

При изготовлении макета DOMM-17 были проведены испытания транзисторов выходного каскада на температурную зависимость.

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.

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 на самом деле определяется суммарным воздействием: температурой радиатора и саморазогревом кристалла. Если через транзистор в момент измерения течёт ток, а он 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 80 мА. Чтобы определить температурную дельту, необходимо отнять это значение от фактического измерения.

5. Таблица

измерения		расчётные значения			
температура радиатора Тс, град	ток I, мА	мощность на коллекторе Рк, Вт	перегрев перехода Т, град	температура перехода Тп, 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 серьёзных 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 развивается лавинообразно,



Рисунок 1. Увеличение тока выходных транзисторов в зависимости от температуры

Ну ладно, всё это хорошо, но как теперь будем интерпретировать касательно параметров 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, но 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 переход может нагреваться до 75 град. Смотрим на график, видим, что тепловой ток при этом составит около 450 мА. Это означает, что в данный момент времени на нагрузке будет присутствовать напряжение (мощность), которое определяется только температурой перехода. То есть, к выходному напряжению чистого сигнала добавляется паразитная составляющая теплового тока. Налицо тепловые искажения. И, поскольку 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? Я заявляю, что КНИ будет менее 0,1 %, а только тепловые искажения дадут в полтора раза больше, причём негармонических.

Разумеется, 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.

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

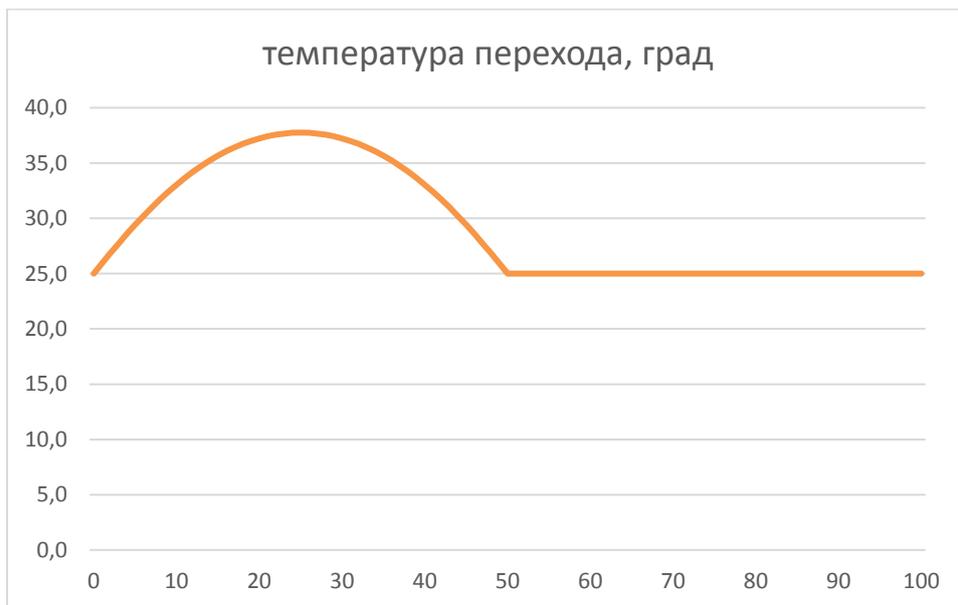


Рисунок 2. Температура перехода при амплитуде выходного напряжения 3 В

Как видим, максимум 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 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 DOMM-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.