

ДОММ-22

УСИЛИТЕЛЬ НА ГЕРМАНИИ 40 В 50 Вт

Оглавление

Введение	1
ТЗ. Принципиальная схема.....	1
Размышления по выбору элементной базы.....	2
Измерения	11
Оборудование	11

Введение

А попробуем-ка спроектировать усилитель на германии с максимально возможной выходной мощностью. За базу можно принять данные, полученные при изготовлении макета усилителя ДОММ-19. Он показал вполне приемлемую надёжность, демократичность и сносные параметры.

Проблемы, имеющиеся при работе с германием, - это: 1) – низкая надёжность транзисторов при перегреве, максимальная температура кристалла Ge составляет 85 град Ц, 2) – пожилой возраст, может быть, лет до пятидесяти, транзисторов и диодов, что не гарантируют их качественную работу, и даже так: вообще не гарантирует их работу, 3) – отсутствие «хороших» транзисторов структуры п-р-п с высокими допустимыми напряжениями коллектор-эмиттер.

Вот с учётом этих соображений придётся проектировать усилитель с максимальной допустимой мощностью. Для германия.

ТЗ. Принципиальная схема.

1. Основная идея –использование германия.

2. Напряжение питания. Стремимся к максимальной мощности, поэтому мне необходимо заложить в ТЗ максимально возможное напряжение питания. А оно определяется параметрами самых дохлых транзисторов. Исходя из опыта, таковыми у меня будут транзисторы п-р-п, номенклатура которых оставляет желать лучшего. Собсно, выбор у меня невелик: МП37Б, напряжение коллектор-эмиттер составляет всего 30 В, и ГТ404В (Г, Ж, И) с 40В по коллектору. Похоже, максимальное напряжение питания, которое я могу себе позволить, составляет 40 В. Как показывает работа с ДОММ-19, питание используется практически на 100%, поэтому для транзисторов запас по напряжению составит всего 1 В. Т.е., транзистор будет использоваться на всю катушку.

В принципе, имеется достаточно свидетельств того, как германиевые транзисторы устанавливались в усилители при гораздо более высоких напряжениях, но это не наш метод. Если кому захочется экстрима, - пожалуйста, на свой страх и риск.

Напряжение питания усилителя выбираем $E_p=40$ В.

3. Сопротивление нагрузки. Обычно это 4 или 8 Ом. В погоне за максимальной мощностью принимаем нагрузку 4 Ом.

4. Здесь интересно посчитать максимальную мощность в нагрузке: 50 Вт. Нормально.

На этом составление ТЗ можно закончить и перейти к обсуждению схемы.

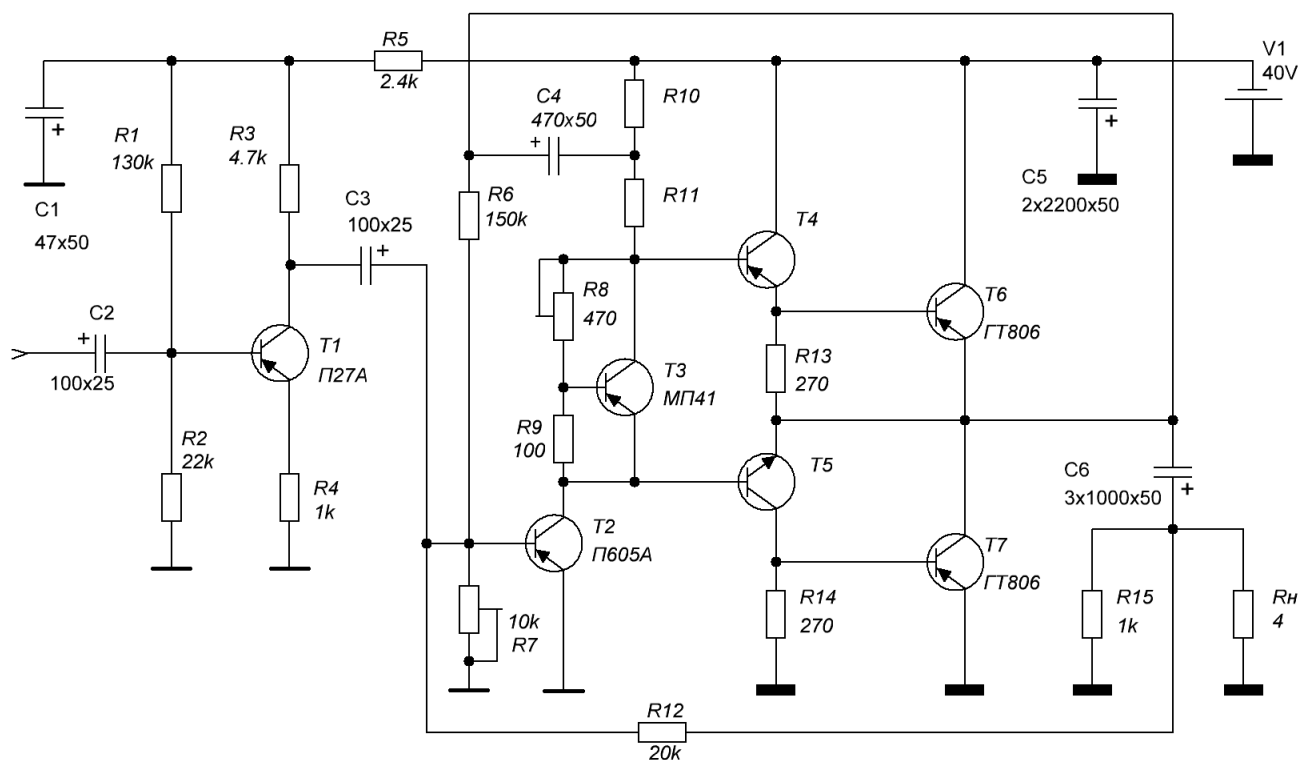


Рисунок 1. Схема усилителя.

Описание особенностей принципиальной схемы усилителя можно посмотреть в отчёте на DOMM-19.

Размышления по выбору элементной базы

Режимы усилителя предполагаются очень серьёзные для германия, поэтому выбору элементной базы необходимо уделить пристальное внимание. Учитывая нежность используемого материала, предварительно необходимо провести все возможные расчёты, чтобы в процессе настройки не нарваться на неожиданный финиш.

Смотрим схему *Рисунок 1*. Как положено, начнём с конца. Но сначала установим некоторые предельные значения. Поскольку собираюсь питание использовать по максимуму, предполагаю, что амплитуда напряжения на нагрузке U_m будет составлять величину, близкую к напряжению питания 40 В. В этих условиях в качестве размаха амплитуды на нагрузке условно принимаю предельное значение $U_m=20$ В. В этом случае размах тока в нагрузке $I_m=5$ А. Таких токов и напряжений реально не будет, но зато в железе буду иметь небольшой запас относительно расчётных показателей. Эти значения буду использовать в дальнейших расчётах.

1. Блок конденсаторов С6.

Через них будет протекать ток 5 А. Если заглянуть в ДШ, увидим, что максимальный ток одного конденсатора ограничен приблизительно 4 А. Для разных типов и изготовителей разных, есть даже такие, у которых не более 3 А.

Чтобы не перегружать одиночный конденсатор, устанавливаю параллельно ему ещё пару, облегчая таким образом режим по максимальному току. Одного дополнительного конденсатора считаю мало, поскольку ток через каждый в этом случае снизится до 2,5 А, что тоже довольно близко к предельному.

2. Блок конденсаторов С5.

Через них будут течь такие же токи. Ставлю пару, надеюсь, что в БП имеются ещё конденсаторы, которые будут компенсировать недостающее.

3. Оконечные транзисторы.

Их назначение – раскатать напряжение на низкоомной нагрузке и обеспечить необходимую амплитуду тока и напряжения.

И здесь выбор невелик: ГТ806 либо ГТ813. Других в наличии у меня нет. У них приблизительно одинаковые предельные параметры, разве что у ГТ813 побольше допустимое напряжение. Посмотрим, насколько вписываются эти транзисторы в заявленные требования. Расчёт ведём для ГТ806. Их предельные параметры:

- максимальная рассеиваемая мощность $P_k=30\text{Вт}$.
- максимальное напряжение $U_{кэ}=75\text{В}$ (для ГТ806А).
- тепловое сопротивление переход-корпус $R_{т\text{п/к}}=2\text{ град/Вт}$.
- максимальная температура перехода $T_{п\text{ max}}=85\text{ град С}$.

Как известно, при работе транзисторов в подобных схемах мощность, выделяемая на коллекторном переходе, зависит от напряжения на коллекторе и величины тока, протекающего через транзистор. Эта мощность меняется в зависимости от выходного напряжения в нагрузке и может быть рассчитана. Её наличие разогревает коллекторный р-п переход, и, если он будет разогреваться сильнее предельно допустимого значения в 85 Цельсиев, то пробьётся из-за перегрева. А если и не пробьётся, то сильно увеличится тепловой неуправляемый ток, переход начнёт «течь», что приведёт к резкому росту искажений, причём негармонических. Кроме того, в течение одного периода колебаний напряжение на коллекторе и ток транзистора также меняются. При этом на переходе выделяется *мгновенная* мощность, которая также мгновенно разогревает переход, после чего он остывает до следующего разогрева.

Поскольку имею дело с предельными нагрузками, температурные показатели придётся рассматривать как можно подробнее.

Для начала – *общий возможный перегрев* перехода транзистора при синусоидальном воздействии и нагрузке 4 Ом. Строим графики, показывающие рассеиваемую мощность на коллекторе транзистора в зависимости от выходного напряжения в течение одного полупериода и соответствующий перегрев перехода.

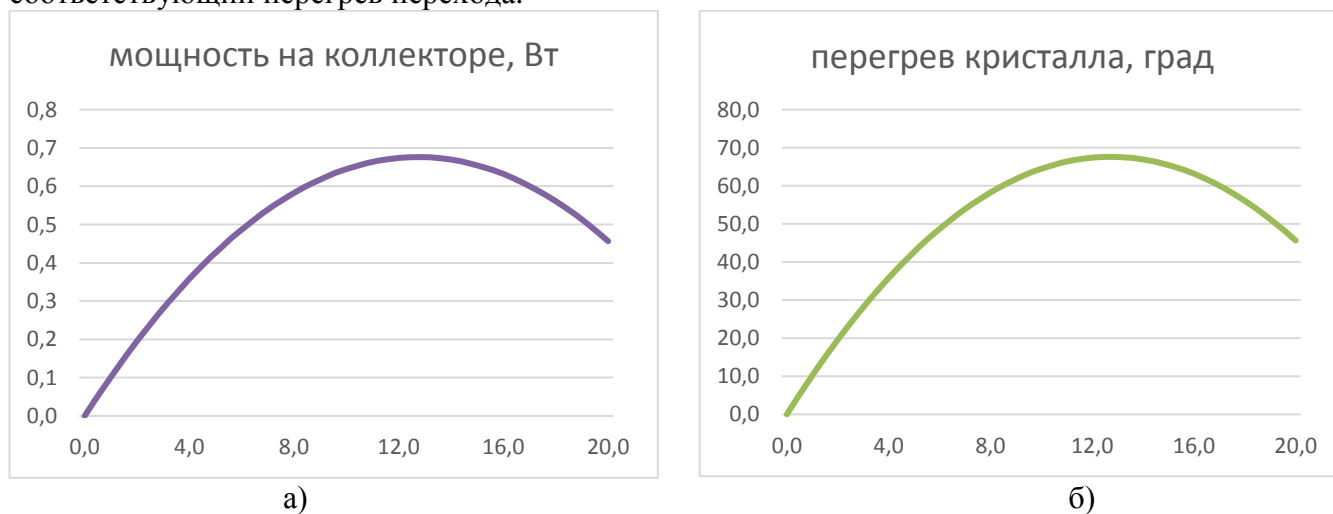


Рисунок 2. а) мощность на переходе транзистора, б) локальный перегрев

Перегрев перехода показан без учёта температуры корпуса. Как видим, максимальная мощность выделяется на коллекторе транзистора при амплитуде синуса на нагрузке около 13 В и составляет 20 Вт. Перегрев перехода при этом составит 41 градус. Если корпус транзистора будет находиться в температуре 25 град (типа, установлен на хороший теплоотвод), то температура перехода будет $41+25=66$ град. Т.е., весьма горячим. Необходимо учесть, что корпус транзистора (даже на теплоотводе) будет нагреваться, и, несмотря на теплоотвод, может достигнуть, скажем, 35 град. В этом случае температура перехода достигнет 76 град, что уже совсем близко к предельным для германия 85 град.

Рассмотрим ещё один важный параметр - *локальный разогрев перехода* в течение периода синусоидального сигнала. Температура среды (корпуса) принята в 25 Цельсиев, поэтому на графике

сразу показана температура перехода. Амплитуда напряжения соответствует максимальному перегреву из предыдущего примера и составляет 12,8 В.

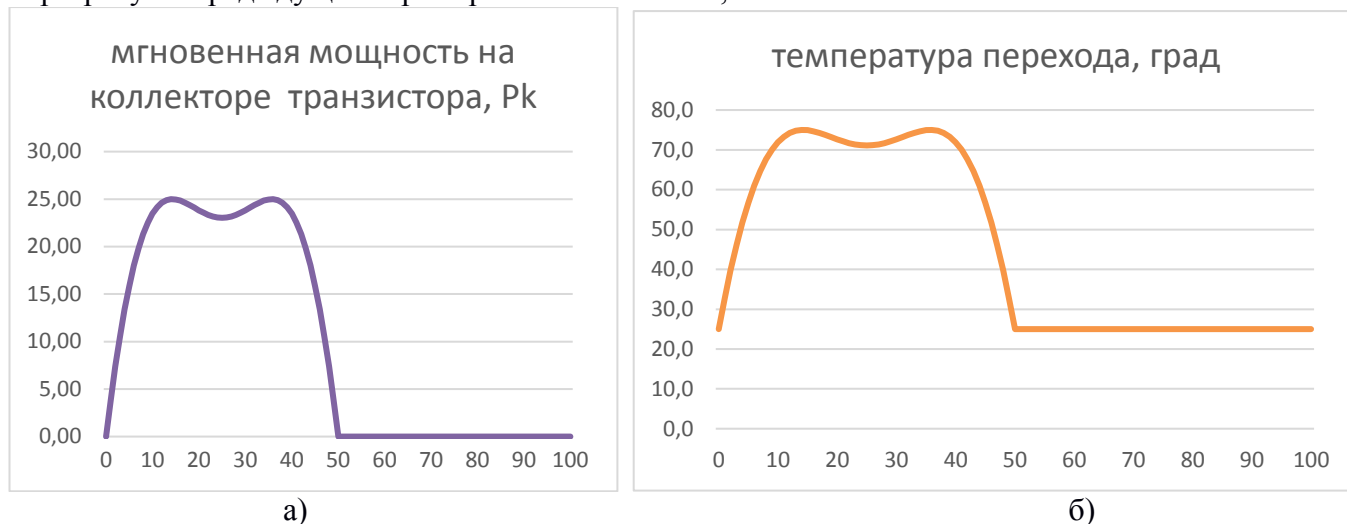


Рисунок 3. а) мощность на переходе транзистора, б) температура перехода кристалла.

По шкале X отложено время воздействия одного периода синуса в относительных единицах. Вторая половина соответствует отрицательной полуволне и относится ко второму транзистору.

Как видим, нагрев перехода транзистора уже при амплитуде напряжения 12,8 В на нагрузке при температуре корпуса 25 град в течение периода будет достигать 75 град два раза. Если корпус транзистора нагреется до 35 град, то кристалл будет разогреваться до 85 град, что для германия является предельным значением.

Здесь же посмотрим ещё вариант локального перегрева: а что будет, если амплитуду начнём увеличивать относительно рассмотренной в предыдущем примере. Например, до 18 В.

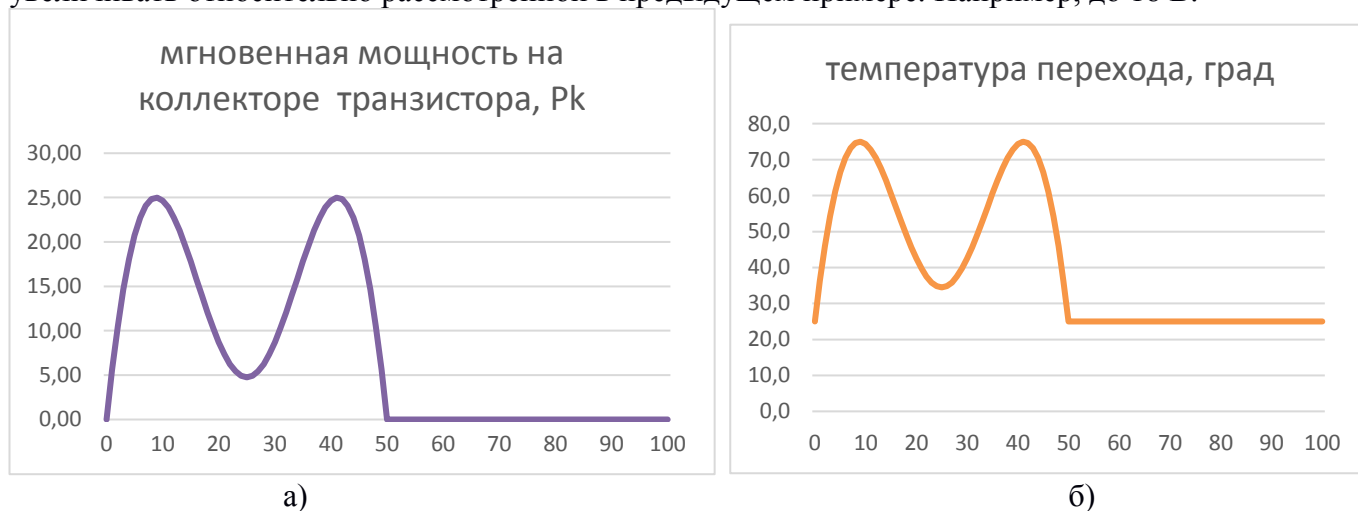


Рисунок 4. а) мощность на переходе транзистора при выходной амплитуде 18В, б) температура перехода кристалла.

Интересно, да? Два пика максимальной мгновенной рассеиваемой мощности начали расходиться по времени в начало и конец полупериода, при этом пик рассеиваемой мощности не увеличивается, а сохраняется на одном и том же уровне! Получается, что перегрев кристалла, и довольно серьёзный, до 75 град, происходит два раза за полпериода, причём с ростом амплитуды время его возникновения плавают относительно начала сигнала. Зависимости перегрева от частоты не наблюдается.

Такое поведение означает появление негармонических составляющих, которые будут вызываться тепловыми токами из-за локального перегрева кристалла. Причём их частоты будут зависеть от амплитуды выходного напряжения.

ВАЖНО: как видим из расчётов, катастрофические напряжения для транзистора наступают не при максимальной амплитуде синуса на нагрузке, а примерно на уровне 0,6 от E_n !

Перегрев перехода при воздействии на него импульсного сигнала. Очень важный расчёт.

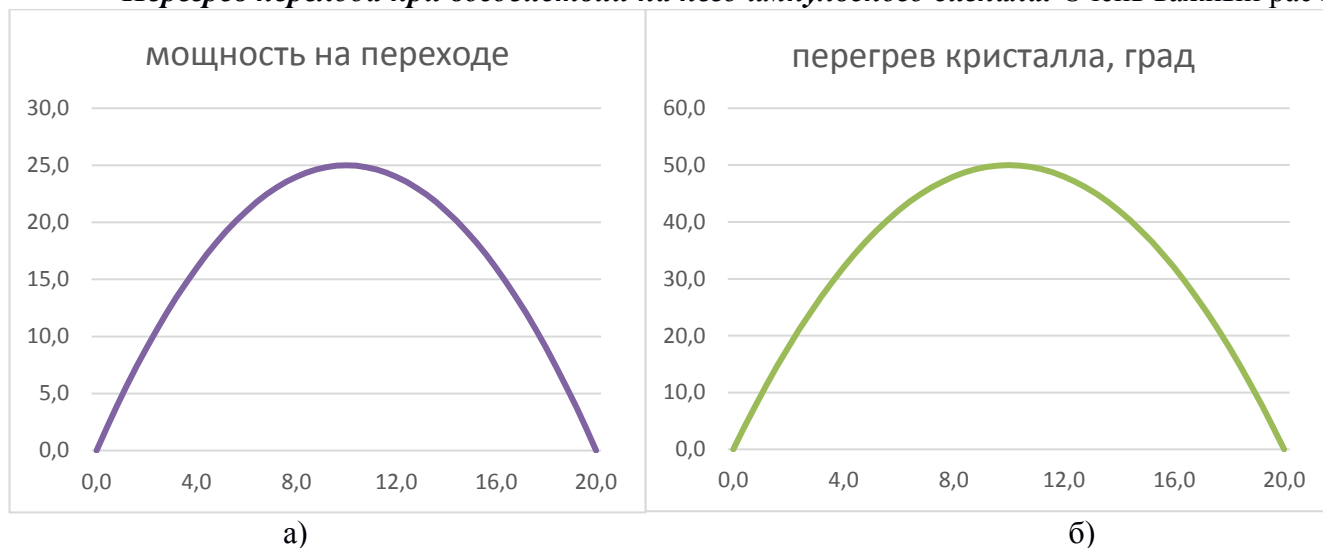


Рисунок 5. а) мощность на переходе транзистора, б) перегрев перехода.

Перегрев опять показан «чистый», т.е., без учёта температуры корпуса и составляет 50 град. Соответственно, при разогреве радиатора до 35 Ц будем иметь локальный предельный перегрев перехода 85 Ц.

ВАЖНО: в этом случае перегрев наступает при амплитуде выходного напряжения на уровне 0,5 от E_n . Поэтому попытка испытать усилитель таким уровнем выходного напряжения может привести к выходу из строя окончательных транзисторов из-за перегрева.

Обсуждение результатов.

А теперь посмотрим, зачем нам были все эти расчёты. При изготовлении макета DOMM-17 были проведены испытания реакции тока транзисторов выходного каскада на температуру.

Условия проведения.

1. Транзисторы необходимо нагреть. Для этого, как мне представляется, имеются два способа: во-первых, можно использовать фен, во-вторых, саморазогрев. В первом случае разогрев происходит очень быстро, поэтому при измерении не совсем понятно, насколько прогрелся кристалл относительно радиатора, неудобно одновременно измерять температуру и нагревать радиатор. Да ещё нужно оба транзистора одновременно греть до одинаковой температуры, что вообще невыполнимо.

Во втором случае на вход подается сигнал такой амплитуды, чтобы выходной сигнал мог прогреть транзистор на радиаторе. Нагрев происходит достаточно медленно, чтобы вовремя отследить необходимую температуру. Плюсом является то, что одновременно прогреваются и предвыходные транзисторы, что даёт более полное представление о процессах, происходящих в выходном каскаде.

Использую второй вариант.

2. Устанавливаю на выходе амплитуду напряжения 14 В и наблюдаю нагрев радиатора. Контроль – дистанционным измерителем температуры. В точках измерения при достижении необходимой температуры (у меня шаг 5 град) отключаю входной сигнал и провожу измерение потребляемого тока. Поскольку нагрев происходит довольно медленно и изнутри, то можно считать, что температура кристалла в этот момент близка к температуре радиатора.

Кстати, прогрев транзисторов сигналом с амплитудой 20 В не совсем удался: радиаторы достаточно быстро прогрелись до 54 град, а затем нагрев практически прекратился. Имхо это подтверждает расчёты выше, конкретно, что максимальный разогрев происходит примерно в середине диапазона амплитуды на выходе.

3. Казалось бы, на этом измерения закончены, но необходимо внести поправки. Целью эксперимента является установление зависимости теплового тока от температуры перехода. Но температура перехода в точке измерения на самом деле определяется суммарным воздействием: температурой радиатора и саморазогревом кристалла. Если через транзистор в момент измерения течёт ток, а он таки течёт, то переход дополнительно разогревается, и его температура будет выше температуры радиатора, так что её необходимо скорректировать путём пересчёта согласно параметрам транзистора: вычислить рассеиваемую мощность и умножить её на тепловое сопротивление переход-корпус.

4. При измерении я выставил начальный ток потребления усилителя 80 мА. Сюда входит и ток, небольшой, предварительных каскадов. Чтобы определить температурную дельту, необходимо отнять это значение от фактического измерения.

5. Таблица

измерения		расчётные значения			
температура радиатора T_c , град	ток I , мА	мощность на коллекторе P_k , Вт	перегрев перехода T , град	температура перехода T_p , град	тепловой ток, мА
25	80	1,0	1,9	27	0
30	100	1,2	2,4	32	20
35	130	1,6	3,1	38	50
40	130	1,6	3,1	43	50
45	180	2,2	4,3	49	100
50	250	3,0	6,0	56	170
55	330	4,0	7,9	63	250
60	440	5,3	10,6	71	360
65	600	7,2	14,4	79	520
70	810	9,7	19,4	89	730
75	1300	15,6	31,2	106	1220

Таблица 1. Данные по тепловому току выходных транзисторов

Как видим, при температуре больше 70 град мощность на коллекторе и соответствующая ей температура достигает предельных величин. Начинается неконтролируемый разогрев кристалла и неконтролируемый скачкообразный рост тока. Как видно из таблицы, температура перехода в этот момент достигает 89 град, что является пределом для германия.

Значение при температуре 75 град – это на самом деле установленный заранее предел ограничения тока на блоке питания. Т.е., тепловой ток увеличивается лавинообразно,



Рисунок 6. Увеличение тока выходных транзисторов в зависимости от температуры

Ну ладно, всё это хорошо, но теперь нужна интерпретация касательно параметров рассчитываемого усилителя?

Мы рассмотрели три варианта разогрева перехода выходным сигналом. Один из них – средняя рассеиваемая мощность в зависимости от выходного синусоидального сигнала. В данном случае реакции кроме как разогрева перехода с течением времени, который будет компенсирован тепловой ОС, не просматривается. Вариант разогрева импульсным сигналом, хотя и жёсткий по воздействию, относительно сложен для анализа, поэтому обсуждать не буду. А вот о локальных перегревах в течение действия одного периода синусоидального сигнала можно поговорить.

Что мы имеем? Расчёт показал, что в течение периода температура перехода может иметь два пика перегрева: нагреваться до 75 град. Подобный нагрев происходит независимо от наличия радиаторов и их температуры, и не отрабатывается тепловой обратной связью. Смотрим на график, видим, что тепловой ток при таком нагреве составит около 450 мА. Это означает, что в момент времени, соответствующий этому пику, на нагрузке будет одновременно присутствовать напряжение (мощность) полезного сигнала и дополнительного, которое определяется током, возникающим из-за нагрева перехода. То есть, к выходному напряжению чистого сигнала добавляется паразитная составляющая напряжения теплового тока. Налицо тепловые искажения. И, поскольку они возникают в случайный момент времени в течение периода, смею думать, что эти искажения не являются гармоническими.

Оценю размер ущерба. При выходном напряжении 12,8 В ток в нагрузке будет равен $12,8/4=3,2$ А. Тепловой ток – 0,45 А. Запас по ООС у нас составляет 40 дБ, поэтому тепловой ток будет скомпенсирован петлёй ООС до $0,45/100=4,5$ мА. К-т искажений равен $4,5\text{мА}/3,2\text{А}=0,14\%$. Неплохо, да? В анонсе усилителя я заявляю, что КНИ будет менее 0,1 %, а только тепловые искажения дадут в полтора раза больше, причём негармонических.

Разумеется, в основном мы имеем дело с расчётными значениями, хотя и основанными на экспериментальных данных. Вполне возможно, что в реальности всё будет гораздо лучше, но может быть и гораздо хуже. Но знать, что ты будешь иметь в конечном итоге, просто необходимо.

Пойдём дальше. А давайте-ка уменьшим амплитуду напряжения на выходе и посмотрим, что произойдёт с тепловыми искажениями. Зададим напряжение на выходе усилителя в 3 В. Амплитуда тока полезного сигнала при этом будет 0,75 А, выходная мощность 1,1 Вт, мгновенная рассеиваемая мощность – 13 Вт, температура радиатора 25 град.



Рисунок 7. Температура перехода при амплитуде выходного напряжения 3 В

Как видим, максимум нагрева перехода будет один в течение полупериода и составит 50 град. Ищем в таблице, какой при этом будет тепловой ток: 100 мА. Считаем к-т искажений: тепловой ток после ООС $100/100=1$ мА, искажения $1\text{мА}/0,75\text{А}=0,13\%$. Удивительно! А искажения не изменились. Получается, что и при больших сигналах, и при не очень уровне тепловых искажений практически не меняется. Такой эффект можно объяснить наличием слишком большого

питающего напряжения при прослушивании сигналов с малыми амплитудами. Излишнее напряжение вызывает повышение рассеиваемой мощности и слишком сильный прогрев переходов, что приводит к увеличению тепловых токов.

Теория предсказала наличие проблем при изготовлении мощного германиевого усилителя. Что можно сделать? Напрашиваются стандартные решения

1. Поставить на выходе по два транзистора в параллель. Плохо. В этом случае переход будет перегреваться в два раза меньше, но из-за подставки температуры радиатора его мгновенная температура будет выше половины исходной. Тепловой ток при этом будет соответствовать не половине температуры, а больше, то есть, и ток будет больше. А вот сам тепловой ток будет состоять из тепловых токов двух транзисторов и его надо будет суммировать. Таким образом, установка двух транзисторов даст увеличение тепловых искажений.

2. Увеличение к-та усиления усилителя без ООС, например, введением на входе дифференциального каскада. В этом случае за счёт увеличения глубины ООС можно дополнительно компенсировать большие искажения на выходе. Тоже не проходит. Как мы видели в ДОММ-17, второй полюс расположен в районе 1,5МГц. При увеличении усиления, например, до 90 дБ, придётся ввести такую коррекцию, чтобы установить первый полюс на частоту примерно 150 Гц. В этом случае тот же запас по усилению в 40 дБ будет на частоте около 5 кГц, что не является решением проблемы.

3. Можно установить на радиаторы предвыходные драйверы, тем самым хотя бы предотвратить их саморазогрев и уменьшить связанный с ними тепловой ток.

Как-то больше ничего в голову не приходит.

4. Предоконечные драйверы Т4,Т5.

В данном случае на роль драйверов могут претендовать транзисторы, имеющие большое допустимое напряжение. Таких мало: из маломощных МП40А, ГТ321, более мощных - ГТ402, ГТ404, П605, 1Т905. Барахло типа МП25 не рассматривается.

Поскольку эти транзисторы также работают в предельных режимах, необходимо удостовериться в корректности их использования. Подобно выходным транзисторам хотелось бы провести температурный анализ. Строю такие же графики. Поскольку напряжения на предвыходных драйверах более сложные, примем несколько несущественных упрощений.

Условия построения: для ГТ806А β может меняться от 10 до 100. Принимаю $\beta = 30$, температура среды $T_{ср} = 25$ Ц.

Сначала проверка на максимальный ток. Если ток выходных транзисторов составляет 5 А, то при $\beta = 30$ ток базы будет 167 мА. Всё. МП40А применять нельзя, поскольку его максимальный ток равен 150 мА. Расчёт на тепловые параметры вести бессмысленно.

Смотрим на ГТ40х. Для них R_t п-с=100 град/Вт, но этот параметр означает тепловое сопротивление переход-среда. То есть, в случае необходимости его можно будет уменьшить путем привинчивания радиатора. Имеет смысл провести расчёт.

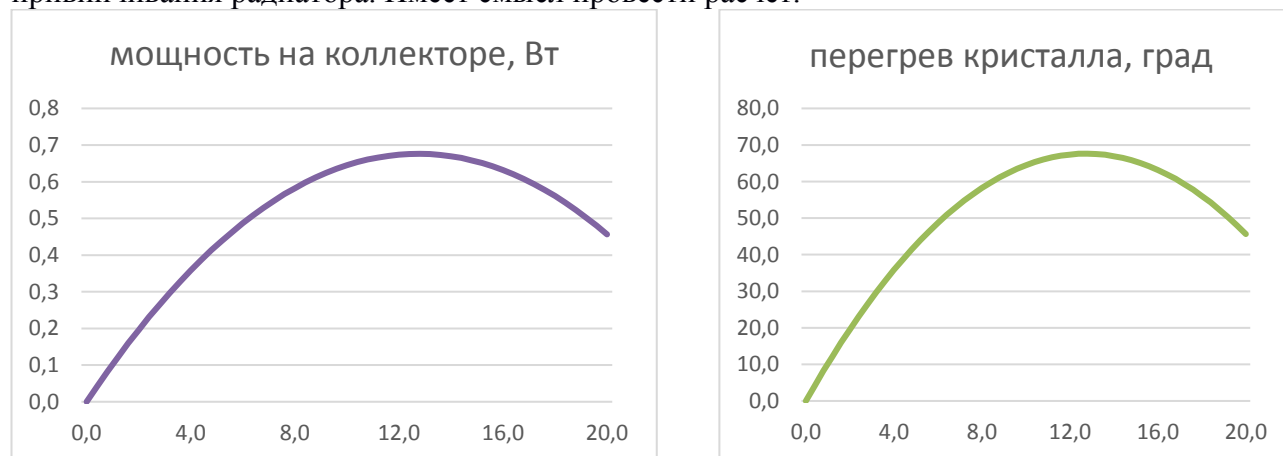


Рисунок 8. Мощность на коллекторе предвыходных транзисторов от амплитуды выходного напряжения

Оба-на. Получили: максимальная мощность на переходе за полпериода может достигать 0,7 Вт, а перегрев кристалла - 68 град. При этом максимальная температура будет $68+25=93$ град. Ни фига себе! Это при нормальной температуре!

В принципе, дальше можно не считать: превышена максимальная допустимая рассеиваемая мощность. К тому же, если учесть, что, во-первых, β мощных транзисторов на предельных токах может резко уменьшаться, во-вторых, корпуса ГТ40х будут разогреваться, а если костылить им теплоотводы, то, с одной стороны, очень уж неудобно они сделаны, с другой – непонятно, насколько это поможет, потому как мощность уже превышена.

Таким образом, получили дополнительное ограничение на транзисторы в предвыходных драйверах. В позиции Т4 остаётся применить П605А либо 1Т905А, а вот в Т5 ставить нечего. Придётся вносить изменения:

1. В концепцию. Плюнуть на германевый проект и в Т5 установить П701А. Это не германий, хотя и довольно близок к концепции – такое же старьё. Он идеально вписывается в схему и имхо только улучшит параметры усилителя.

2. Изменить принципиальную схему усилителя. Самым простым представляется добавить каскад повторителя напряжения перед драйверами. В этом случае транзисторы повторителя разгрузятся по току, и будет возможно применение ГТ40х и даже ГТ321, а в предвыходном каскаде можно установить пару П605.

Считать не буду, потому как кажется, что подводных камней нет.

5. Каскад УН на Т2.

Как ни странно, здесь тоже придётся посчитать, чтобы ненароком не попасть в запрещённый режим. Основные требования: транзистор должен быть высокочастотным и выдерживать 40 В коллекторного напряжения.

Просятся П605, 1Т905А и ГТ321. Преимущество ГТ321 в том, что у него меньшая паразитная ёмкость коллектора, 80 пФ против 150 пФ у П605 или 250 пФ у 1Т905А, что позволит обеспечить более широкую полосу пропускания усилителя.

Нам необходимо определить границы применимости транзисторов в каскаде УН и заодно рассчитать режимные сопротивления R10, R11.

Обычно ставлю резисторы R10, R11 в соотношении от 1:2 до 1:3. Ток транзистора приму равным 5 мА. Тогда R10=1 кОм, R11=3 кОм. Ну и достаточно.

Необходимо отметить ещё один момент. Мы использовали данные по параметрам транзисторов выходного каскада, исходя из предположений о довольно посредственных их характеристиках. Однако в реальности нам могут попасться и вполне себе приличные экземпляры. Так, для П605 и также для ГТ806 β вполне может быть около 100. В этом случае ток базы предвыходных драйверов резко уменьшается, и тогда их планируемый ток примет на себя коллектор Т2. В этом случае возможен сильный перегрев этого транзистора, что особенно важно для маломощного ГТ321, вплоть до выхода его из строя. Для интереса посчитаем предельный максимум: ток 5 мА, напряжение 40 В, выделяемая мощность - 200 мВт, нагрев кристалла - 50 град. На пределе параметров транзистора. Конечно, такого режима в реальности не будет, поэтому установку его в позицию Т2 можно принять с некоторыми ограничениями.

Вывод. Возможно использование всех типов транзисторов, однако с ГТ321 требуется особая аккуратность, чтобы нечаянно не перегреть транзистор. Возможно, придётся установить небольшой радиатор.

6. Входной транзистор Т1.

К нему не предъявляется никаких особых требований. Чтобы исключить влияние первого транзистора на остальные параметры усилителя ставлю П27А. Его свойства нормируются при коллекторном токе 5 мА и напряжении 5 В.

Ну и в заключение. Результаты расчёта радуют не очень, перспектива изготовления чего-либо качественного представляется весьма маловероятной. Тем не менее, отрицательный результат – тоже результат. Усилитель делать всё равно будем, как запланировано, по крайней мере, будут понятны границы применимости германия в усилителях. С учётом проведённых расчётов необходимо учесть следующие моменты.

1. Транзисторы ГТ806 проходят, что называется, «на бровях», и фактически не вписываются в требуемые характеристики. Основные претензии – большая зависимость тока коллектора от температуры, что может привести к повышенным нелинейным искажениям. Для устранения локальных перегревов представляется необходимым разгрузить их по току, например, установкой дополнительных транзисторов в параллель. Однако такое решение, с одной стороны, влечёт увеличение габаритов и усложнение конструкции, с другой, может не дать желаемого результата, поскольку как следует из тех же расчётов, дефект полностью не устраняет.

Тем не менее, принимаю их годность условно, с тем, чтобы при настройке провести исследование на тепловые токи и НИ. При испытаниях во избежание выхода из строя транзисторов придётся избегать критических амплитуд: на синусе – не раскачивать амплитуду на нагрузке в диапазоне 9-15 В, на импульсе – 8-12 В. Меньше или больше можно. И обязательно внимательно следить за температурой радиаторов.

Решение: Ставлю ГТ806А по одному в каждом плече, с возможностью установки дополнительных транзисторов в параллель.

2. Предвыходные транзисторы также будут работать с повышенным перегревом. Влиять на температурную нагрузку я не могу, но, чтобы хоть как-то уменьшить температуру корпуса, придётся установить их на радиаторы.

Решение: Ставлю П605А на радиаторах.

3. В позиции Т5 желательно иметь малую паразитную ёмкость. Кроме ГТ404Ж у меня других в наличии просто нет. В Т4 напрашивается ГТ321, поменьше паразитные ёмкости, да и, опять же, отсутствие необходимых р-п-р транзисторов.

Решение: Ставлю ГТ321В и ГТ404Ж.

4. В позиции Т2 лучше иметь большой β и малую паразитную ёмкость коллектора. Лучше потом добавлю коррекцию при настройке, по крайней мере будет понятно, что происходит. Кроме того, необходимо учитывать относительно высокую рассеиваемую мощность транзистора в этой позиции. Здесь опять хочется поставить ГТ321, но с учётом требований по мощности. Потом можно будет поставить и П605А для проверки.

Решение: Ставлю ГТ321В, но предусматриваю небольшой радиатор для охлаждения корпуса.

Принципиальная схема примет вид

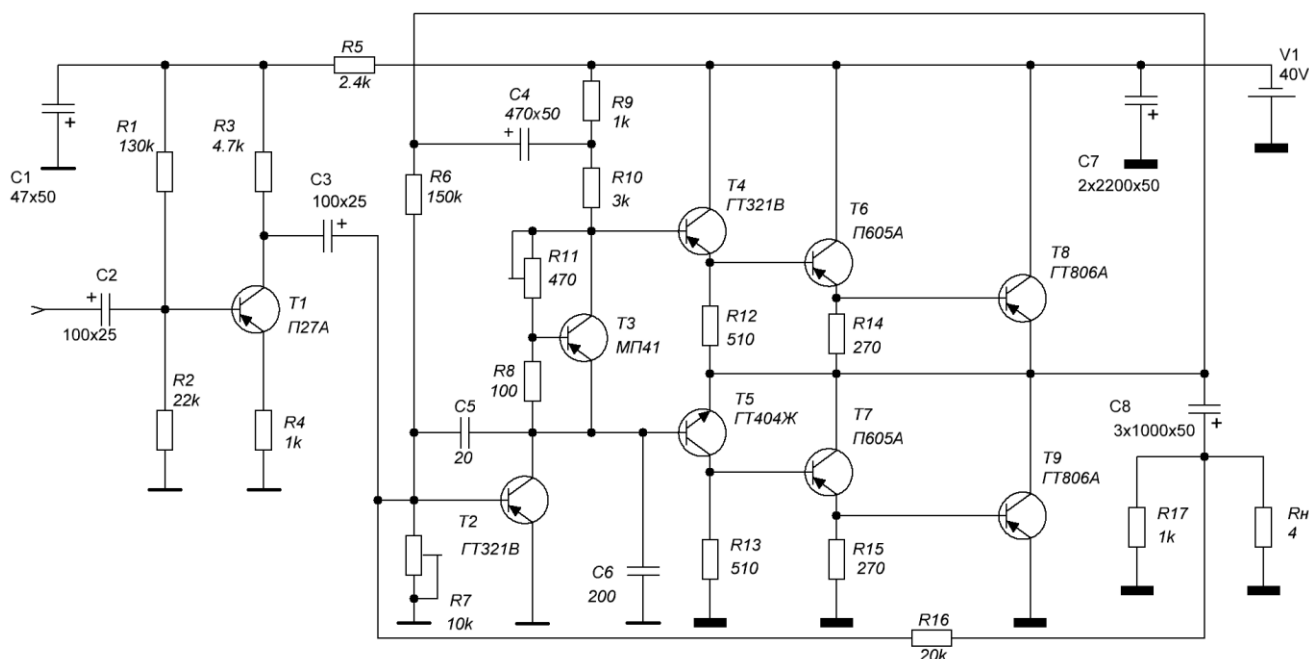


Рисунок 9. Принципиальная схема усилителя после коррекции

Измерения

Необходимо определиться с объективными критериями оценки усилителя, т.е., куда будем посмотреть и что увидим. 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 частоте 1 кГц.

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. Характеристика нелинейная, проявляется при перегрузке одного из каскадов усилителя, обычно первого. Усилитель попадает в этот режим, если на вход подать сигнал такого уровня, который сильно превышает напряжение линейной работы транзистора. Из-за инерционности каскадов усилителя напряжение ООС приходит с некоторым запаздыванием, поэтому сигнал на выходе растет неконтролируемо, со скоростью, определяемой скоростью заряда некоего конденсатора, находящегося внутри схемы. В нашем случае на эту роль претендует корректирующий конденсатор. Как только петля ООС замыкается, нарастание импульсного сигнала на выходе с максимальной скоростью прекращается, и скорость нарастания определяется уже экспонентой с параметрами, заданными линейными характеристиками усилителя.

Усилитель необходимо загнать в нелинейный режим. Для этого подаю импульсный сигнал такой амплитуды, который заведомо перегрузит входной транзистор усилителя. В нашем случае амплитуда по выходу ожидается в 40 В пик-пик, поэтому размах входного сигнала должен быть порядка 0,7 В.

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, я не собираюсь

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 40 В. Учитывая чувствительность германевого материала по отношению к температуре, БП должен обладать свойством ограничения тока на уровне примерно 3 А.