



Звукотехника

Александр Соколов 1t308a@gmail.com

Любителям и профессионалам



В этом выпуске я описываю мою последнюю разработку, это по возможности простой транзисторный УНЧ, имеющий Hi-End параметры, не склонный к самовозбуждению, и не критичный к разводке платы. Я исследовал его на модели очень долго и подробно, включая разброс параметров транзисторов и старение конденсаторов. Его неприхотливость и всеядность удивили меня самого, это настоящий автомат Калашникова. Там даже хорошо работают транзисторы КТ818Г и КТ819Г на выходе. Он получил название Перегрин-50М. Его схема весьма прямолинейна, поэтому нечто подобное уже наверняка где-то фигурировало, хотя я лично не встречал.

Этот выпуск в PDF формате доступен по ссылке в заголовке.

Hi-End – это чисто маркетинговый термин, подразумевающий предельно высокое качество, но не имеющий под собой никаких конкретных спецификаций. По этой причине я представляю свое понимание требований к Hi-End УМЗЧ, которых и буду придерживаться при проектировании аудио усилителей. По моему опыту, выполнение этих требований вполне достаточно для предельно чистого звучания и простоты настройки. Сначала перечислю электрические параметры:

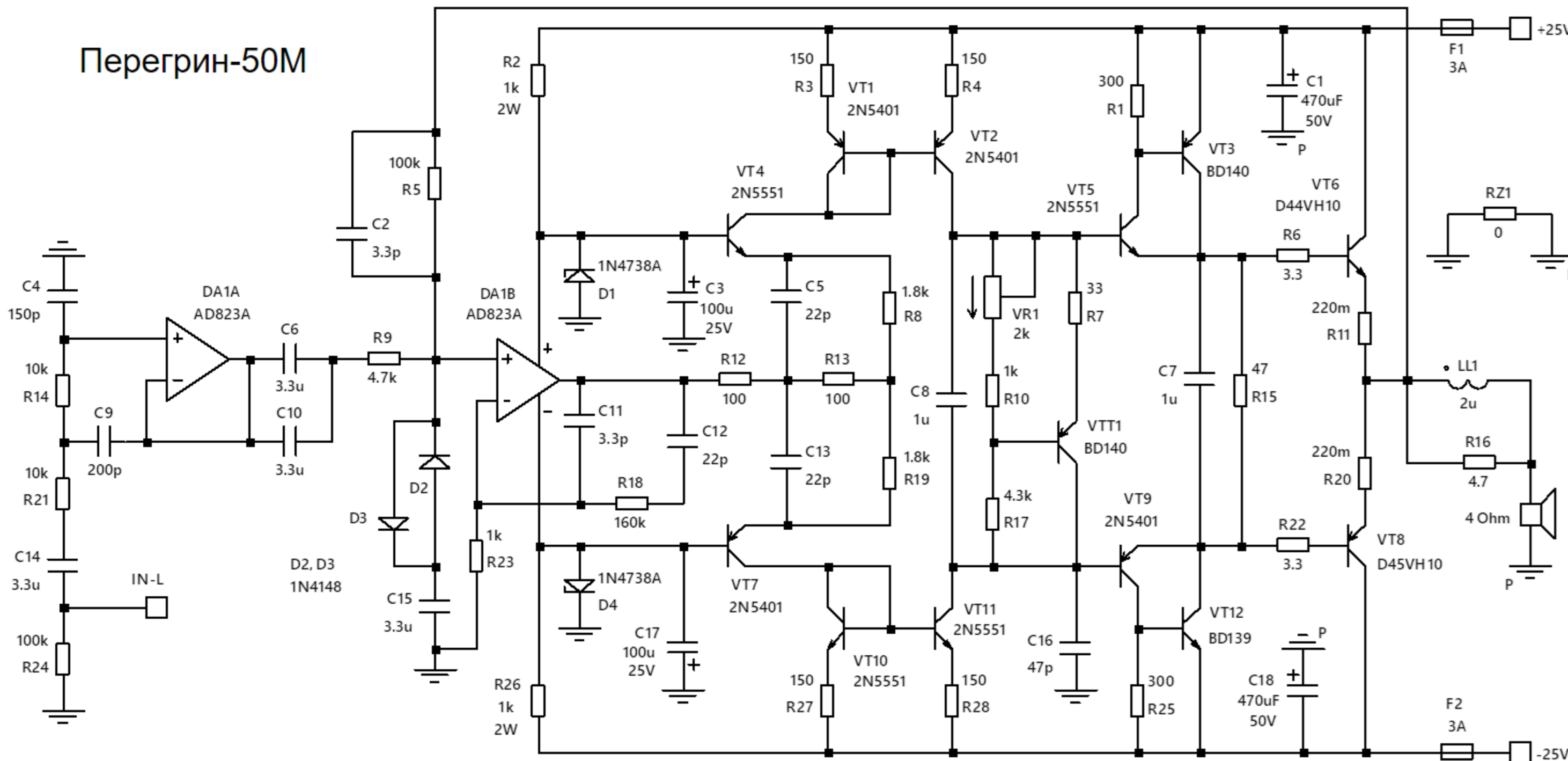
1. Максимальная выходная мощность 50Вт
2. Коэффициент нелинейных искажений при половинной мощности не более 0.0001% на 1кГц и не более 0.0005% на 10кГц
3. Коэффициент интермодуляционных искажений при подаче на вход 19кГц и 20кГц одновременно не более 0.0001%
4. Максимальная скорость нарастания выходного напряжения не менее 50В/мкс на пороге клипа на выходе
5. Полоса пропускания на уровне -3дБ от 5Гц до 550кГц при отключенном ФНЧ на входе и до 70кГц при наличии ФНЧ
6. Уровень фона переменного напряжения 50 или 100Гц не более -120дБ (это намного ниже собственного шума)

Дополнительные нестандартные, но важные требования:

1. Коэффициент нелинейных искажений при выходной мощности 1Вт не более 0.0001% на 1кГц и не более 0.0005% на 10кГц
2. Устойчивость к самовозбуждению: запас по фазе не менее 60°, запас по усилению не более -12дБ. Минимальное значение ФЧХ при коэффициенте усиления больше единицы не менее 40°
3. Задержка распространения сигнала от входа до выхода не более 500нс
4. Чистый клип без видимых артефактов на любой звуковой частоте и двойной перегрузке по входному напряжению
5. Полное отсутствие тенденции к самовозбуждению даже при длинных проводах от источника питания до платы усилителя
6. Отсутствие громкого щелчка из колонок при включении усилителя в сеть даже без схемы задержки подключения акустики

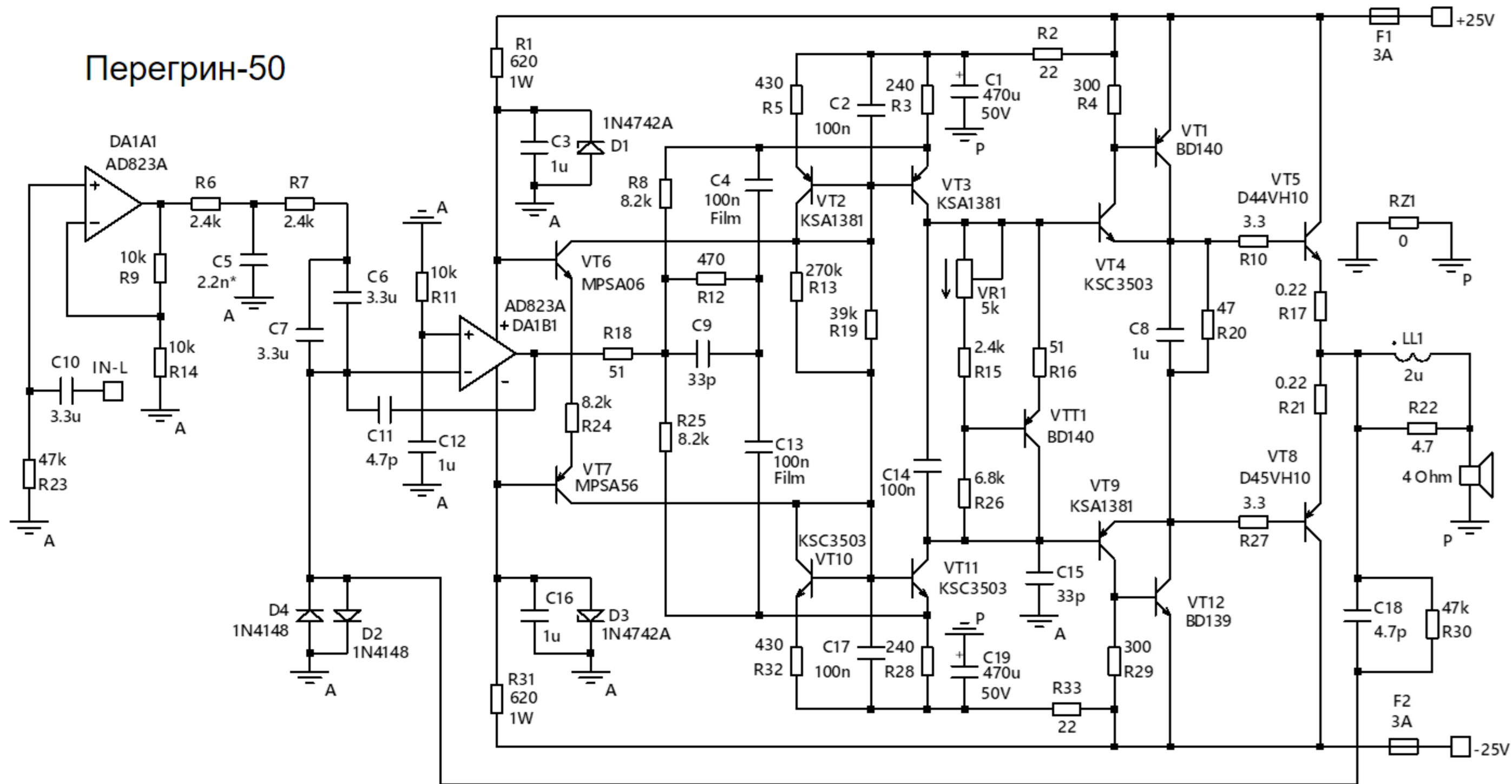
Основная идея схемы «народного» усилителя Перегрин-50М – это максимально высокая исходная линейность в сочетании с относительно неглубокой параллельной ООС. Такой подход позволил сильно улучшить динамику и скоростные свойства, но сверхлинейности на уровне миллионных долей процента при этом не получить. Да оно и не надо, главное, чтобы вносимые усилителем искажения не были слышны ни при каких обстоятельствах. Основа схемы – это симметричный усилитель с высокой исходной линейностью, которая достигается применением локальной ООС через C12, R18, линейных каскадов сдвига уровня на VT4, VT7 по схеме с ОБ и пары очень линейных токовых зеркал на VT1, VT2 и VT10, VT11, имеющих единичный коэффициент отражения. Выходной каскад на 6 транзисторах – это двухтактный Дарлингтон на VT5, VT3, VT6 и VT9, VT12, VT8. Это именно Дарлингтон, а не Сиклаи, просто VT5 и VT3 образуют один составной транзистор с очень высоким коэффициентом усиления и малым падением напряжения при насыщении. По линейности и термостабильности этот выходной каскад превосходит тройку Локанти, потому что здесь только 4 р-п перехода соединены последовательно, а не 6 как у Локанти. VT6 и VT8 можно заменить на КТ819Г и КТ818Г, подобрав пары с $\beta > 40$.

Перегрин-50М



VT1 монтируется на радиаторе выходных транзисторов для стабилизации тока покоя VT6 и VT8. На входе активный ФНЧ с частотой среза 70кГц. Частотная коррекция петли ООС производится при помощи конденсаторов C2, C5, C13 дающих опережение по фазе, и C16, дающего запаздывание по фазе. Сквозной коэффициент усиления равен отношению величин R5/R9, здесь это 21, поэтому выходная мощность 50Вт достигается при 1В пикового значения входного напряжения. ОУ AD823A наилучшим образом подходит для этой схемы, хотя, к сожалению, он не относится к дешевым. Диоды D2 и D3 защищают вход ОУ DA1B от перенапряжения при клипе на выходе и разрыве петли ООС.

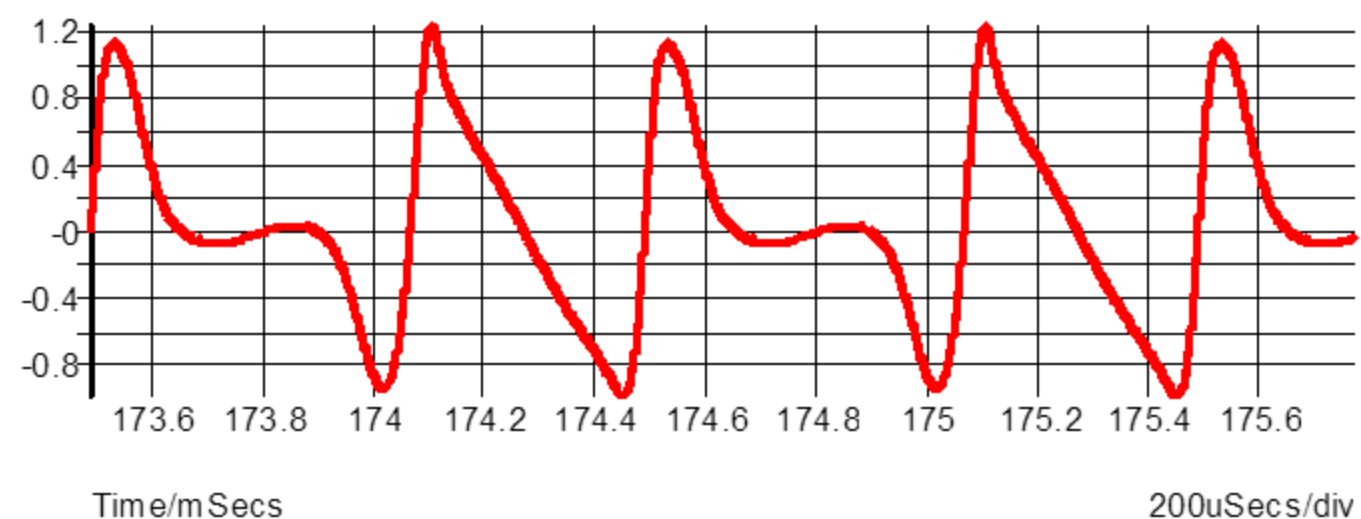
Схемы очень похожи по принципу работы, но есть отличия. Главное – это усилитель напряжения на VT2, VT3, VT10, VT11, который в Перегрине-50 выполнен по схеме с ОБ, причем эмиттеры VT3 и VT11 напрямую связаны с выходом ОУ DA1В. Такое решение устраняет дополнительную задержку сигнала от выхода ОУ до входов УН, но вызывает необходимость наличия развязывающих RC-фильтров R2, C1 и R33, C19. Эти фильтры устраняют паразитную обратную связь через источник питания из-за индуктивности проводов от больших конденсаторов источника питания до платы усилителя. Для устранения влияния напряжения источника питания на ток покоя, введены резисторы R13 и R19, которые совместно с R8 и R25 образуют сбалансированный мост, в результате чего ток покоя не зависит от напряжения питания. В Перегрине-50М схема упрощена, усилитель напряжения выполнен по схеме токовых зеркал и по переменному току изолирован от выхода ОУ. Такое решение незначительно увеличило задержку сигнала, но позволило повысить линейность УН и полностью развязало линии питания от выхода ОУ без дополнительных



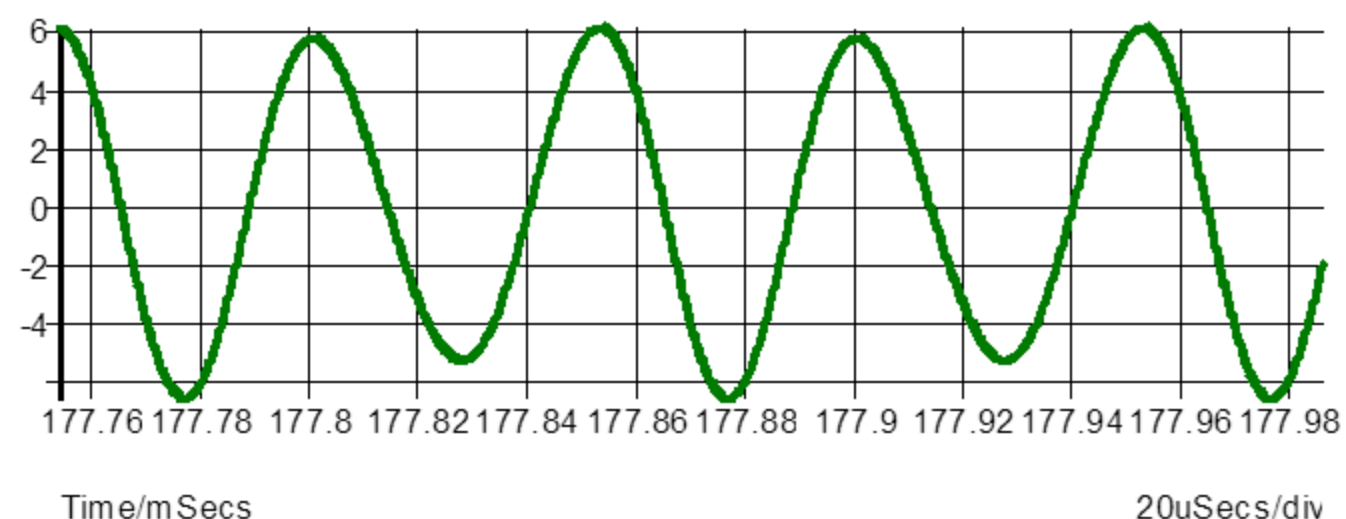
фильтров по питанию. Поскольку токовое зеркало с единичным коэффициентом отражения имеет намного лучшую линейность, чем каскад с ОБ, оказалось возможным уменьшить глубину общей ООС вдвое без существенного повышения КНИ. Для этого величина резистора обратной связи R30 увеличена вдвое. А это позволило уменьшить номинальное входное напряжение от 2В до 1В и исключить необходимость предусилителя сигнала. Схема Перегрин-50М стала проще для понимания любителями, что в общем-то хорошо, поскольку непонимание вызывает недоверие. Ну, и наконец, добавлена локальная обратная связь с выхода на вход ОУ через R18, C12, которая предотвращает глубокий провал на ФЧХ на сверхзвуковых частотах. Этот провал присутствует у всех известных усилителей с ОУ на входе, и это смущает некоторых любителей хорошего звука, хотя вред от этого провала не доказан.

Ну что, проверяю УНЧ Перегрин-50М на соответствие мной же заявленным в начале спецификациям. Начну с коэффициента нелинейных искажений. Как известно, при подаче на вход любого усилителя чистого синусоидального сигнала, на выходе будет усиленный входной сигнал плюс дополнительно внесенный мусор, состоящий из гармоник, и вызванный нелинейными искажениями. Я определяю КНИ как отношение действующего (RMS) значения внесенного мусора в диапазоне звуковых частот к действующему значению полного выходного напряжения. Этот наиболее адекватный метод впервые предложен классиком аудиотехники И.Т. Акулиничевым. Мусор в чистом виде я получаю вырезанием основной частоты из выходного сигнала при помощи режекторного фильтра. То, что останется после этого, пропускаю через ФНЧ с частотой среза 22кГц, это и будет искомый мусор для определения КНИ. Анализ проведен при помощи наиболее совершенного симулятора электронных схем Simetrix. При правильном применении симулятора, практические измерения всегда показывают полное совпадение результатов с результатами моделирования.

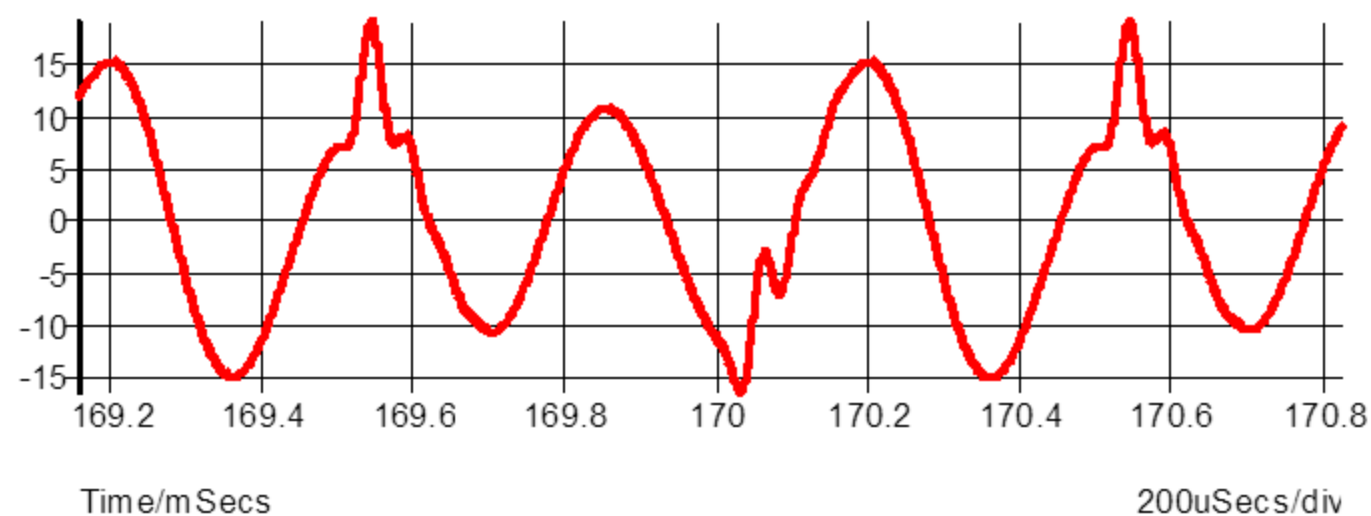
На графиках показаны результаты измерений КНИ при 1Вт на выходе и при 25Вт на выходе, каждое на 1кГц и на 10кГц. Измерять КНИ на более высоких частотах просто нет смысла, поскольку и при 10кГц даже вторая гармоника не может быть услышана, не говоря уже о высших. По результатам измерений КНИ везде заметно меньше заявленного в спецификации, причем уровень мусора ниже уровня собственного шума, и такой мусор никак нельзя услышать.



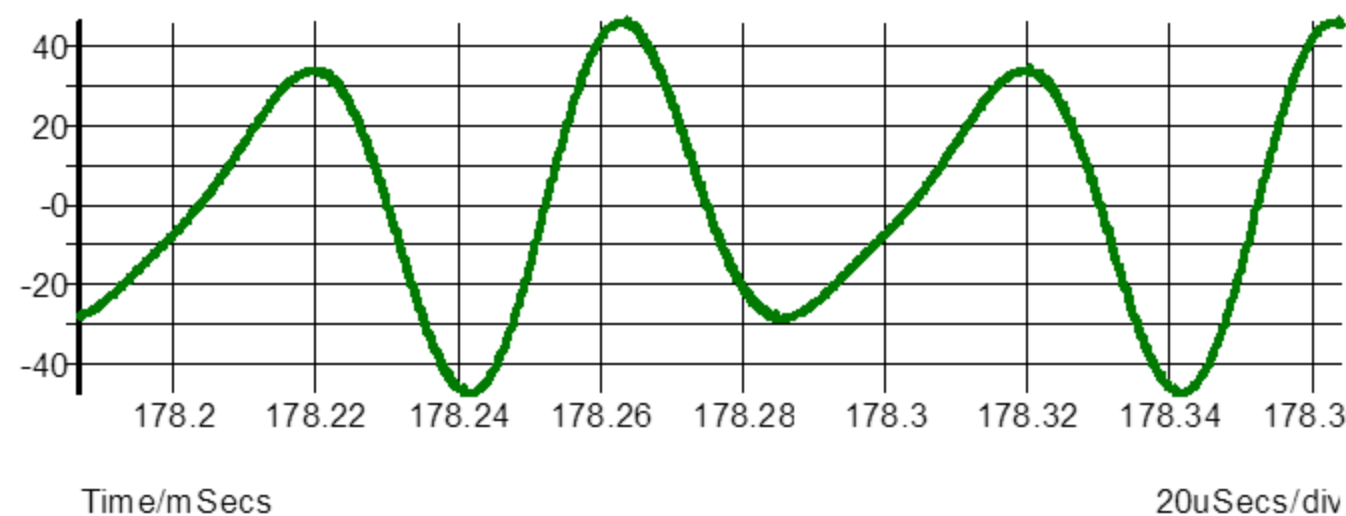
Мусор на 1кГц,
1Вт=0.56мкВ
Сигнал=2В
КНИ=0.00003%
<0.0001%



Мусор на 10кГц,
1Вт=4.1мкВ
Сигнал=2В
КНИ=0.0002%
<0.0005%

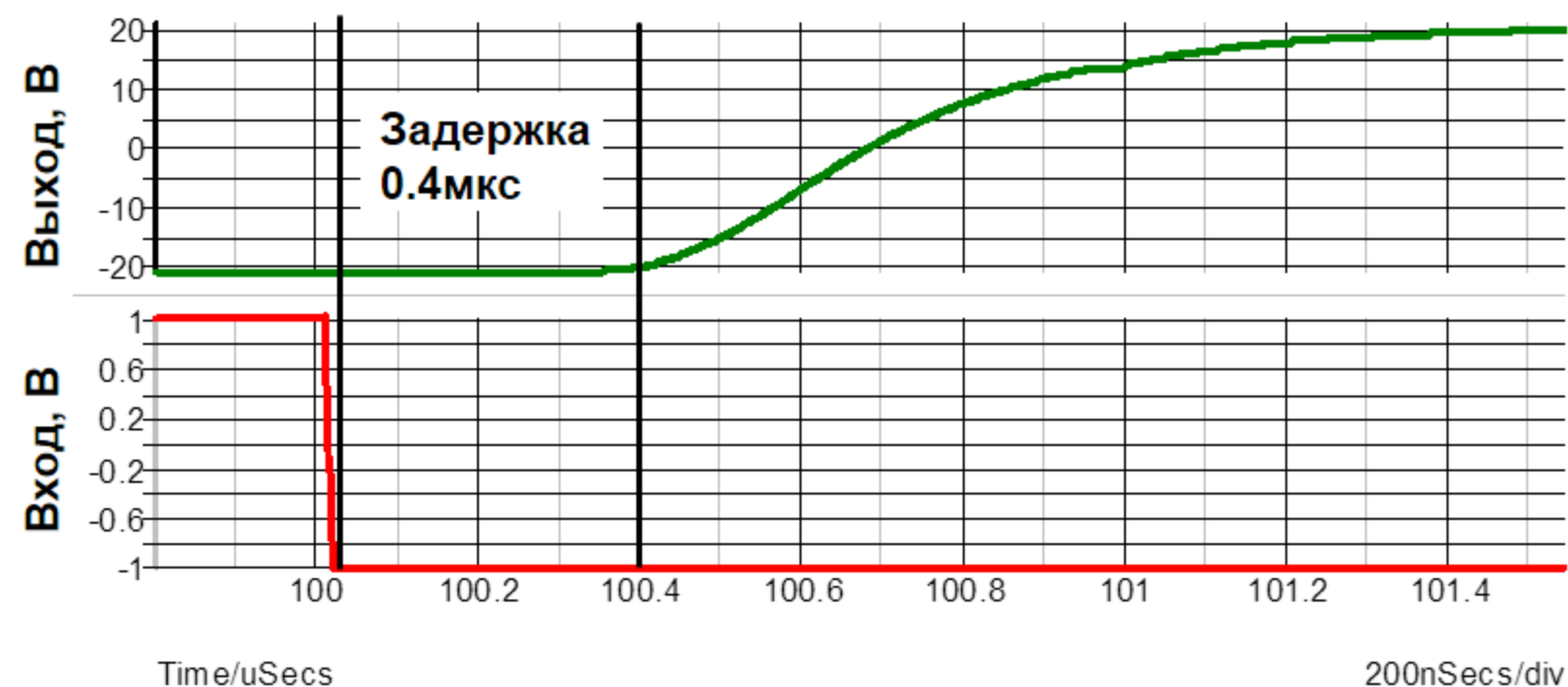
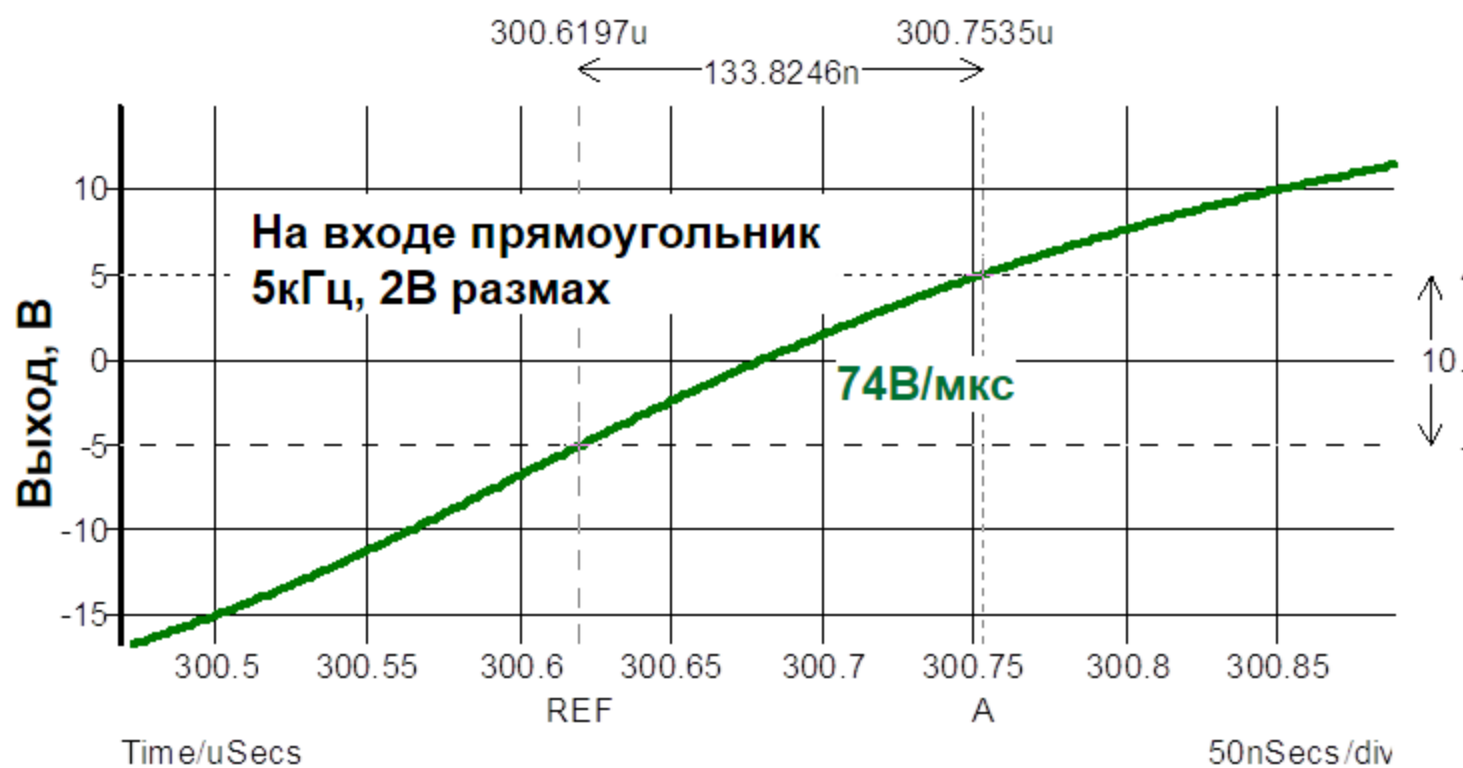
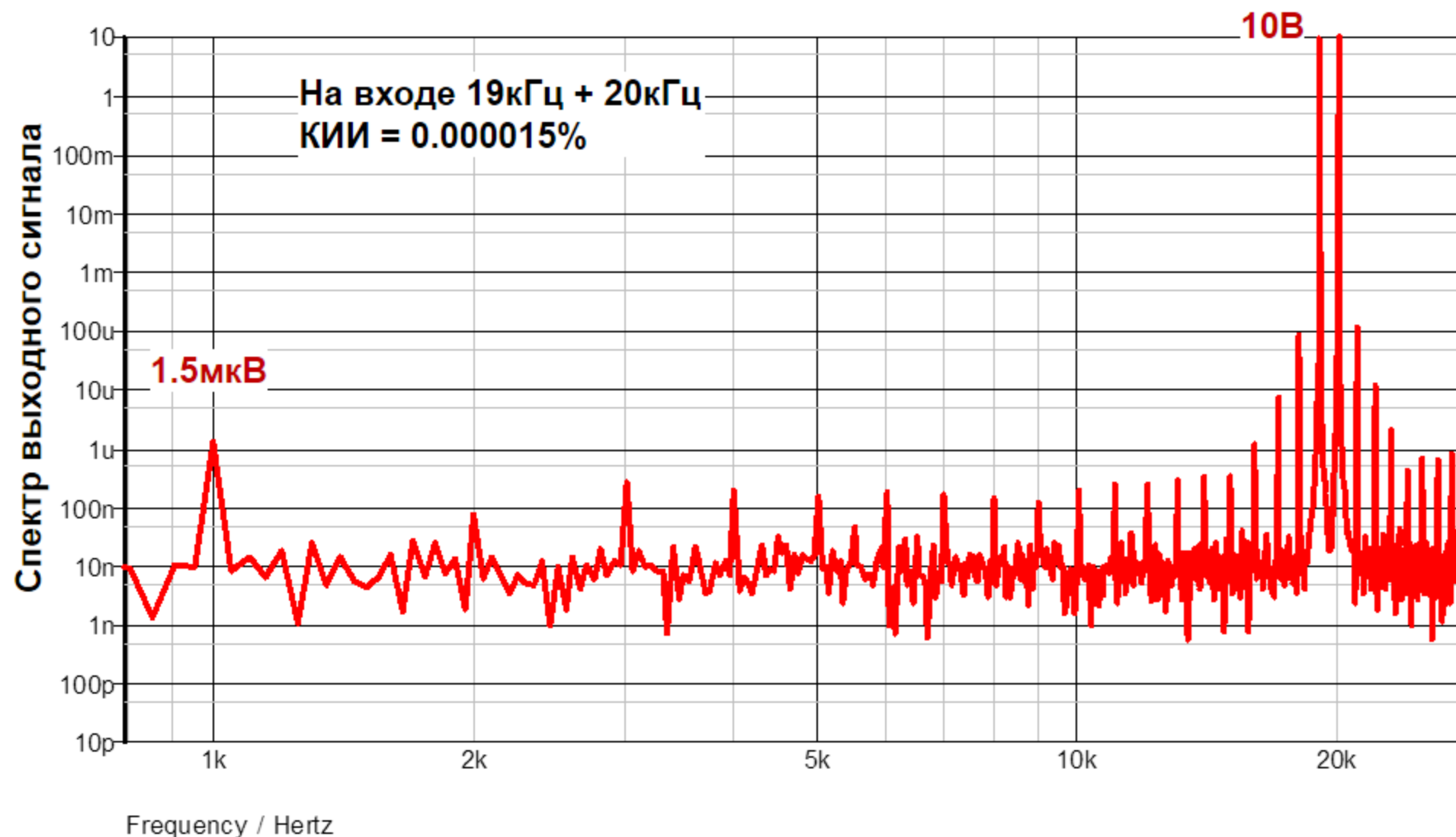


Мусор на 1кГц,
25Вт=9.3мкВ
Сигнал=10В
КНИ=0.00009%
<0.0001%

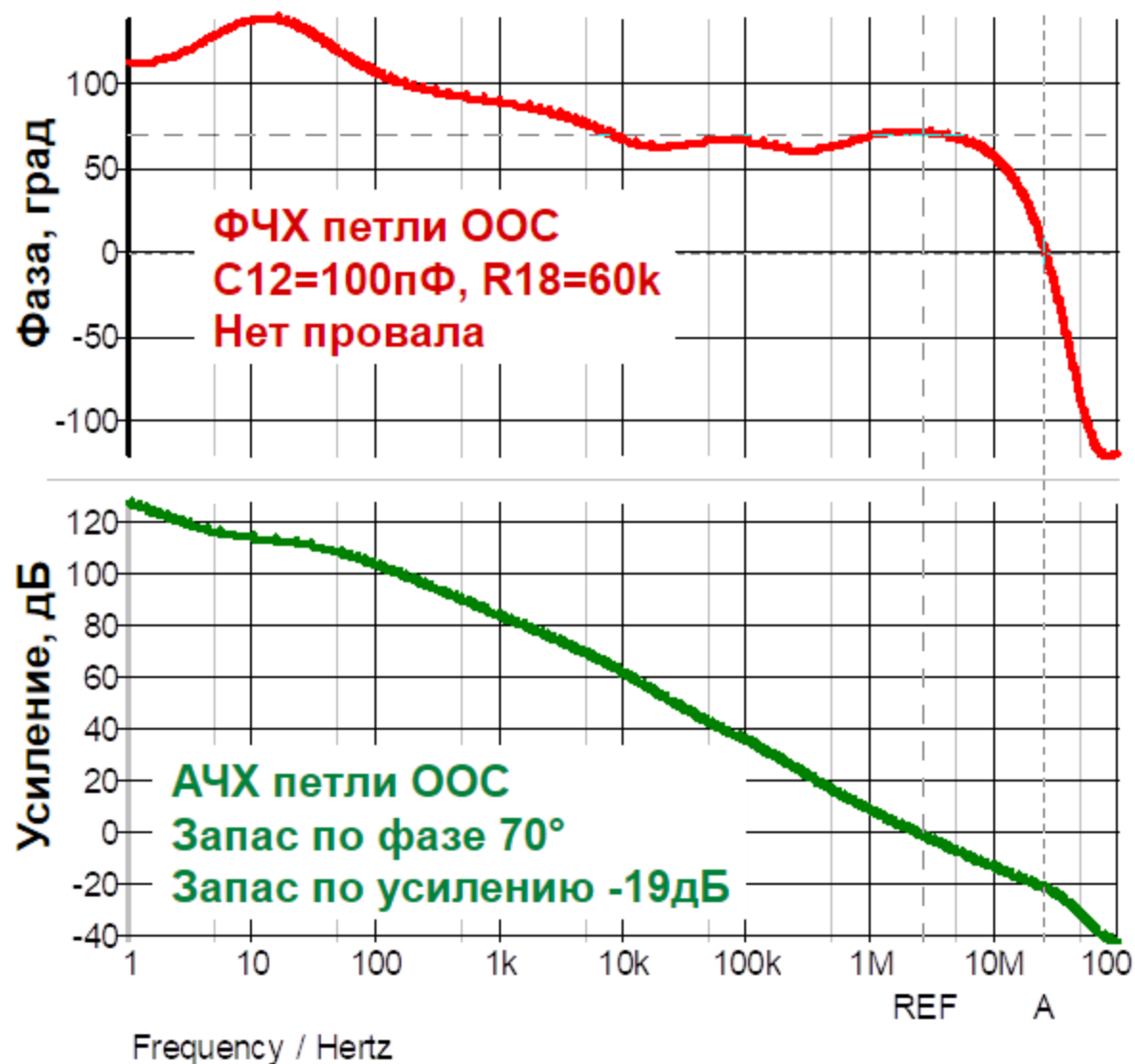
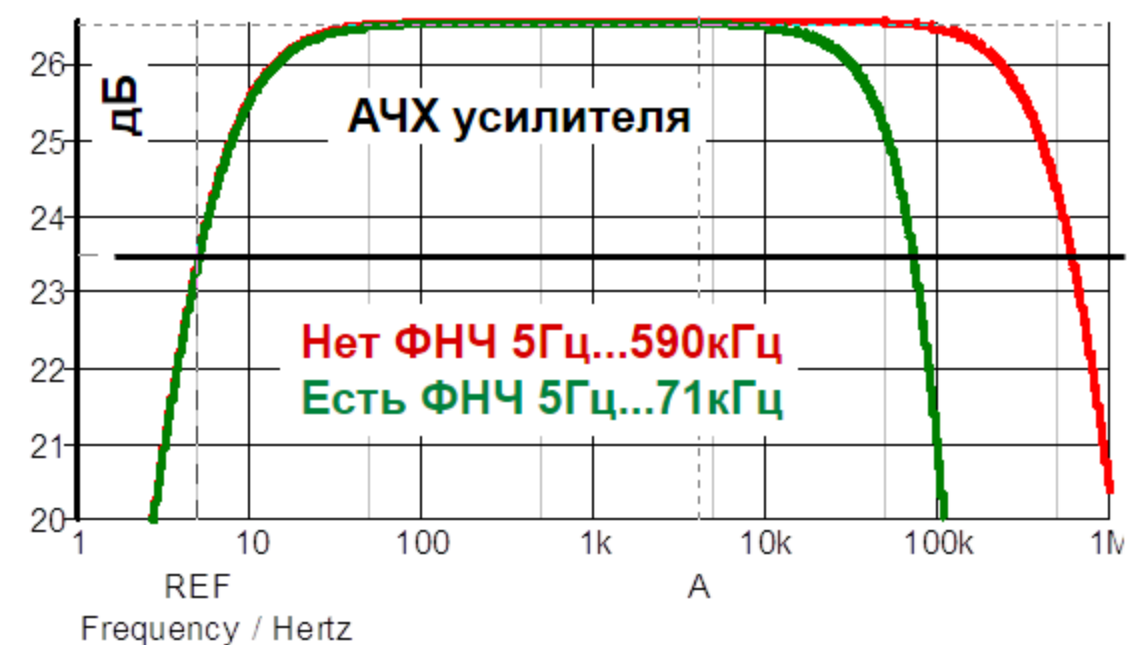


Мусор на 10кГц,
25Вт=40мкВ
Сигнал=10В
КНИ=0.0004%
<0.0005%

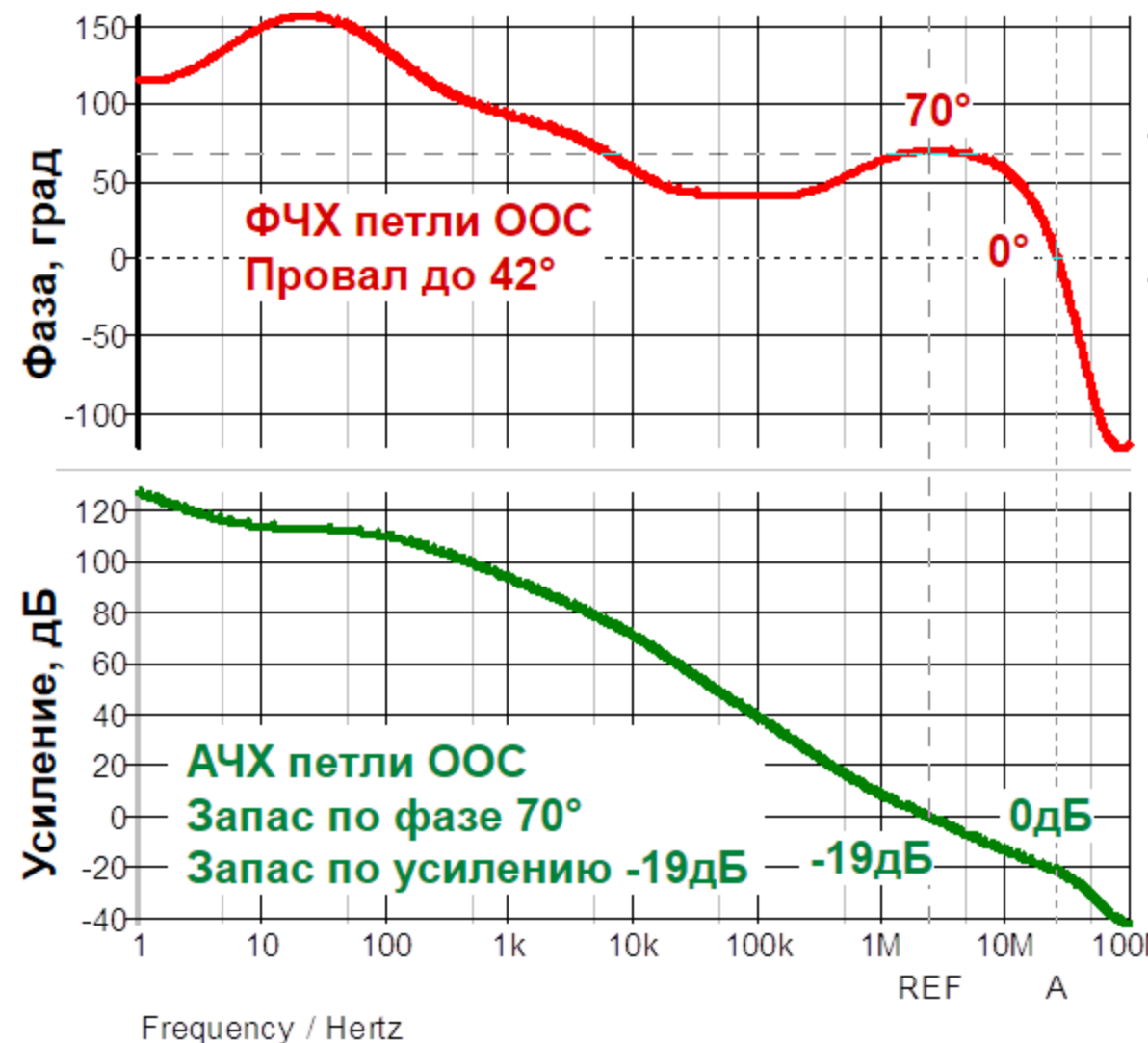
На правом графике показан спектр выходного сигнала при подаче на вход 19кГц и 20кГц одновременно. Полученный уровень разностной частоты 1кГц 1.5мкВ. Это соответствует коэффициенту интермодуляционных искажений 0.000015%, т.е. их просто нет совсем. Это следствие хорошей симметрии схемы. Далее, подаю на вход прямоугольный сигнал с частотой 5кГц и размахом 2В. Измеряю скорость нарастания выходного напряжения и задержку распространения фронта импульса от входа до выхода. Результаты на графиках внизу. Измеренная скорость нарастания выходного сигнала 74В/мкс, это превышает заявленную в спецификации величину 50В/мкс. Измеренная задержка от отрицательного фронта входного импульса до начала фронта выходного импульса 0.4мкс. Это очень неплохо даже для самого топового усилителя и также укладывается в спецификацию 0.5мкс.



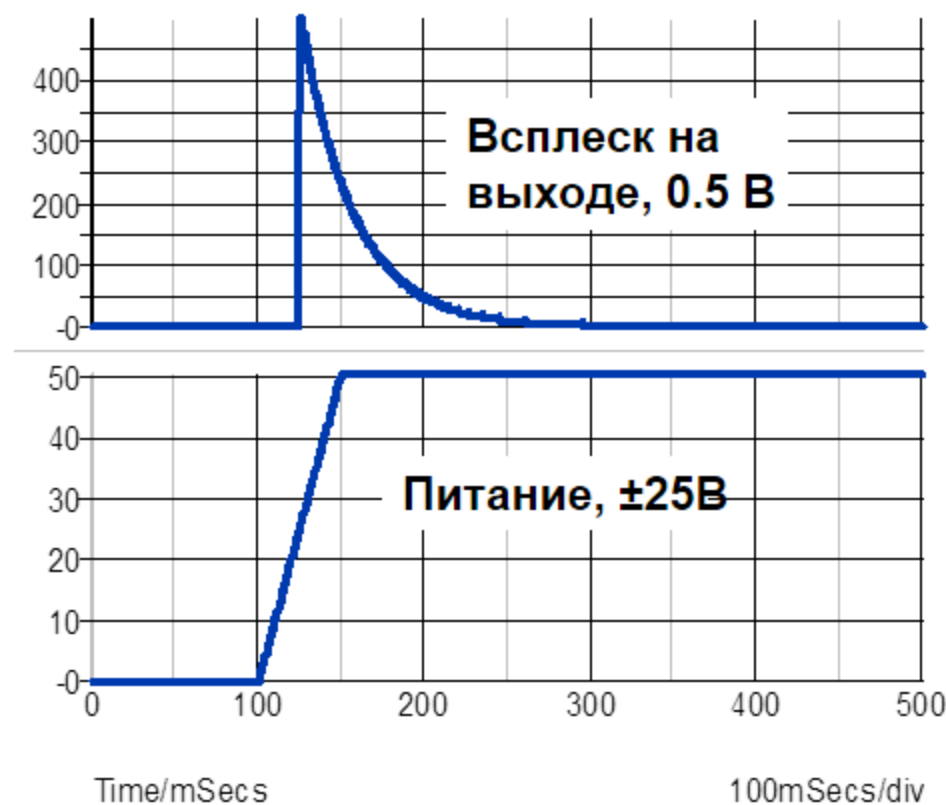
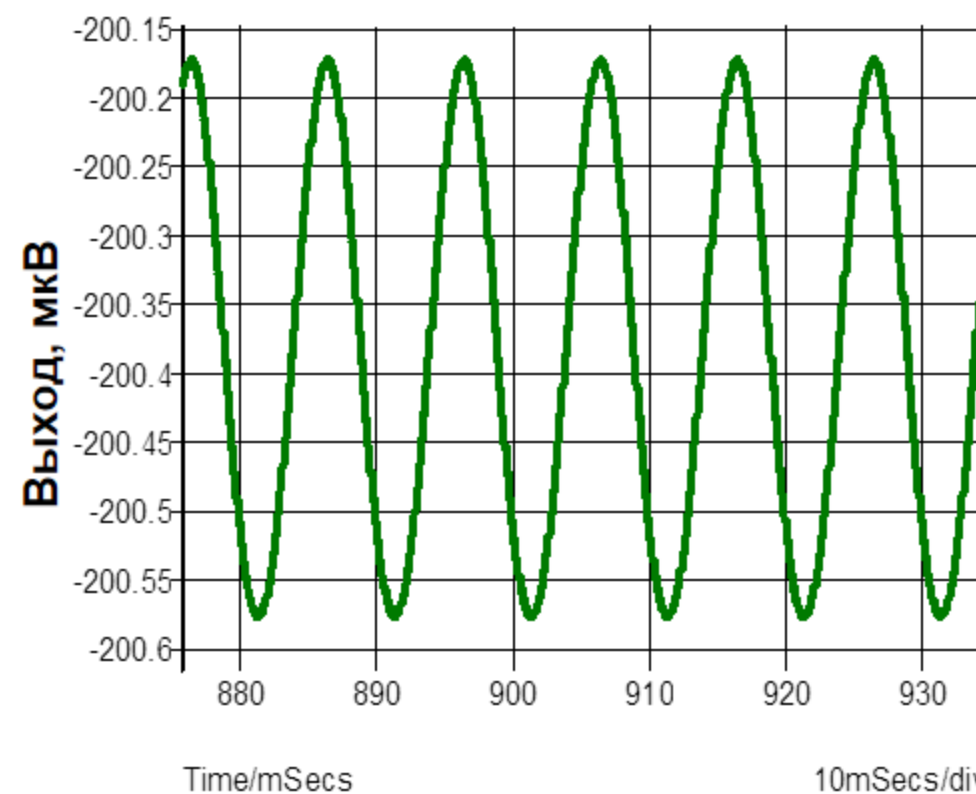
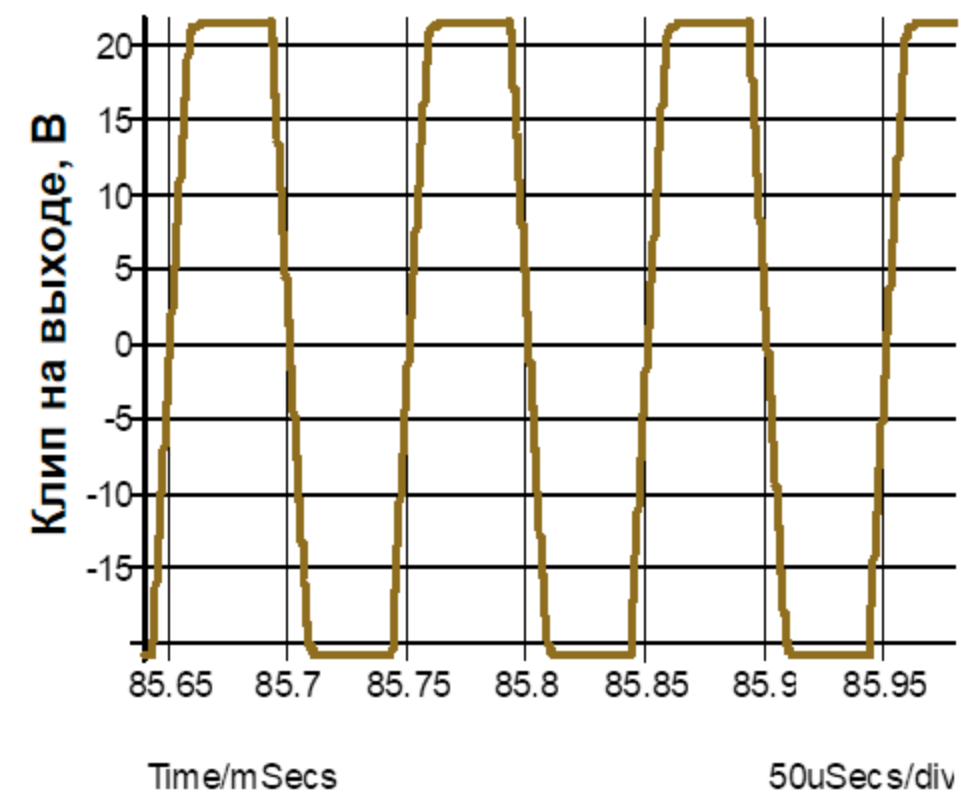
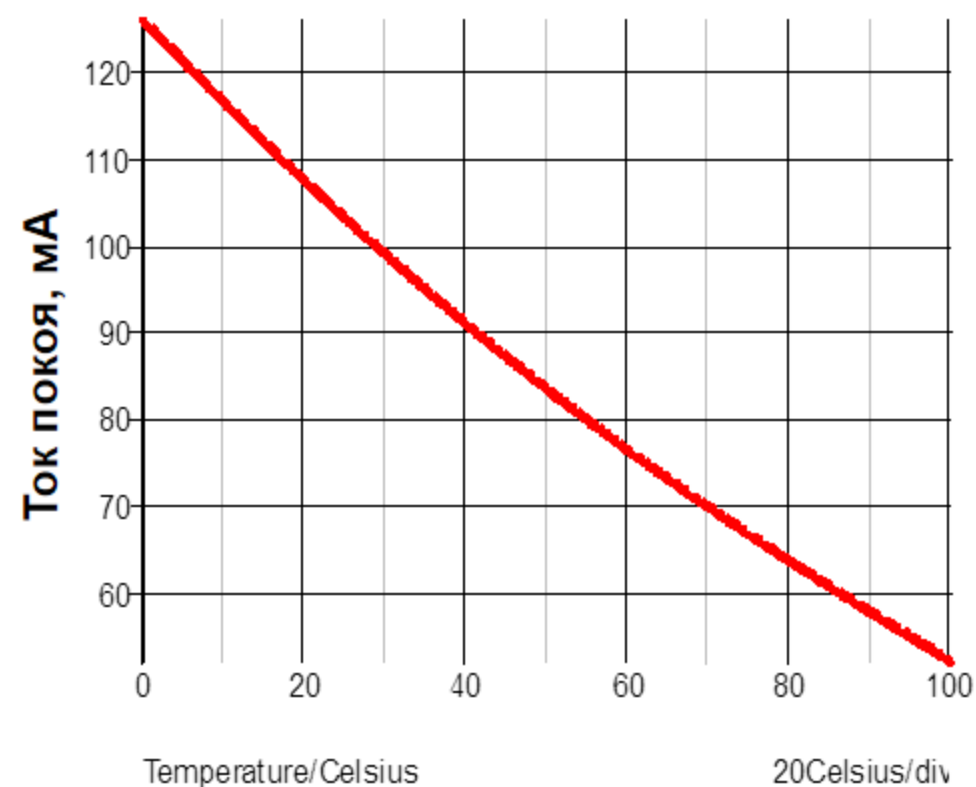
Частотная характеристика показана справа сверху. Все как в спецификации. ФНЧ напрямую не влияет на звучание, но устраняет возможные динамические искажения, возникающие при попадании на вход высокочастотных помех, лежащих далеко за пределами звукового диапазона. Далее, при помощи измерителя диаграмм Бode из арсенала Simetrix, получаю АЧХ и ФЧХ петли ООС, график справа внизу. Отмечу, что АЧХ и ФЧХ петли ООС – это совсем не то же, что АЧХ и ФЧХ усилителя с разорванной обратной связью, потому что цепочка R5, C2, замыкающая петлю ООС, уменьшает фазовый сдвиг на 60°, т.е. из фазового сдвига усилителя с разорванной ООС надо вычесть эти 60°. Измеренный запас устойчивости по фазе 70°, а запас по усилению -19дБ. Это настолько много, что означает практическую невозможность самовозбуждения даже при поддельных транзисторах. Далее, у всех известных УНЧ с ОУ на входе, включая Перегрин-50, имеется глубокий локальный провал на ФЧХ до 10° и ниже, что выглядит подозрительно. Хотя вред от него и не доказан, в Перегрине-50М я ограничил просадку фазы до полностью безопасного уровня 42°. Если изменить величины R18 и C2, можно получить вообще почти плоскую ФЧХ на высоких частотах, как на примере внизу, но это несколько снижает линейность.



Если уменьшить R18 до 62к, а C12 увеличить до 100пФ, то провал на ФЧХ практически полностью устраняется, но линейность при этом ухудшится, КНИ увеличится в 2 раза, хотя это все равно не может повлиять на звучание. Есть ли смысл в таких изменениях, я не знаю, поэтому, его нет. Здесь имеются широкие возможности для домыслов и экспериментов



Есть один нюанс, специфичный для всех транзисторных УНЧ. Транзисторы усилителя напряжения, в схеме Перегрин-50М на слайде №3, это VT2 и VT11, рассеивают 0.1Вт, поэтому они заметно нагреваются, что приводит к всем известному начальному дрейфу тока покоя после включения даже без входного сигнала. Это не недостаток схемы Перегринов, во всех других известных УНЧ все еще хуже. Чтобы его уменьшить, часто применяют транзисторы средней мощности с малой проходной емкостью, как в Перегрине-50. Такие транзисторы мало нагреваются, но их нелегко достать. В Перегрине-50М в качестве УН использованы токовые зеркала из пар дешевых маломощных транзисторов, которые легко термокомпенсируются путем склейки плоских частей корпусов транзисторов с последующей стяжкой термоусадочной трубкой. Таким образом обеспечивается тепловой контакт между корпусами, и начального дрейфа тока покоя не будет. На красном графике слева вверху показана зависимость тока покоя выходных транзисторов от температуры радиатора с VT6, VT8, VTT1. Наклон намеренно сделан отрицательным для исключения возможности теплового разгона. На коричневом графике справа вверху показан клип на выходе при двойной перегрузке по входу на частоте 10кГц. Абсолютная чистота без малейших подвозбудов и иных артефактов. Далее, исследую подавление пульсаций питающих напряжений $\pm 25\text{В}$ с размахом пульсаций 3В для каждого источника, или 6В от -25В до +25В. Частота пульсаций 100Гц. Выходное напряжение показано на зеленом графике слева внизу. На выходе 0.4мкВ 100Гц. Подавление пульсаций 137дБ, это полное отсутствие даже намека на фон, собственный шум на порядки выше. И в последнюю очередь, измеряю величину всплеска напряжения на нагрузке сразу после включения усилителя в сеть. Результат на синем графике справа внизу. После включения питания, на нагрузке появится короткий всплеск напряжения с амплитудой 0.5В и длительностью 0.1с. Это очень тихий, почти не слышный щелчок в колонках. Задержка подключения акустики здесь не требуется.





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