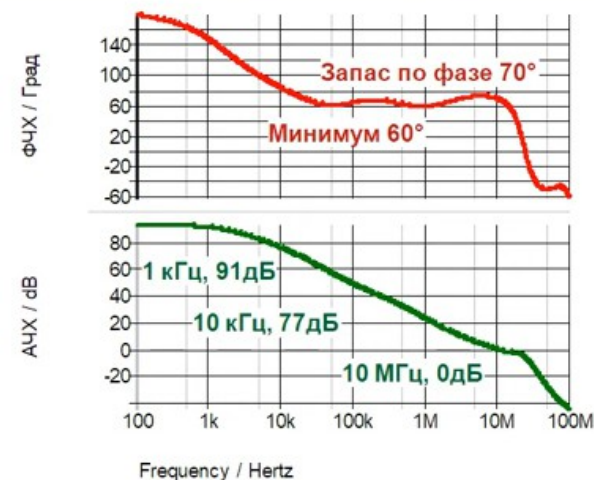
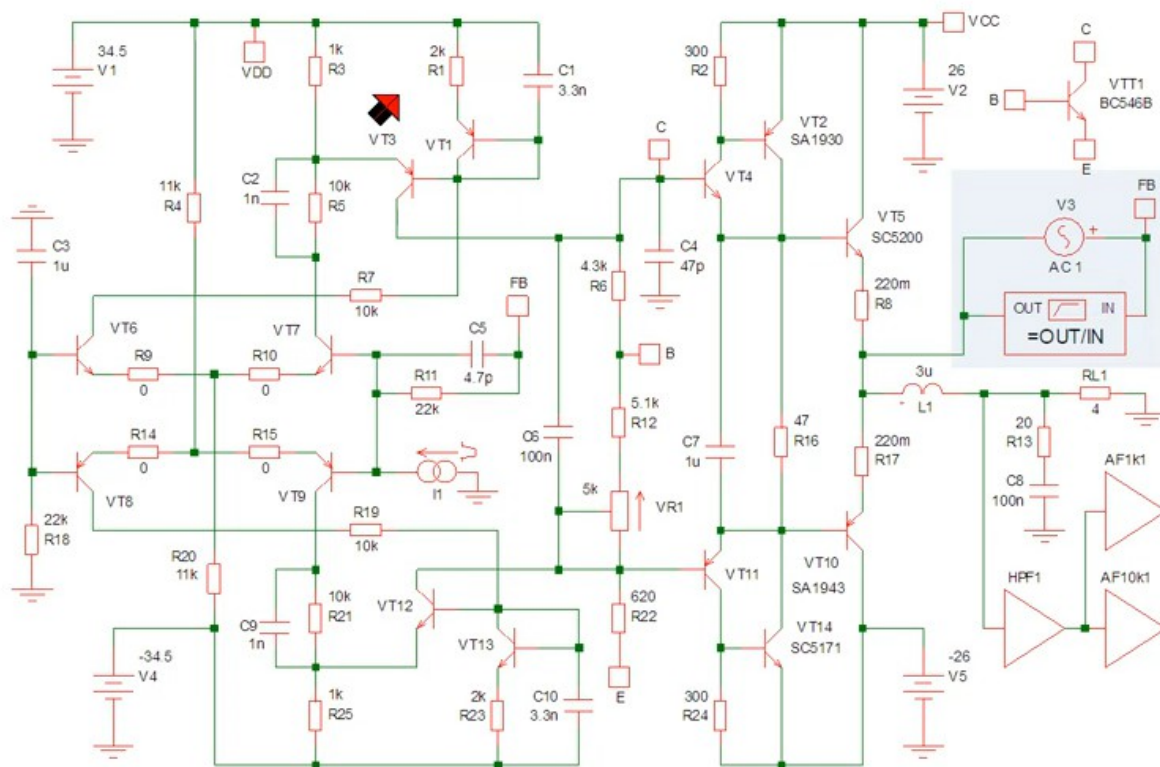
Токовый вход + ИТУН против стандартного входа.

Главная особенность Сокола по сравнению со всеми другими УНЧ – это токовый вход + ИТУН в качестве предусилителя. Я встречал конструкции с инвертирующим включением, но это совсем не то. ИТУН полностью устраняет влияние нелинейного входного тока транзисторов диффкаскада. Конечно, можно применить полевые транзисторы, и применяют, что устраняет влияние входного тока, но они имеют малую крутизну характеристики, что ухудшает линейность. По крутизне полевой транзистор напоминает биполярный с эмиттерным резистором, что уже рассмотрено ранее. Так что, ИТУН + биполярный диффкаскад гораздо линейнее полевого диффкаскада без ИТУН. Итак, внизу – немного измененная схема Сокола, где входной сигнал традиционно подан на неинвертирующий вход, а сигнал ООС – на инвертирующий через делитель R10, R13, как выделено цветом. В общем, живая классика. На графиках справа показан внесенный усилителями мусор. Красный график соответствует типовой схеме без ИТУН, а зеленый – схеме с ИТУН. Разница в 7.3 раза!



В отличие от токового входа + ИТУН, в этой стандартной схеме входной ток диффкаскада влияет на линейность, и весьма заметно. Он показан на синем графике. Этот входной ток имеет существенную нелинейность, 0.42% при амплитуде 2мкА. Он вызывает падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника входного сигнала и на резисторах делителя ООС R10, R13. Это напряжение добавляется к входному и добавляет искажений на выходе. Оттого-то и рекомендуют полевые на входе, но к ИТУН это не относится.

В заключение, измеряю АЧХ и ФЧХ петли ООС и подвожу итоги этой лекции. Я прошу извинения за насыщенность лекции техническими терминами, из-за чего она могла оказаться не всем понятна, хотя я и очень старался упростить объяснения. Итак, вот модель для измерений АЧХ и ФЧХ. Это – все та же модель Сокол-4 без предусилителя. Измеритель частотных характеристик из арсенала симулятора Simetrix выделен цветом. Результат на графиках. АЧХ: усиление 91дБ на 1кГц, 77дБ на 10кГц и 0дБ на 10МГц. То, что надо для отличного звучания. ФЧХ: запас по фазе 70° и никаких провалов ниже 60° во всем диапазоне до 10МГц. И здесь все отлично.



Итоги лекции, или что же дали мои схемотехнические изыски по порядку и по пунктам:

1. Тройка Шиклаи вместо тройки Локанти, снижение КНИ в 2.5 раза.
2. Убраны эмиттерные резисторы, снижение КНИ в 1.3 раза.
3. Двойное управление токовыми зеркалами, снижение КНИ в 3 раза.
4. Токковый вход + ИТУН, снижение КНИ в 7.3 раза.

Итого, общее снижение КНИ из-за моих усовершенствований в 71 раз по сравнению с традиционными схемами типа Ланзара. Это скорее оценка, чем точный результат, потому что факторы вряд ли статистически полностью независимы. Но оценка вполне адекватная.

Примечание. Все измерения автор делает традиционными методами в установившемся режиме которые не коррелируют с качеством звука. Такими методами невозможно измерить искажения вносимые реальными звуковыми сигналами.



Заключение.

Вот и раскрыты все секреты линейности Сокола. Их оказалось не так уж и много. Уважаемые схемотехники-энтузиасты! Примите участие в конкурсе на лучший ИТУН!

На этом все. Благодарю за внимание.
До свидания и до следующих встреч.
Вопросы и пожелания сюда: 1t308a@gmail.com

Проведем несколько тестов.
При наборе модели усилителя максимально использовались модели транзисторов Боба Корделла

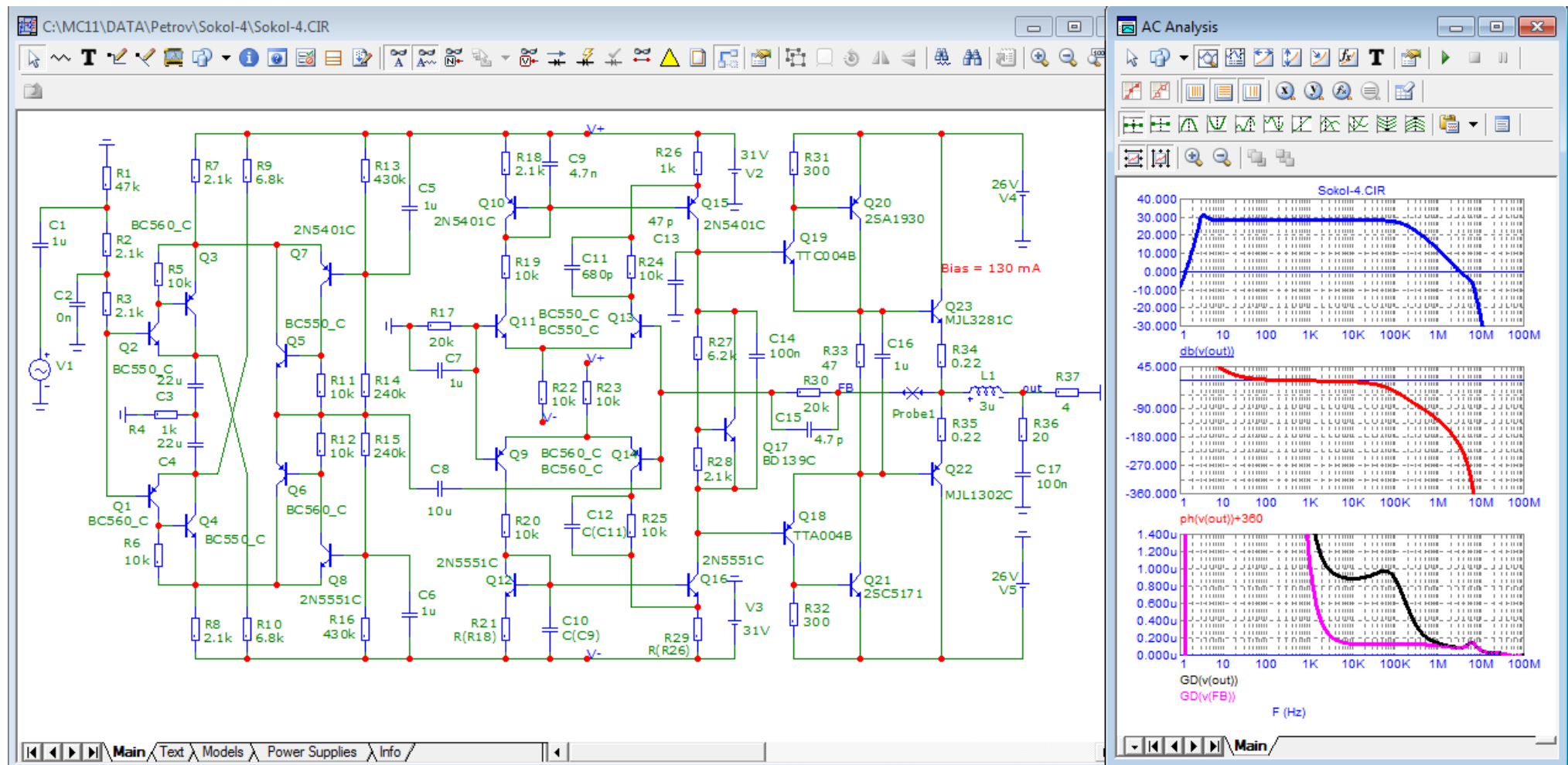


Диаграмма Бode без входного ФНЧ
Быстродействие ООС характеризует ГВЗ в точке FB (до выходной индуктивности)

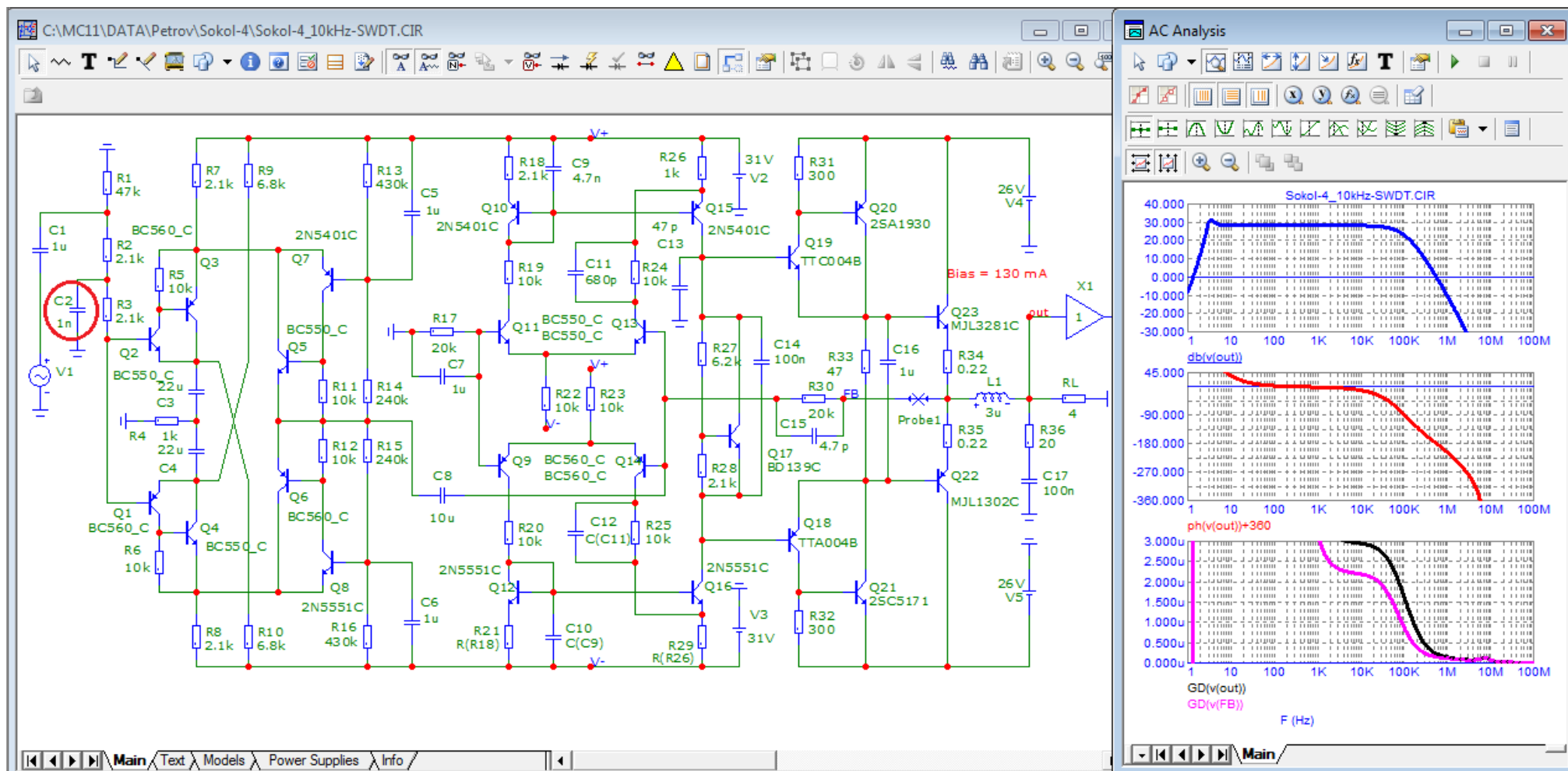
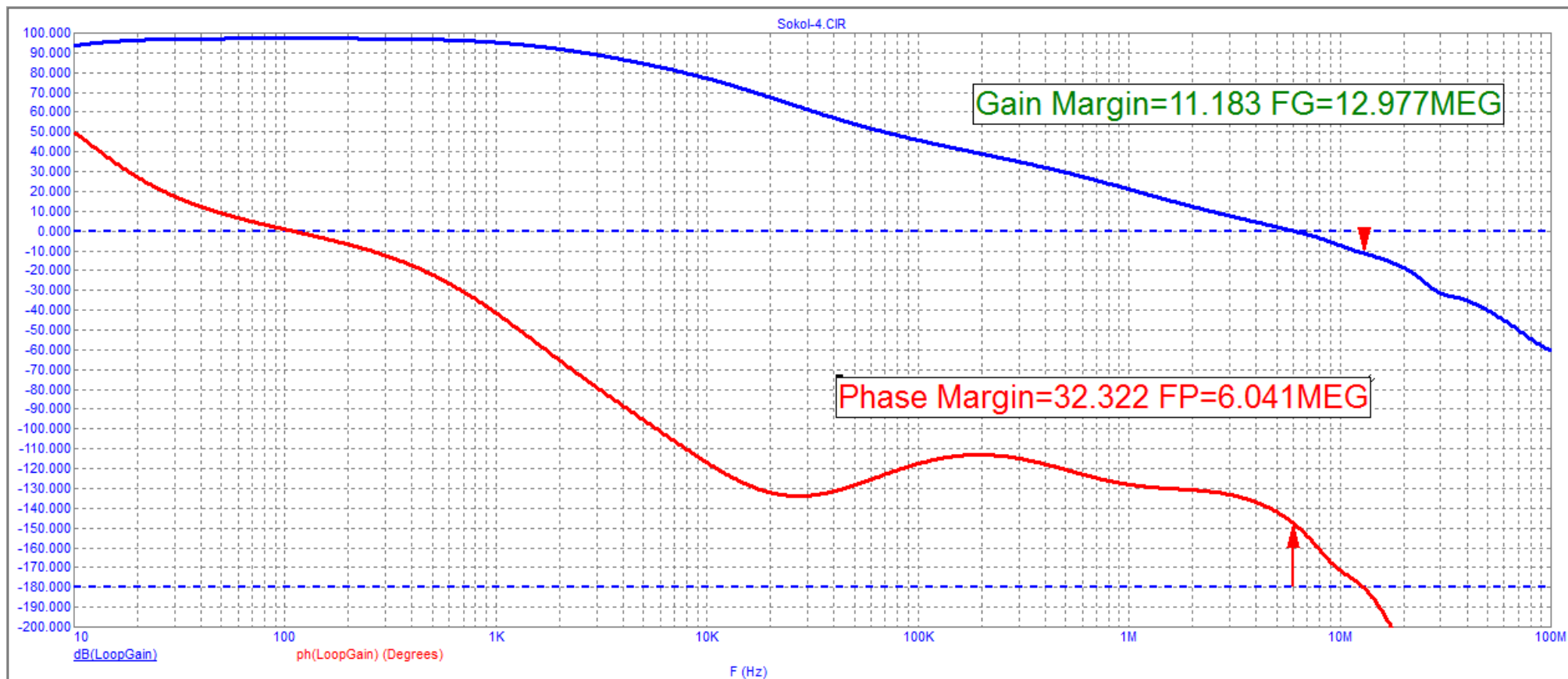
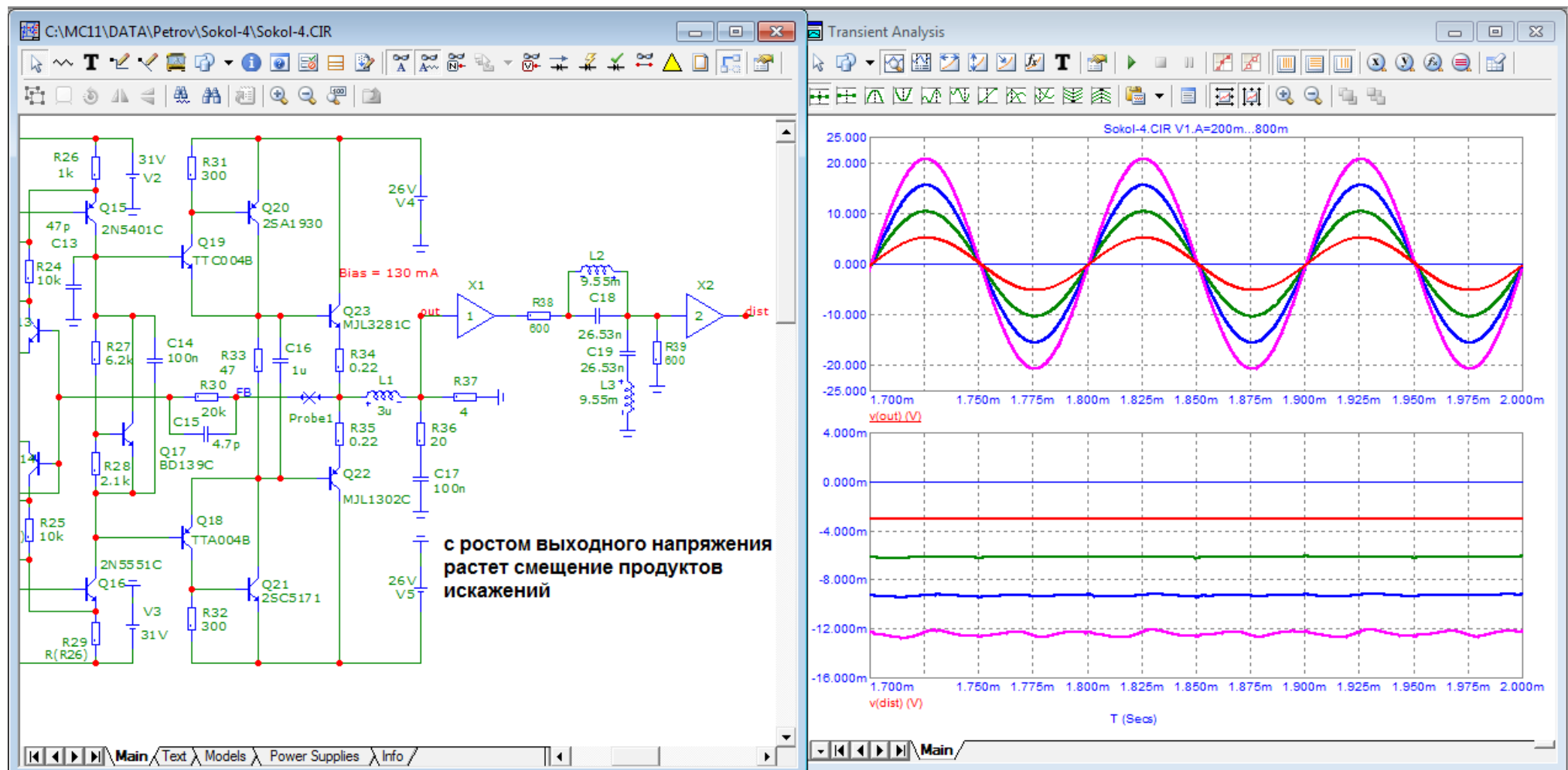


Диаграмма Бode с входным ФНЧ
ГВЗ всего тракта около 3 мкс - отвечает за SID-искажения (искажения поворота)

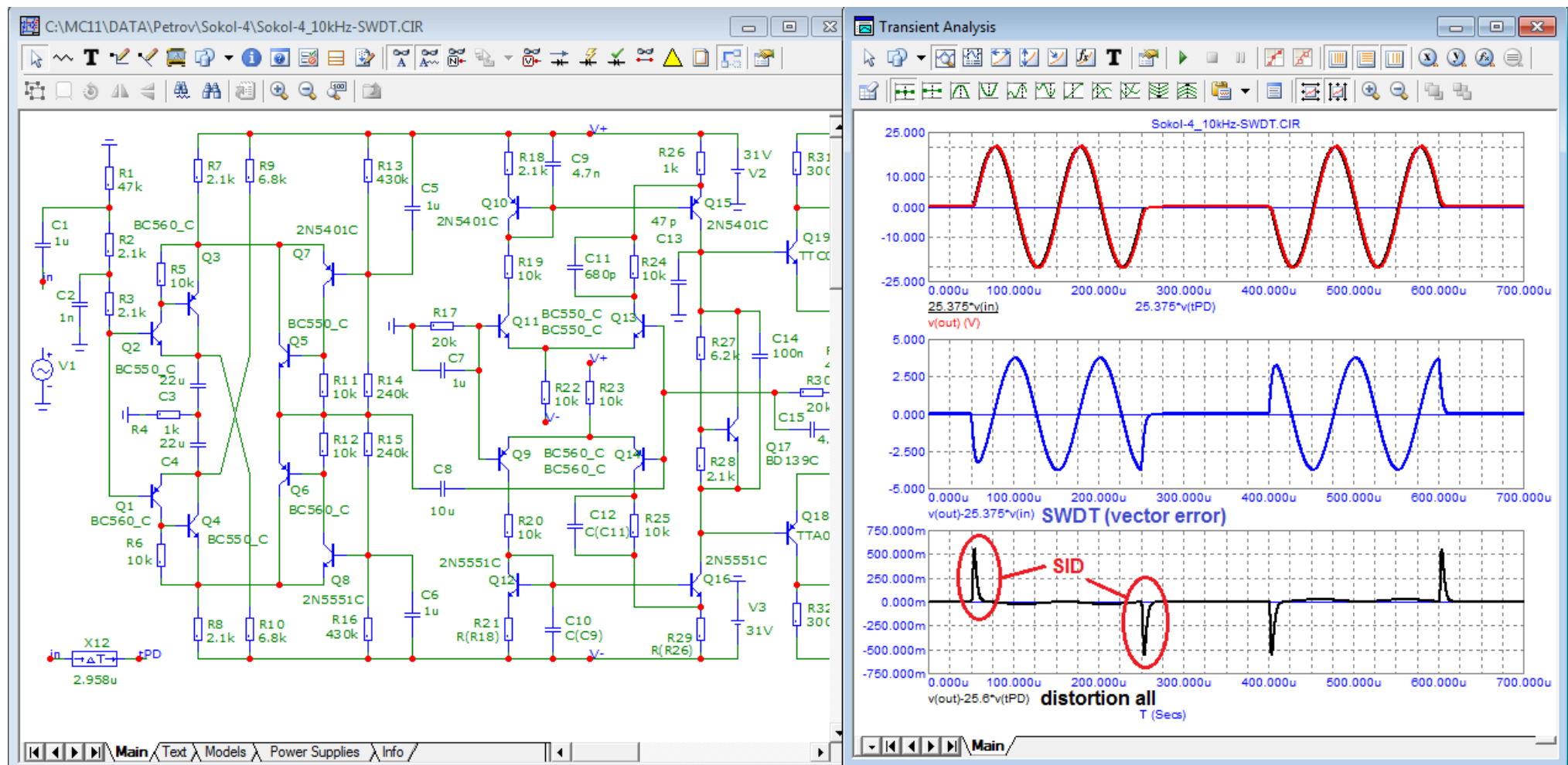


Петлевое усиление

На частоте 20 кГц петлевое усиление достаточно высокое — около 70 дБ

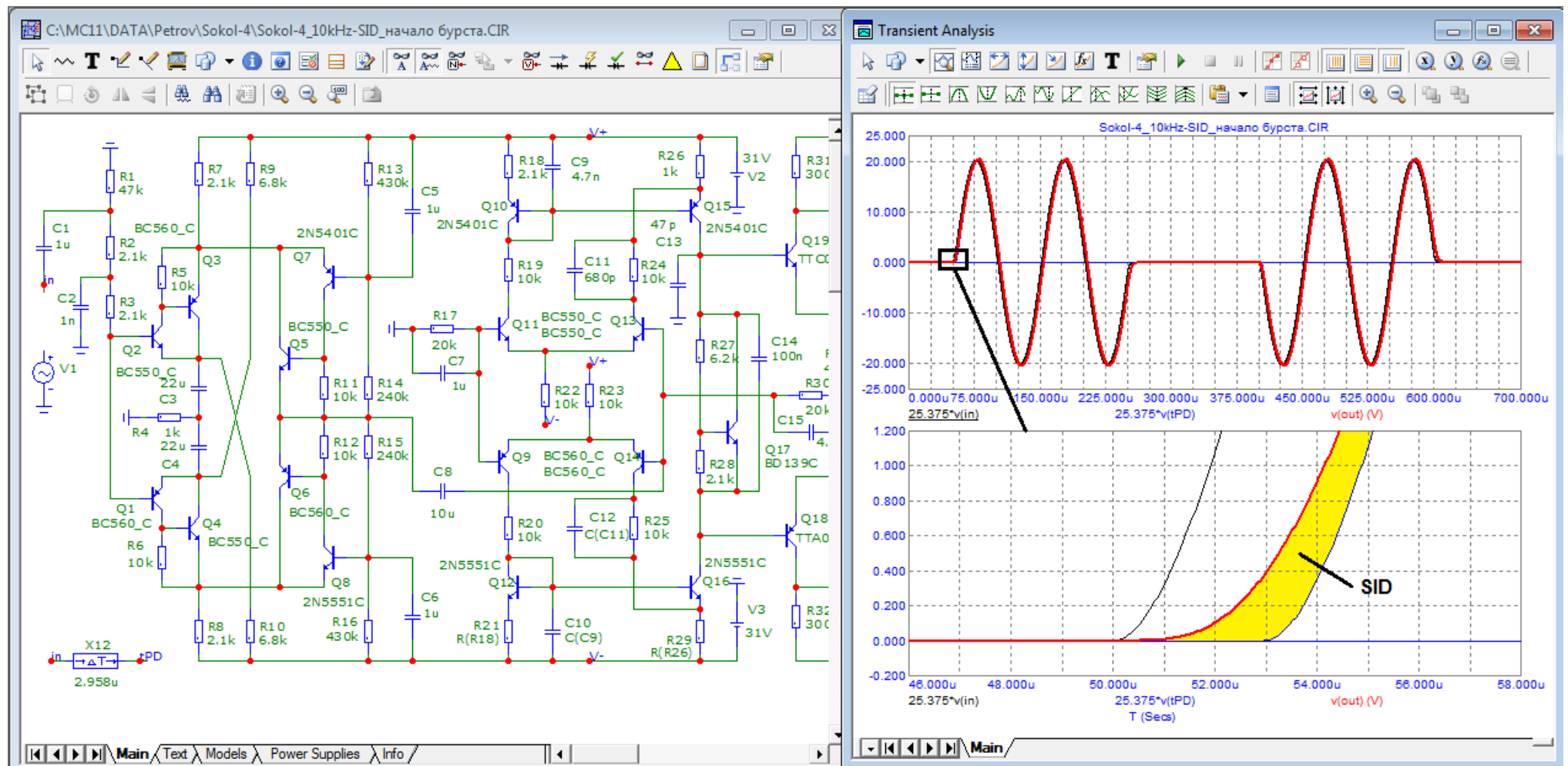


Есть небольшая болтанка продуктов искажений (более 10 мВ)



Входной бурст обработан ФНЧ 100 кГц (как в тесте DIM-100).

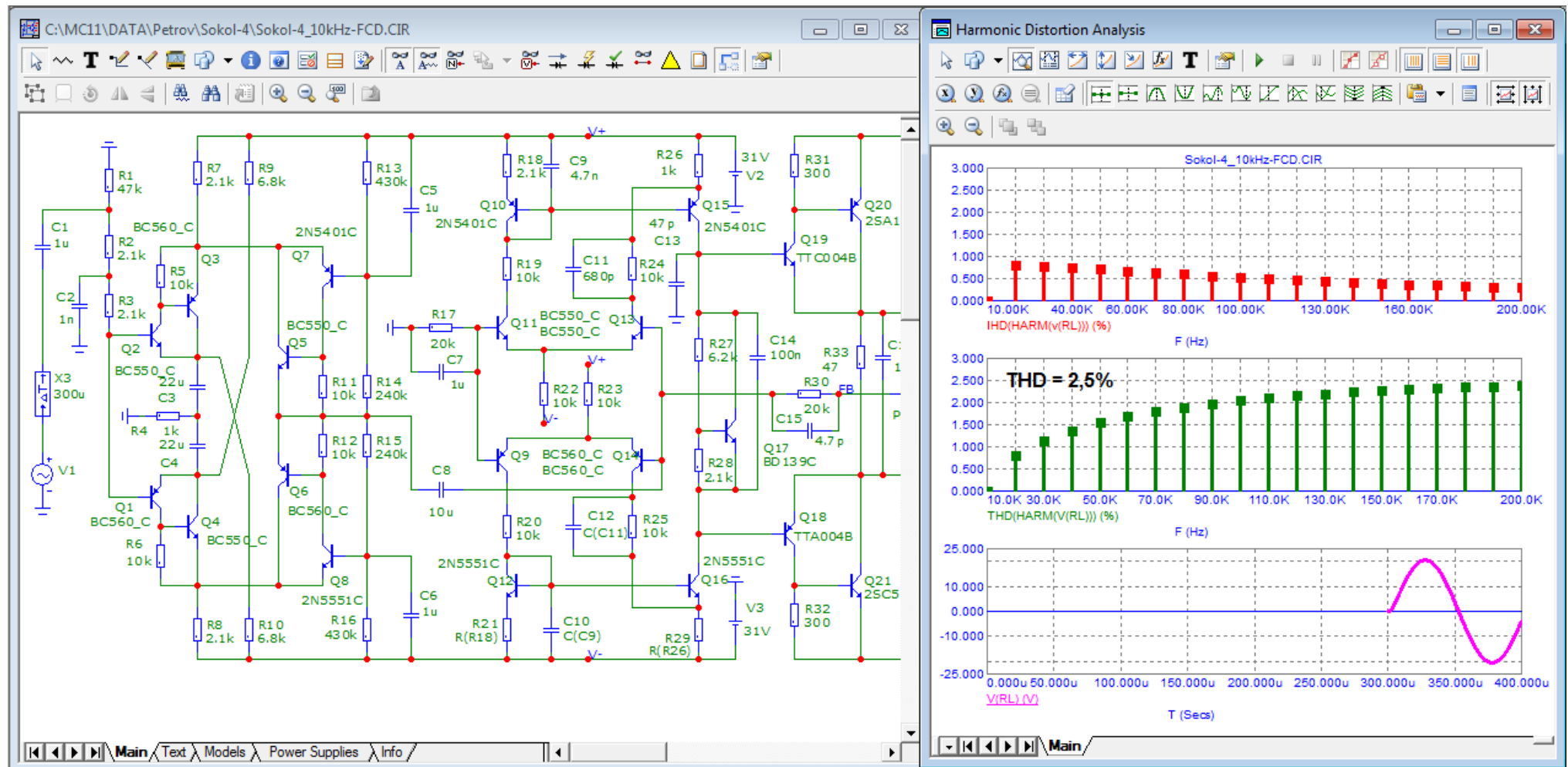
В соответствии с критерием Хафлера векторные погрешности должны быть не более 0,1% (-60 дБ). При выходном напряжении 20 В векторная погрешность должна быть не более 20 мВ (имеем 3,75 В). Амплитуда SID-искажений более 500 мВ что от 20 В составляет 2,5%. Вот это и есть реально вносимые искажения в звуковые сигналы.



Начало бурста характеризует искажения поворота. Нетрудно убедиться с помощью графического метода измерений что скорость нарастания входного приведенного напряжения не более 0,2 В/мкс. Тем не менее усилитель с большим запасом по скорости нарастания не в состоянии следовать за входным напряжением с самого начала поворота сигнала.

Ныне покойный Грэм Мэйнард (Graham Maynard) предложил простейший тест для косвенной оценки вносимых усилителем искажений с помощью измерения K_g (THD) на первом периоде. Так как в последних версиях микрокапа ограничено минимальное количество периодов 4-мя, то для подачи

на вход модели усилителя сигнал генератора задержан с помощью линии задержки на 3 периода сигнала частотой 10 кГц (300 мкс).



Как показал этот тест уровень THD первого периода физически равен уровню SID и лишний раз подтверждает правоту Грэма Мэйнарда.

С уважением, Александр Петров