

УСИЛИТЕЛЬ НА ГЕРМАНИИ

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И НАСТРОЙКИ

Оглавление

Введение	1
Исходная схема.....	2
Основы.....	2
Измерения	3
Оборудование	4
Принципиальная схема. Размышления по выбору элементной базы	4
Настройка	8

Введение

Как всегда, началось все с того, что старший товарищ, уходя на заслуженный отдых, оставил несколько кило транзисторов старой формации. Большинство составляло транзисторы германевой группы, мощные, типа П213, П602, и более легкие варианты: МП42, П416 и т.п.

Выбрасывать было жалко, тем более, на форумах изредка появляются предложения использования германия в устройствах, и народ даже изредка спорит о преимуществах германия во всех смыслах. Тем более, сам я по характеру являюсь радионекрофилом, поэтому примитивная сдача на металлолом была с возмущением отвергнута. Но деталюшки лежат, греют душу, слегка раздражают, чешут руки. Девать их все равно куда-то надо. Раз так, необходимо было придумать способ более изящной утилизации полученного добра.

Для начала залезаем в интернет, ну и ничего не находим. Не, находим всякие таки примочки, усилители и тому подобное. Но это не выход, мало деталей. Даже на первый взгляд такого количества имеющихся транзисторов невозможно использовать. Впрочем, если спроектировать собственный усилитель, причем не жалея германевого металла, возможно, что и получится. Мало того, если применить имеющиеся знания по конструированию усилителей, то может получиться даже что-либо таки качественное. Что получилось – выношу на суд заинтересованного читателя.

Необходимо сказать, что применяемые мною методы настройки усилителя, ессно, не являются критерием правильности и непогрешимости. Каждый может применять все, что ему заблагорассудится. Мне кажется, что настройка усилителя с точки зрения теории устойчивости является наиболее естественной. В этом случае устраняются паразитные явления, которые могут возникнуть в схеме, а теория помогает их осознать и локализовать.

Все основные положения теории были разработаны еще в 70-х годах прошлого века. Поэтому каждое из них в процессе настройки я не поясняю подробно. Если покажется интересным обо всем можно прочитать в литературе, желательно в более серьезной, чем та, которую я потом приведу в списке. Но там практически везде есть ссылки.

Исходная схема

Вначале была предпринята попытка использования П213. Быстренько нарисована схема, посчитаны элементы. Даже разведена РСВ.

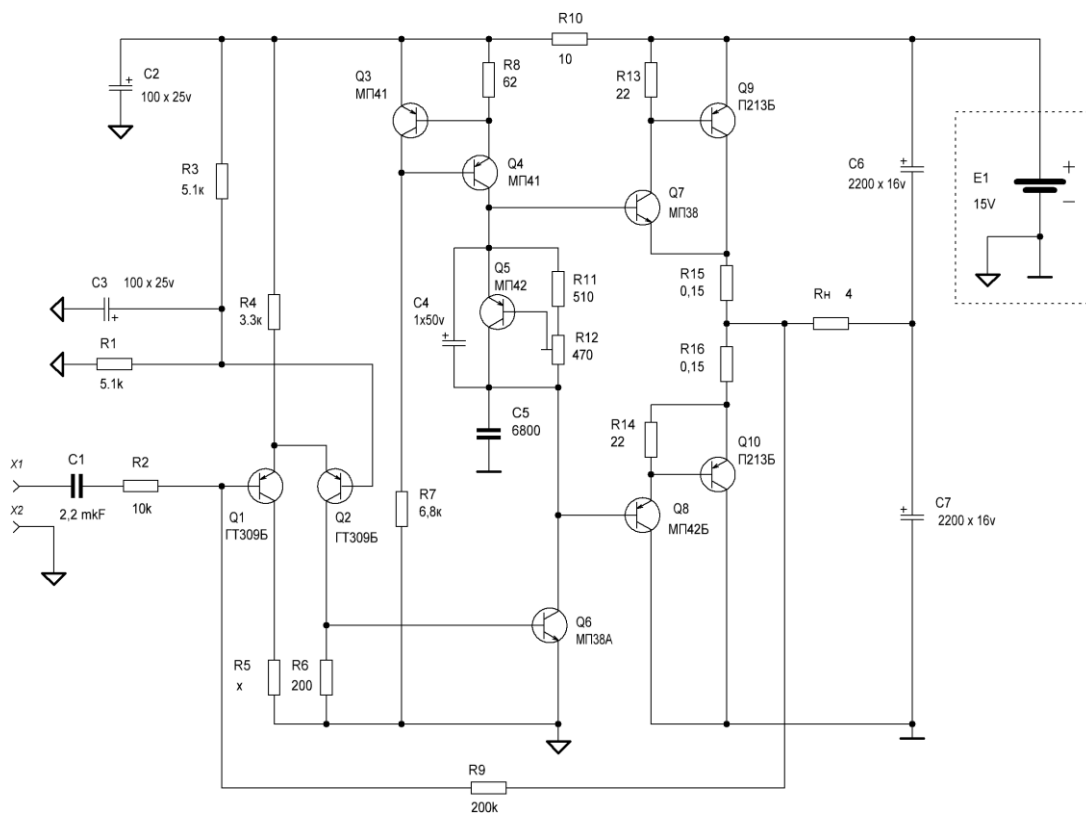


Рисунок 1. Принципиальная схема. Исходник.

Почему схема именно такая – объяснить не могу. Так получилось. Усилитель инвертирующий. Сделан полностью на германии. Как бы давно отработан в мировой практике.

При включении показал довольно приятные результаты. Однако выяснилось, что через П213 начиная с частоты 8 кГц на синусе начинает возрастать неуправляемый ток. Ближе к 15 килогерцам ток возрастает настолько, что транзисторы потихоньку закипают. В принципе, об этом эффекте свидетельств полно. Думалось, что у меня-то такого не случится. Случилось...

Пришлось менять их на П606А. Почему они? Да просто было 8 штук, что должно было облегчить замену при случайном выходе из строя. К тому же их предельные параметры практически полностью удовлетворяют задуманному проекту. Так, импульсный коллекторный ток заявлен в 1,5 А. Я рассчитываю на амплитуду напряжения на нагрузке 4 Ом примерно 6 В (12 Впик-пик). Это как раз соответствует амплитуде тока в 1,5 А. Рассеиваемая мощность тоже где-то в пределах. Считать точно пока не буду, для опытов пойдет. А вот неоспоримое преимущество – максимальная частота. Она у П606 составляет 20 МГц. В данном случае эффект возрастания неуправляемого тока с ростом частоты должен исчезнуть. И таки да, после замены он исчез.

А дальше началась настройка. Которая как-то не складывалась. Вдруг подумалось, что необходима коррекция схемотехники и, в конце концов, использование мирового опыта в искусстве усилостроения. Лезем в литературу, смотрим, что нам говорят корифеи.

Основы

Начнем с Бодэ¹. Это как бы первые шаги. Не обсуждается.

Хоровиц/Хилл². Руководство к действию! Теоретические основы.

Майоров³. Пожалуй, первое на русском языке теоретическое обоснование процессов, происходящих в усилителях.

Еще раз Майоров⁴. Все как бы правильно, но что-то смущает. Ощущение когнитивного диссонанса. Хотя для тех лет простительно. Теория ООС в мировой радиотехнике уже хорошо развита, но до нашей страны все доходит с большой задержкой.

Витушкин/Телеснин⁵. Сложно сказать. Наверно, так все и есть, только что-то мне подсказывает, что в том усилителе, который они исправляли, имелись дефекты в схмотехнике.

Агеев⁶. Обсуждаются вопросы использования ООС в усилителях. Умно, но непонятно.

Зуев⁷. Опять в целом правильно. И даже полезно. Правда, когнитивный диссонанс буйствует во всю силу. Кажется, в статье речь идет не совсем о том, что заявлено в заголовке. Автор жонглирует полюсами, анализируя скорость нарастания, однако в теории она от расстановки полюсов между собой не зависит. Либо это не скорость нарастания. Впрочем, здесь проглядывают уши от использования [3,4]. Но в 2003 году уже как-то можно было бы изучить вопрос.

Sergej Schulz⁸. В статье имеется теоретическая часть. Очень подробно о полюсах. Кое-где можно поспорить, но в целом очень даже грамотно.

Практические схемы⁹. Привожу небольшую подборку реально сделанных читателями журнала «Радио» усилителей. Подбирались схемы с основным упором на германий. В то время выбор элементной базы был весьма невелик, да еще и народ страшно экономил, поэтому усилители исполнены довольно аскетично. Хотя основные направления в схмотехнике довольно прилично просматриваются. Но использовать их сейчас вряд ли целесообразно. Единственная кремневая схема, ставшая, похоже, классикой – усилитель Шушурина¹⁰. Пожалуй, он у меня идет за основу. В качестве такой же основы можно еще упомянуть похожий TORCHIBAS AMP¹¹.

Измерения

Необходимо определиться с объективными критериями оценки усилителя, т.е., что и куда будем посмотреть. Какие сейчас действуют общепринятые я не знаю, давно усилостроением не занимался, поэтому буду применять те, которые считаю нужными.

1. АЧХ. Принято считать, что чем больше полоса пропускания, тем лучше. Чем выше предельная частота усилителя, тем лучше усилитель. Кроме того, данный тест выявляет склонность усилителя к самовозбуждению. По виду АЧХ можно сделать выводы о взаимном расположении полюсов и направлении настройки усилителя.

АЧХ собираюсь мерить следующим образом.

а) – на вход подаю синус напряжением 25 мВ. Малый уровень сигнала определяется условием, по которому для исключения динамических искажений вход усилителя нельзя перегружать большим сигналом. При этом на выходе мы будем иметь 500 мВ на нагрузке 4 Ом.

б) – по выходу подключаю осциллограф.

в) – увеличиваю (уменьшаю) частоту синуса до того момента, как выходной сигнал упадет до уровня 0,7 от уровня на средних частотах.

2. Переходная характеристика. В принципе, в рамках нашего проекта, это эквивалент АЧХ. По ней также можно настраивать усилитель. Мало того, простота и наглядность измерений делает ее даже более удобной для настройки усилителя. Уровни входных сигналов такие же, как и при измерении АЧХ. Только вместо синуса подается импульсный сигнал с крутыми фронтами.

3. Скорость нарастания выходного сигнала. Эта характеристика нелинейная, поэтому усилитель необходимо загнать в нелинейный режим. Для этого на вход необходимо подать импульсный сигнал такой амплитуды, который заведомо перегрузит усилитель. В нашем случае амплитуда по выходу ожидается в 12 В_{pp}, поэтому на вход надо подать импульсный сигнал размахом порядка 0,6 В. Данный сигнал ненамного превышает предельный относительно линейный уровень входного сигнала усилителя в 100 мВ, поэтому с измерением скорости нарастания могут возникнуть проблемы. Потом, при работе на железе, посмотрим.

4. Полоса пропускания максимальной мощности. Очень важный показатель. Определяется скоростью нарастания выходного напряжения. Мерить буду на уровне выходного

напряжения примерно 0,9 от максимального. Фиксировать придется «на глаз» по осциллографу, по началу видимых искажений синуса.

5. Посмотрю поведение усилителя на разных уровнях выходного сигнала, как синуса, так и импульса. Особенно интересно, как усилитель ведет себя при выходе из перегрузки. Измерение буду проводить на разных частотах, в том числе на предельных.

6. Для контроля качества настройки усилителя измерю время установления переходной характеристики на разных уровнях выходного напряжения. Про использование таких параметров в усилостроении в литературе не нашел, они мало информативны в обычных измерениях.

Оборудование

1. Понятно, что хотелось бы знать полосу пропускания усилителя. Для этого необходим генератор синуса. Поскольку стремлюсь создать нечто качественное, верхняя частота генератора должна уходить ближе к 1 МГц, лучше к 5 МГц.

2. Хотелось бы знать коэффициент гармоник. Необходим генератор синуса, причем он может быть не очень высокочастотным, но иметь очень чистый спектр. Такого в моем арсенале нет, поэтому измерение к-та гармоник стыдливо опускаю.

3. Устойчивость усилителя очень хорошо исследуется по переходной характеристике. Для этого необходим генератор импульсов с очень крутыми фронтами, как нарастания, так и спада напряжения. На фронтах импульса не должно быть выбросов, а «полочки» не иметь переколебаний. Частота повторения импульсов и скважность особого значения не имеют, мы не собираемся исследовать тонкие процессы. Вполне достаточно, если частота будет порядка 1 кГц. Такой генератор был в свое время мною изготовлен и успешно применялся для самых разных работ.

4. Осциллограф. Должен показывать все вышеперечисленные характеристики. Опять же, от исследования тонких процессов мы отказались, поэтому особых требований не предъявляем.

5. Тестер. Потребуется мерить постоянные и переменные напряжения и β транзисторов. Желательно, чтобы он мог еще и измерять емкости конденсаторов.

6. Блок питания. При настройке необходим лабораторный блок питания на 15 В. Учитывая чувствительность германевого материала по отношению к температуре, БП должен обладать свойством ограничения тока на уровне примерно 1 А. У меня лабораторный импульсный, в дальнейшем, ежели потребуется, планируется использование перестроенного на 15 В восемнадцативольтового трехамперного блока от старого ноутбука.

Принципиальная схема. Размышления по выбору элементной базы

Собственно, сначала в некотором роде ТЗ. Любой проект начинается с этого этапа. Здесь мы можем определить основные подходы к конструированию усилителя, требования к проекту, а также начальные расчеты и выбор элементов.

1. Основная цель – это использование германия. Лепим транзисторы везде, где кажется необходимым. Естественно, без фанатизма. В общем-то, именно этому и посвящен проект: максимальная утилизация антуквиариата. Поскольку в моем распоряжении оказались самые разные транзисторы, в выборе типов для установки в усилитель я себя практически не ограничиваю.

2. Напряжение питания. Весь германий, за редкими исключениями, работает при напряжении между коллектором и эмиттером не более 15 В. Большинство конкретных экземпляров транзисторов может выдержать большее напряжение, однако мы ведем инженерный расчет, который предполагает корректное использование предельных параметров элементов.

Поэтому напряжение питания усилителя выбираем $E_{п}=15$ В.

3. Сопротивление нагрузки. Обычно это 4 или 8 Ом. Усилитель у нас маломощный, примененные выходные транзисторы работают на пределе (имеется ввиду 4 Ом), поэтому очень интересно их поведение в граничных режимах. Выбираем нагрузку 4 Ом. Потом можно будет посмотреть, как нагрузка 8 Ом изменит параметры усилителя.

На этом составление ТЗ можно закончить и перейти к обсуждению схемы. Принципиальной ее пока рано называть, таковой она станет после испытаний и настройки.

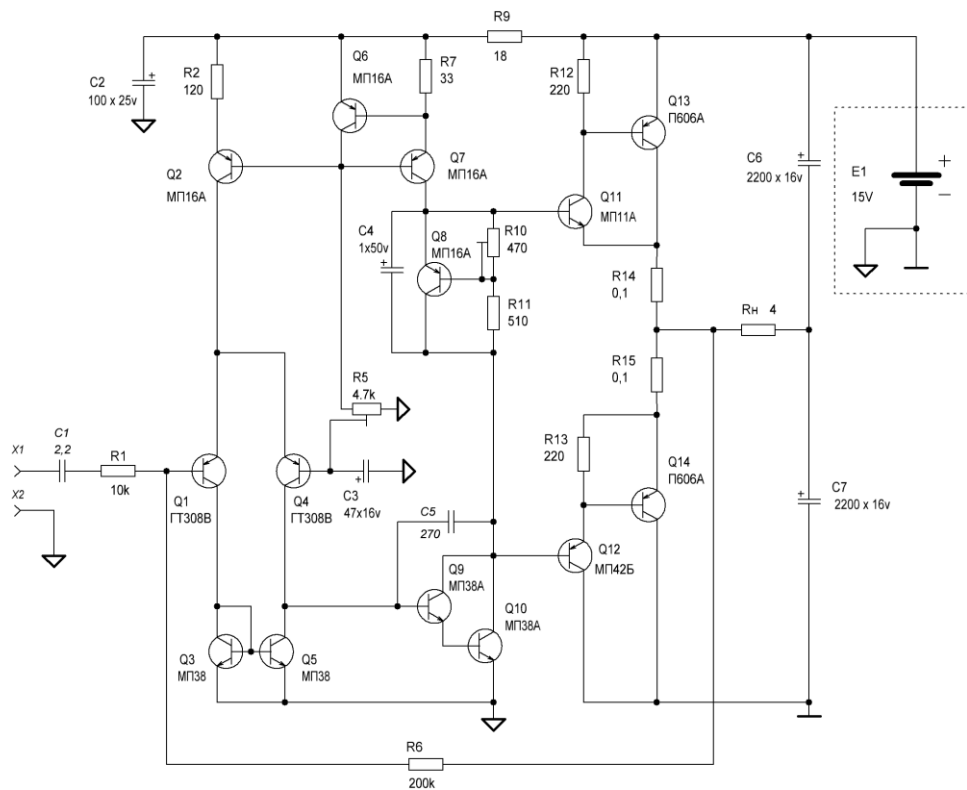


Рисунок 2. Схема усилителя.

Вот такой усилитель. Повторюсь, в нем нет каких-либо новых идей, все давно, еще в прошлом веке, предложено, испытано и используется. Просто интересно, как это будет работать в таком необычном, давно забытом, исполнении.

По поводу утилизации германия. Как видим, планируется использовать 5 штук маломощных р-п-р: МП42 (МП16), 5 штук п-р-п: МП38 (МП11), и по паре высокочастотных ГТ308 и мощных П606А. В 60-х прошлого века подобное называлось бы: «Усилитель на 14 транзисторах». На всякий случай отмечу, обозначилась небольшая проблема: если р-п-р транзисторов у меня много, то с п-р-п сильно хуже.

Итак, принципиально Рис.2 от Рис.1 отличается наличием транзисторов Q3,Q5. Что это мне должно дать?

Сначала выставим претензии к усилителю на Рис.1.

Как и у всех усилителей по такой схеме, в нем имеются три полюса частотной характеристики, по числу каскадов усиления. Располагаем их по степени влияния, во всяком случае, как хотелось бы:

а) Первый полюс сформирован выходным сопротивлением Q2, резистором R6 с параллельным подключением входного сопротивления Q6 и емкостью Миллера транзистора Q6. Коэффициент усиления в этой схеме не очень большой, так как сопротивление нагрузки относительно невелико. Из-за приличной Миллеровой емкости частота полюса невелика и может лежать в пределах от 100 Гц до 5 кГц. Будем называть его Главным полюсом.

б) Второй – образован выходным сопротивлением Q6, входным сопротивлением выходных предусилителей на Q7,Q8, входным сопротивлением усилителя тока на Q4 и паразитными емкостями базовых переходов транзисторов и емкостью C5. Усиление каскада на Q6 довольно велико, так как определяется небольшими базовыми токами, большим β и относительно большим входным сопротивлением драйверного каскада. Частота полюса расположена в диапазоне сотен кГц. В дальнейшем будем называть его вторым полюсом.

с) Третий образуется в выходном токовом бустере. Его частоты лежат далеко за пределами рабочей частотной характеристики усилителя. Во всяком случае, должны. Коэффициент усиления по напряжению в нем слегка меньше единицы и не оказывает влияния на общее усиление

усилителя, зато влияние задержки фазы на устойчивость может быть очень велико. Обычно параметры выходного каскада выбираются такими, что начало задержки фазы происходит на достаточно высоких частотах, чтобы не оказывать влияния на характеристики усилителя. Будем называть его третьим полюсом, хотя при определенных параметрах примененных элементов он может попасть и на вторую позицию, но таких ситуаций постараемся всячески избегать.

Все бы ничего, и, в большинстве случаев, прекрасно работает, однако германий имеет ряд серьезных недостатков. Большие паразитные емкости переходов могут повлиять на частоты среза усилительных каскадов. Из-за этого нарушается взаимное расположение полюсов. Повышенный неуправляемый ток может привести к снижению усиления каскада, что также приведет к разбалансировке полюсов. При этом может возникнуть ситуация, которая почему-то корифеями не рассматривается: полюс каскада с меньшим усилением имеет частоту меньшую, чем главный полюс. В плане практического применения это означает, что характеристика усилителя, охваченного ООС, в точке окончания действия ООС практически для всех коэффициентов усиления будет иметь наклон более 20дБ/декаду. А это, в свою очередь, переводит усилитель в зону потенциальной неустойчивости усилителя, охваченного ООС.

Для уменьшения склонности к самовозбуждению в этом усилителе использован конденсатор С5. При его увеличении главный полюс смещается в более низкочастотную область. При этом убиваются частотные характеристики и динамика усилителя.

Этот конденсатор можно включить не об землю, а об базу Q6. В литературе это называется «расщеплением полюсов». В этом случае могут сдвигаться оба полюса одновременно, однако их близкое расположение не дает возможности эффективно расположить полюса друг относительно друга.

Выходом из положения предлагается некоторая модификация схемы, позволяющая далеко разнести между собой полюса по частотной оси и улучшить некоторые параметры усилителя.

Смотрим схему на Рис.2.

1.

2. Входной дифференциальный каскад нагружен на отражатель тока на транзисторах Q3, Q5. Малое динамическое сопротивление диода на Q3 обеспечивает малый к-т усиления и снижение влияния эффекта Миллера для входного сигнала. Из-за большого усиления второго каскада конденсатор коррекции С5 может быть относительно небольшого номинала, что благоприятно сказывается на динамической характеристике усилителя.

3. Входной дифференциальный каскад на Q1, Q4 совместно с Q3, Q5 и Q2 обеспечивает раскату тока, необходимого для работы второго каскада, и должен иметь максимальную широкополосность. Как ни странно, в этом каскаде возможно образование сразу трех полюсов.

Первый, Главный, о нем я уже писал, формирует частотные характеристики усилителя без ООС, образуется из входного сопротивления каскада на Q9 и конденсатора С5 с участием эффекта Миллера.

Второй возникает из-за ограниченной скорострельности транзисторов дифкаскада. Если применить низкочастотные, например, МП42, будем иметь завал АЧХ на частотах значительно ниже 1 МГц. Так как усилитель планируется широкополосным, вполне вероятно сильное влияние этого полюса на характеристики усилителя, особенно если учесть совокупное влияние полюса второго каскада. Для его исключения устанавливаем в дифкаскад высокочастотные транзисторы, тем самым изначально загоняя паразитный полюс в высокочастотную нерабочую область.

Третий полюс возникает из-за ограничения полосы частот транзистора Q2, работающего источником тока для дифкаскада. В самом деле, при повышении частоты свойства транзистора ухудшаются, и связь входного транзистора со своей дифференциальной парой начинает шунтироваться малым сопротивлением источника тока. Возникает паразитный полюс. Устранить такое влияние можно либо установкой обычного резистора вместо источника тока, либо, опять же, заменой на высокочастотный транзистор. Пока оставим МП16, при настройке обязуюсь посмотреть его влияние на характеристики усилителя.

Требования к входному каскаду: 1) – обеспечение широкополосности, это мы уже обсудили. 2) – минимальный входной ток. Это требование возникает из-за большого сопротивления

обратной связи, на котором необходимо обеспечить минимальное падение напряжения. Необходимо применять транзисторы с большим β . 3) – симметрия дифференциального каскада. Это общее требование к дифкаскадам. В данном случае необходим хотя бы минимальный подбор транзисторов по β . 4) – высокое напряжение $U_{ке}$, соответствующее напряжению питания. В принципе, достаточно обеспечить половину напряжения питания, т.е., 7,5 В, этому требованию удовлетворяют практически все ВЧ германцы. Однако при настройке возможны всячески разнообразные нештатные ситуации, поэтому на текущем этапе предпринимаем все возможные способы предохранения.

Наилучшим вариантом в этом каскаде кажутся транзисторы ГТ308, подобранные по β , который у меня оказался в районе 115. Кроме того, у них нормируются шумовые параметры, что также является немаловажным преимуществом.

К Q3, Q5 особых требований конкретно по частоте не предъявляется, поскольку полюс, в формировании которого они участвуют, довольно низкочастотный. Однако низкочастотные транзисторы имеют не очень хорошие паразитные параметры, в частности, большие емкости переходов. Поэтому лучше бы сюда установить транзисторы с возможно большей максимальной частотой. К сожалению, выбор из n-p-n германцев довольно невелик. Собственно, самые высокочастотные только одни, серии МП38, с максимальной частотой 2 МГц.

4. Применение составного транзистора Q9, Q10 обеспечивает большой к-т передачи тока и большое усиление усилителя без ООС. В принципе, из-за этого главный полюс смещается совсем уж в низкочастотную область, однако для всего усилителя это не имеет значения.

Требования к каскаду: 1) должен обеспечивать максимальное усиление. Для этой цели применен составной каскад. β транзисторов также необходим максимальный, в нашем случае измеренный - около 100. 2) – чтобы не вносить в АЧХ дополнительного полюса, каскад должен быть максимально широкополосным.

Этим условиям удовлетворяют только МП38А.

5. Предоконечные драйверы Q11, Q12. Для получения максимального усиления входное сопротивление этого каскада должно быть по возможности максимальным. Этого можно достичь применением транзисторов с большим β . Что касается Q11, вариантов из германия нет – МП38А. На позиции Q12 - МП42Б. И тот и другой должны иметь соответствующие предельные параметры: максимальный ток эмиттера может достигать 150 мА, а рассеиваемая мощность 200 мВт. Может быть, и больше, но считать не имеет смысла, поскольку альтернативы все равно нет.

6. Оконечные транзисторы. Как выяснилось, при эмиттерном токе в 1,5 А у П606А напряжение база-эмиттерного перехода составляет 0,8 В. Поэтому предварительный расчет размаха выходного напряжения пик-пик дал число 12 В. Или амплитуда размаха выходного напряжения $U_{outa}=6В$. Эмиттерный ток составит как раз 1,5 А, что не превышает предельно допустимого, хотя и в импульсе (по справочнику). В этих условиях выходная мощность на 4 Ом будет равна 4,5 Вт. Если считать КПД=50%, то мощность, рассеиваемая на одном транзисторе, составит 2,25 Вт. Кроме того, эту мощность смело можно поднять до 3 Вт за счет нагрева эмиттерного перехода входным током базы.

Однако это еще не все. При работе этих транзисторов основная мощность, мгновенная, выделяется на коллекторе не при пиковых значениях тока и напряжения, а, если речь идет о синусе, с некоторым сдвигом по фазе. В остальное время переход медленно остывает. Для германия такое поведение может стать смертельным. Тепловое сопротивление переход-корпус для П606 велико, 15 град/Вт, при мгновенном выделении мощности на коллекторе транзистора переход разогревается сильнее предельно допустимого значения в 85 Цельсиев, и переход пробивается из-за перегрева. Если в этот момент ток через транзистор ничем не ограничен, наступает большой барабум.

Для устранения такого поведения есть смысл применить в качестве выходных что-либо вроде ГТ806, которые обладают большим запасом по рассеиваемой мощности и сильно меньшим тепловым сопротивлением.

Но побережем пока таки ГТ806, а для проверки основных характеристик усилителя попользуемся П606А, которые, хотя и на пределе, но все-таки вписываются в заявленные требования.

7. Пару слов о С4. Он обычно ставится для ускорения передачи ВЧ сигнала на верхний драйвер, тем самым увеличивая широкополосность усилителя. У меня этот тезис вызывает некоторые сомнения, поэтому пока оставим схему как есть, с тем, чтобы проверить влияние С4 при регулировке.

Настройка

Ну вот. Начинаем работы по железу. День потратим на разводку платы, так как было принято решение не связываться с макетом: на печатке удобнее проводить настройку, не надо путаться в проводах, да и будет чертеж печати, что потом облегчит идентификацию элементов. Еще полдня на сборку, приступаем к настройке.

Размеры платы: 112x60 мм.



Рисунок 3. Собранный усилитель.

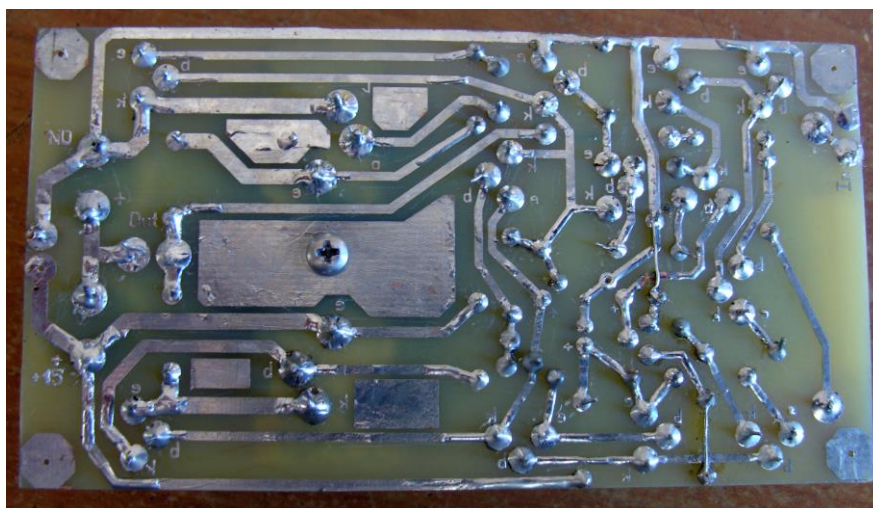


Рисунок 4. Печатка.

1. Корочу на землю вход усилителя, устанавливаю ограничение тока на БП в 100 мА, включаю питание. На выходе осциллографом смотрю реакцию. И она таки радует. Перегрузки нет, признаков возбуда тоже нет. Устанавливаю резистором R5 на выходе напряжение 7,5 В, R10 - ток потребления 60 мА. Такая величина означает 50 мА через выходные транзисторы в покое. Возбуда опять нет, и это хорошо.

2. Подаю на вход синус частотой 4 кГц. Так устроен мой генератор: у меня нестандартные границы диапазонов. Для удобства пока использую один диапазон с перестройкой от 4 до 450 кГц.

Разгоняю размах амплитуды по выходу на 8 В и вижу неприятность: «волосы» снизу и сверху синуса.

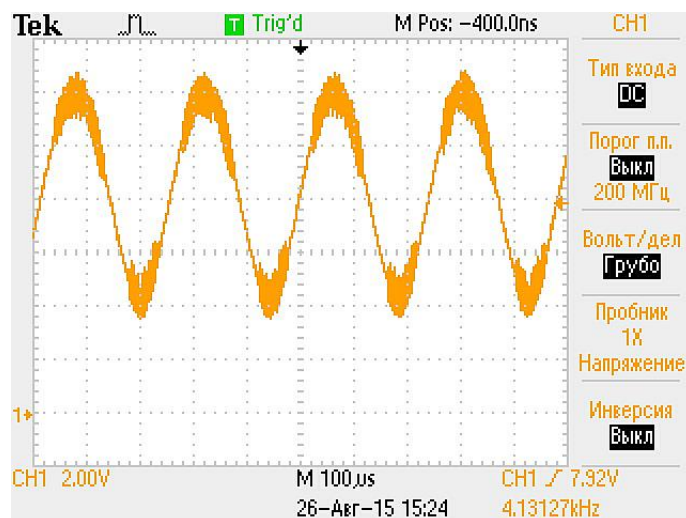


Рисунок 5. Синус на выходе.

Пытаюсь рассуждать. Волос появляется на больших амплитудах, причем на положительной полуволне оволосение слегка больше, чем на нижней. В принципе, очевидно: из-за ограничения по частотным характеристикам пара транзисторов одного плеча (верхнего или нижнего) не справляется с усилением тока на больших амплитудах. С ростом выходного напряжения на нагрузке напряжение на выходных транзисторах с одновременным ростом тока уменьшается, ухудшаются усилительные свойства каскада. Третий полюс, который при больших исходных напряжениях на транзисторах находится за пределами единичного усиления и не влияет на АЧХ, смещается в относительно низкочастотную область. Возникает дополнительная задержка фазы сигнала, и развивается паразитная генерация. При этом пара Q11, Q13 представляет собой усилитель со 100% обратной связью, которая формирует полюс на более низкой частоте. Видимо, поэтому реакция усилителя с ООС на положительной полуволне более выражена.

Выходов просматривается три: 1) – скорректировать АЧХ всего усилителя так, чтобы третий полюс гарантированно ушел под линию единичного усиления. При этом, естественно, ухудшится динамика и сузится полоса пропускания. На всякий случай проверяю: увеличиваю C5 до 6000 пФ, снизу волос пропадает, сверху остаётся. Дальнейшее увеличение имхо нецелесообразно. Во всяком случае, пока. 2) – скомпенсировать третий полюс введением коррекции «вперед». Обычно для таких целей используются схемы обхода низкочастотных узлов более высокочастотными цепями. В нашем случае это, вероятно, можно сделать, но я как-то не очень понимаю, как. Да и схема может сильно раздуться. 3) – использовать более адекватные транзисторы. Установить с большей рабочей частотой и минимальными емкостями переходов. Выходные транзисторы у нас и так уже высокочастотные (правда, емкость эмиттерного перехода у них порядка 2000 пФ, что не очень радует), да еще из-за особенностей моей конструкции их сложнее снимать, поэтому легче начать с драйверов. Вот тут сразу обозначилась проблема. Германия с нужными параметрами, особенно структуры n-p-n, просто нет. Чисто для проверки идеи рискну поставить кремний. Начнем с наиболее чувствительной точки: Q11. Напрашивается, конечно, старый добрый КТ315, на худой конец, КТ3102. К своему удивлению, в шаговой доступности ни того, ни другого отыскать не сумел, зато легко нашлась старая мамашка, на которой в изобилии имелись 2N3904. Оказалось, их параметры идеально подходят для наших целей.

Исключительно в целях отработки идеи устанавливаем 2N3904 (с измеренным $\beta=187$) в позицию Q11... и имеем два результата, хороший и плохой. Хороший: гипотеза о негативном влиянии недостаточных параметров предвыходных транзисторов блестяще подтвердилась, волос на положительной полуволне начисто пропал. Плохой: заявленный и разрекламированный

германевый проект рухнул под натиском кремния. Стало понятно, что без использования кремния довести усилитель до приемлемых характеристик не получится.

Рыдаю и, биясь головой о стену и утешая себя мыслью о том, что это всего лишь две штуки из четырнадцати, в позицию Q12 устанавливаю найденный на той же мамашке 2N3906 ($\beta=235$). Нижний волос тоже пропадает.

3. Теперь необходимо подстроить усилитель по постоянке. Опять устанавливаю ток покоя 60 мА. Подаю на вход усилителя синус такой амплитуды, чтобы хорошо просматривались ограничения на положительной и отрицательной полуволнах. Выставляю одинаковое ограничение сверху и снизу. Размах пик-пик неискаженной составил 12 В, что соответствует максимальной мощности 4,5 Вт.

4. Теперь займемся устойчивостью. Ее можно оценить либо по АЧХ, либо по переходной характеристике. Имхо по переходной в данном случае не только проще, но и нагляднее, поэтому на вход подключаем генератор импульсов и смотрим на выходе отклик на перепад напряжения.

Здесь необходимо придерживаться следующих правил.

Сейчас мы измеряем **линейную** характеристику усилителя, поэтому для того, чтобы не перегружать входной каскад, на вход подается сигнал размахом не более 50 мВ. Довольно комфортно смотреть по осциллографу амплитуду где-нить в 500-600 мВ, по входу это будет от 25 мВ. Точно так же в случае снятия АЧХ входной сигнал не должен перегружаться большим сигналом, размах синуса не должен превышать 100 мВ.

От предыдущего опыта корректирующая емкость у нас осталась 1100 пФ.

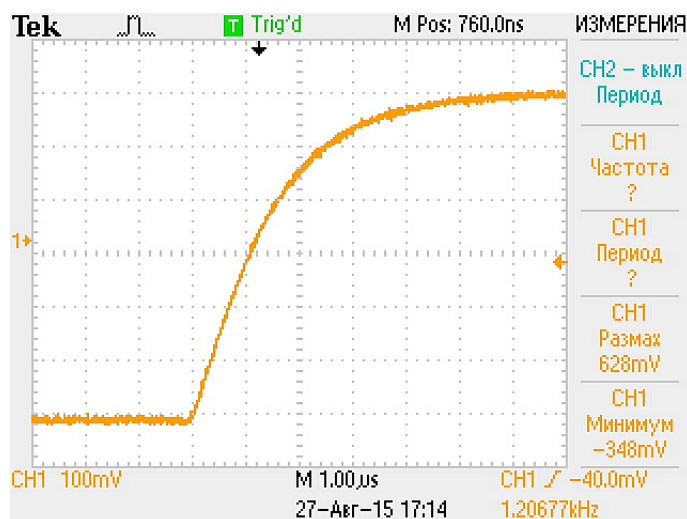


Рисунок 6. Переходная характеристика.

Видно, что сверху фронт сигнала сильно завален. Это означает, что АЧХ усилителя формируется одним полюсом. Вклад остальных полюсов совершенно незначителен и не влияет на вид переходной характеристики. Однако такая характеристика ухудшает динамику усилителя и ограничивает полосу пропускания. О скорости нарастания выходного сигнала говорить пока рано, отмечу лишь, что время установления составляет около 6 мкс.

На всякий случай, для себя, снимаю АЧХ. Делаю это с целью фиксации изменений параметров в процессе настройки усилителя. По выходу устанавливаю размах пик-пик синуса в 600 мВ, граничные частоты фиксирую по падению напряжения до уровня 0,7. Получаю:

$$F_{\min}=16 \text{ Гц} \quad F_{\max}=114 \text{ кГц}$$

Теперь можно уменьшить емкость конденсатора. Делаем это радикально - до 120 пФ.

Сразу меряем частоты:

$$F_{\min}=16 \text{ Гц} \quad F_{\max}=1,17 \text{ МГц}$$

Синус на такой высокой частоте слегка искажен, но этого и следовало ожидать. Он проходит через несколько каскадов, в том числе низкочастотных. А ООС уже не действует.

Смотрим переходную характеристику.

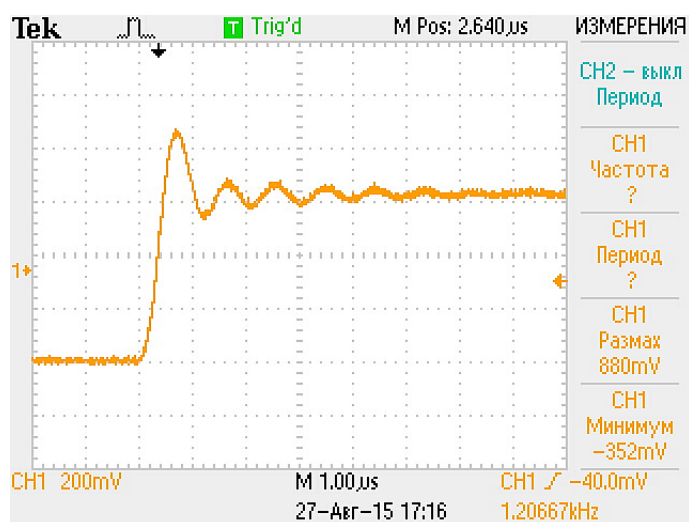


Рисунок 7. Переходная характеристика.

Верхняя часть переходной характеристики выровнялась, завала не наблюдается, но появился хорошо заметный зубец, «выброс». По его величине можно судить об устойчивости усилителя. В данном случае он достаточно мал для того, чтобы усилитель потерял устойчивость, однако при определенных обстоятельствах, например, при повышении температуры, появлении реактивной нагрузки, его влияние может привести к самовозбуждению усилителя.

После того, как выброс начинает уменьшаться, хорошо заметен колебательный процесс с частотой колебаний порядка 1 МГц, амплитуда которого убывает по экспоненте. Это классический вид переходной характеристики, он обусловлен влиянием второго полюса, который по частоте оказался расположен слишком близко к главному полюсу.

¹ Майоров А.. Динамические искажения в транзисторных усилителях НЧ. - «Радио», 1976, № 4. с. 41, 42

² Искусство схемотехники. П. Хоровиц, У. Хилл.

³ Майоров А.. Динамические искажения в транзисторных усилителях НЧ. - «Радио», 1976, № 4. с. 41, 42

⁴ Майоров А. Еще раз о динамических искажениях в транзисторных усилителях. - «Радио», 1977, № 5. с. 45—47.

⁵ Устойчивость усилителя и естественность звучания. Витушкин А., Телеснин В. - Радио, 1980, № 7, с. 36-37.

⁶ Вопросы проектирования усилителей с общей ОС. С. Агеев. Радио №4 2003 год.

⁷ О динамических искажениях в транзисторных усилителях НЧ. П. Зуев. Радио №4, 2003г.

⁸ Усилитель мощности звуковой частоты (УМЗЧ) на операционных усилителях (ОУ) и MOSFET-ax. Sergej Schulz. http://www.samodelka.ru/articles/ampl_schulz1.php

⁹ Журналы «Радио»: № 11 за 1971 г., с. 17-18; № 8 за 1975 г., с. 34-35; № 8 за 1973 г., с. 28-29; № 2 за 1974 г., с. 52-53; № 8 за 1974 г., с. 44-45; № 9 за 1973 г., с. 56-57; № 1 за 1976 г., с. 43-44; № 4 за 1974 г., с. 26-27; № 11 за 1975 г., с. 37-39; № 2 за 1976 г., с. 38-39; № 2 за 1975 г., с. 49; № 3 за 1974 г., с. 46-48; № 2 за 1973 г., с. 49; № 10 за 1975 г., с. 36-38; № 6 за 1974 г., с. 26-28; № 9 за 1973 г., с. 50-51.

¹⁰ «Радио» №6 за 1978 г, с. 45-46

¹¹ <http://kazu.ru/forums/showthread.php?t=64129&page=2>