

УСИЛИТЕЛЬ ГУМЕЛИ. 3 ДЕФЕКТА

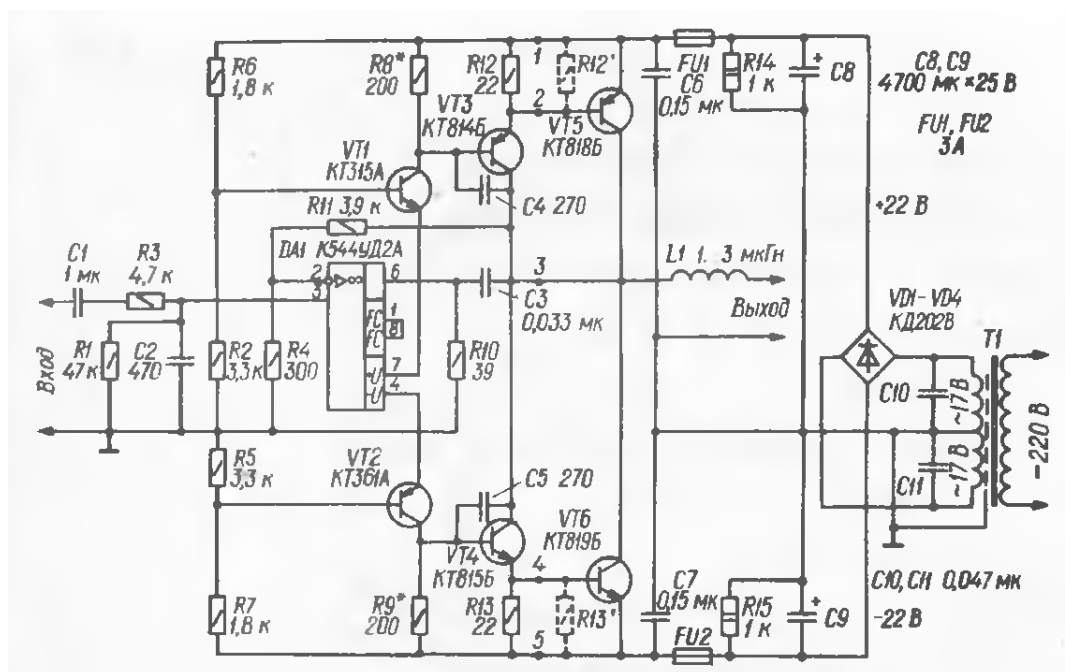


Рис. 1 Схема усилителя.

Насколько я понимаю, схему спроектирована на базе небезызвестного усилителя г-на Шмидта, который г-н Гумеля ранее перенёс на отечественную элементную базу. Правда, с точки зрения схемотехники и внутреннего содержания из-за допущенной неточности или сознательно у него получился несколько другой усилитель, но это тема другой публикации. Усилитель получил потом наименование Стоунколд, отличался крайней неустойчивостью и склонностью к выжиганию выходных транзисторов.

То есть, в Стоунколд уже изначально заложена пара дефектов, сумевших совместно отправить на свалку не одну тысячу мощных транзисторов. Вернее, дефект заложен один – это коррекция усилителя конденсатором СЗ, просто он проявляется с двух сторон, которые помогают друг другу, способствуя более уверенному устранению мешающих радиоэлементов.

Схема рассматриваемого усилителя внешне очень похожа на усилитель Шмидта, только исключён корректирующий НН мост, выходные транзисторы переведены в режим усиления, за счёт чего снижен к-т усиления без ООС, что позволило слегка повысить устойчивость, однако дефект в виде коррекции с помощью СЗ, заложенный там, перекечевал и сюда. Ну, и ещё один дефект г-н Гумеля, стараясь улучшить параметры усилителя, добавил от себя лично. Речь идёт о конденсаторах С4, С5.

Цитата: «Простота усилителя только кажущаяся. Не следует забывать, что в составе как ОУ DA1, так и УМЗЧ в целом применены транзисторы с максимальными частотами генерации 100...300 МГц, причем в выходных каскадах — со значительными емкостями переходов, которые способны привести к самовозбуждению даже при кажущемся отсутствии цепей обратной связи и нагрузок достаточной величины. Незначительная индуктивность провода цепи эмиттера, параллельное расположение на значительной длине проводов цепей базы и коллектора могут стать причиной самовозбуждения на высоких частотах, что крайне опасно для транзисторов оконечного и предоконечного каскадов. (Впрочем, это справедливо не только для описываемого устройства, но и для УМЗЧ, собранного по любой другой схеме.)

Кстати, не следует пользоваться известным из старой радиолубительской практики способом проверки УМЗЧ прикосновением пальца к его входной цепи. Это может привести к такому уровню высокочастотных наводок, что выходные транзисторы выйдут из строя.»

Что касается ВЧ параметров транзисторов, так это ни о чём. И про уровень наводок тоже. Но из такого, таки авторского, описания напрашивается вывод, что основные претензии к этому усилителю — повышенная неустойчивость, которая может проявиться даже при незначительном влиянии паразитных элементов и связей, и возможность выхода из строя транзисторов. Как следует из отзывов собиравших

его специалистов неустойчивость проявляется в перегреве транзисторов, сгорании их же, ну и, в общем, некоторыми странностями в работе. Неустойчивость в данном случае совершенно не означает, что усилитель обязательно загенерит при включении. Совершенно нет, что подтверждают те же многочисленные поклонники данного устройства, изготовившие его. Однако надо понимать, что, приступая к его изготовлению, в конечном итоге рискуем получить большой бадабум, взявшийся, казалось бы, абсолютно ниоткуда.

Как ни странно, происходящие в нём процессы довольно просто объяснимы. Единственное, остаётся непонятным, почему до сих пор не появилось публикаций на эту тему с анализом происходящих процессов и объяснением дефектов, присущих данной схеме. По крайней мере, мне не удалось найти таковые.

А теперь конкретно про дефекты, которые заложены в схему этого усилителя.

Дефект первый– повышенная неустойчивость схемы.

Описание этого дефекта довольно затруднительно провести на пальцах. Скорее всего, с налёту понять, что там происходит, будет ещё сложнее. Поэтому заявляю сразу, что дефект вызывается неудачной коррекцией усилителя с помощью конденсатора С3. В этом случае образуется критическая точка АЧХ на частоте 124 кГц. В этой точке мы имеем следующее сочетание событий:

1. Ниже этой точки АЧХ усилителя без ООС имеет наклон 40 дБ/дек.
2. Выше этой точки АЧХ усилителя без ООС имеет наклон 20 дБ/дек.
3. К-т усиления усилителя без ООС составляет 30 дБ.
4. К-т усиления усилителя с ООС составляет 23 дБ.

На что влияют эти события? Можно сделать вывод, что при выборе к-та усиления усилителя с ООС больше, чем 23 дБ, мы попадаем в зону с наклоном АЧХ в 40 дБ/дек, что практически гарантирует работу усилителя в режиме автогенерации. Усилитель имеет запас по усилению в 7 дБ, который достаточен для устранения влияния полюса в точке 124 кГц, и если мы удачно попадём в это значение, то проблема с устойчивостью будет решена. Неувязка в том, что к-т усиления усилителя с ООС нам задан, ну или мы его задаём сами, а к-т усиления усилителя без ООС может сильно отличаться от рассчитанного 30 дБ в зависимости от сочетания параметров применённых радиоэлементов. Это уж как повезёт. Он может быть и меньше, и тогда запас по усилению будет снижен, что повлечёт за собой переход усилителя в неустойчивый режим.

Попытка «настройки» усилителя с помощью подбора ОУ и транзисторов возможна, но в ограниченных пределах. Предлагается, например, использование более высокочастотного ОУ. Что будем иметь? Применение такого ОУ предполагает, что увеличится к-т усиления усилителя без ООС, т.е., в критической точке к-т усиления будет больше 30 дБ, что положительно скажется на устойчивости. Таки да, похоже. Но только необходимо иметь ввиду, что повышение усиления на высоких частотах приводит к тому, что начинается влияние полюсов, которые возникают из-за ограниченных частотных свойств транзисторов выходного каскада, влияние которых раньше не чувствовалось из-за низкого усиления усилителя на этих частотах. «Ворота» здесь не очень большие, поэтому легко применить слишком «хорошие» комплектующие, что приведёт к такому же поведению усилителя, но с «другой стороны».

А теперь расшифруем то, что сказано выше.

Повышенная неустойчивость вызывается совсем не высокочастотными свойствами элементов. Наоборот, применяя низкочастотные транзисторы гораздо легче попасть в зону возникновения генерации. Чтобы этого не произошло, необходимо предусматривать адекватные элементы коррекции, которые могут серьёзно ухудшить параметры устройства.

Очевидно, в данном усилителе не выполняются необходимые условия обеспечения устойчивости. Согласно теории, самое простое – это нарушение взаимного расположения первого и второго полюсов АЧХ, в результате чего усилитель становится склонным к автогенерации. Сложность настройки и относительно плохая повторяемость свидетельствуют о том, что усилитель находится на грани устойчивости, из-за чего приходится буквально нащупывать точку расположения коррекции. В этом случае сочетание свойств различных элементов, ОУ, транзисторов и т.п., приводит к тому, что усилитель может попасть в точку оптимальной коррекции, а может и нет. В результате кот в мешке: то ли заработает, то ли загудит. Автор не даёт рекомендаций по настройке, поэтому что делать в случае возбуда – не понятно. Мало того, если возбуд получается достаточно жёсткий, а мер для блокировки не принято, то заканчивается он выгоранием выходных транзисторов. Победить такой эффект практически невозможно.

Чтобы разобраться, что происходит в усилителе с точки зрения устойчивости, необходимо выделить из его АЧХ полюса, которые попадают в зону действия системы ООС, и от которых зависит устойчивость усилителя.

В качестве таковых имеем как минимум два действующих полюса: первый – это полюс операционника, данный нам производителем при его изготовлении. В схеме для него задействована внутренняя коррекция ОУ, при этом единичная полоса пропускания нормируется как 4 МГц. При к-те усиления 100 дБ получаем первый полюс на частоте 40 Гц. Частота здесь не принципиальна, важно, что от 40 Гц до 4 МГц мы имеем постоянный наклон АЧХ усилителя, равный 20 дБ/дек, который определяется исключительно ОУ.

Для вычисления второго полюса необходимо рассмотреть схему выходного транзисторного усилителя.

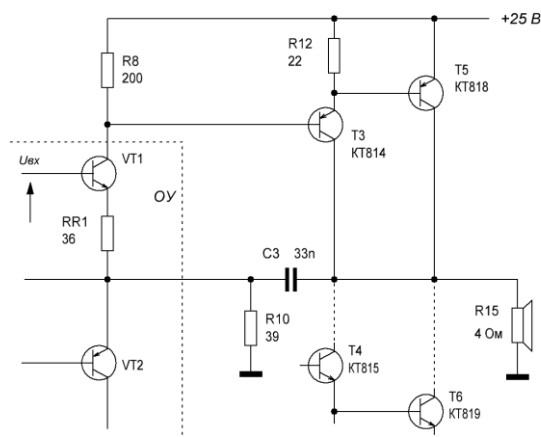


Рис. 2 Схема выходного усилителя.

Схема упрощена и отражает только одно плечо выходного усилителя, но для иллюстрации дефекта этого достаточно. Как видим, для одного плеча, верхнего, усилитель формируется выходным транзистором VT1 ОУ и внешними транзисторами T3, T5. Резисторы RR1 и R10 – это эмиттерные резисторы каскада усиления на VT1. Через конденсатор C3 на эмиттер VT1 введена местная отрицательная обратная связь. Напряжение обратной связи снимается с резистора R10.

К-т усиления этого усилителя без местной ООС составляет примерно 35-40 дБ. Для расчёта примем 40 дБ.

Введение локальной ООС приводит к изменению характеристик выходного усилителя. Понятно, что при увеличении частоты весь выходной сигнал прикладывается к эмиттеру VT1, что означает единичный к-т усиления выходного усилителя. Частоту, где АЧХ принимает единичное значение, можно посчитать:

$$F2 = \frac{1}{2 * \pi * C3 * R10} = \frac{1}{2 * \pi * 33n * 39} = 123,6 \text{ кГц}$$

Начиная с частоты 124 кГц АЧХ выходного усилителя асимптотически стремится к единице. А вот до этой частоты АЧХ будет иметь наклон 20 дБ/дек, причём наклон будет начинаться в точке

$$F1 = F2 * 10^{-\frac{40}{20}} = 124 \text{ кГц} * 10^{-\frac{40}{20}} = 1,24 \text{ кГц}$$

Эту точку можно назвать «нулём» усилителя, поскольку действие этой кривой будет заканчиваться на частоте 124 кГц. Здесь линия ООС проходит ниже к-та усиления.

То есть, АЧХ будет иметь вид: до частоты 1,24 кГц будет постоянный к-т усиления в 40 дБ, потом до частоты 124 кГц наклон АЧХ 20дБ/дек, потом асимптотическое стремление к единице.

Для всего усилителя АЧХ будет иметь следующие характерные точки:

До частоты 40 Гц имеем постоянный к-т усиления 100 дБ+40 дБ=140 дБ

От частоты 40 Гц до 1,24 кГц изменение к-та усиления с 140 дБ до 110 дБ с наклоном 20 дБ/дек.

От частоты 1,24 кГц до 124 кГц изменение к-та усиления с 110 дБ до 30 дБ с наклоном 40 дБ/дек.

С частоты 124 кГц при усилении 30 дБ наклон АЧХ асимптотически приближается к 20 дБ/дек.

Ну и частота единичного усиления составит 3,7 МГц.

Нас интересует участок АЧХ, где наклон характеристики составляет 40 дБ/дек. К-т усиления всего усилителя с ООС ни в коем случае не должен попадать на этот участок (вспомним статьи Майорова в Радио). Если это происходит, то усилитель однозначно переходит в режим неустойчивости. У нас этот участок заканчивается на частоте 124 кГц. К-т усиления усилителя в этой точке, который устанавливает ООС, составит: $3,9\text{к}/300+1=23\text{дБ}$.

Сравним с усилением без ООС в критической точке: 30 дБ. Условие устойчивости фактически выполнено: имеется запас по усилению в 7 дБ. Г-н Гумеля то ли случайно, то ли осознанно попал в эту точку. По крайней мере, к-т усиления усилителя выбран достаточно малым, всего 23 дБ. Гумеля оправдывает его выбором чувствительности, что вполне приемлемо. Тем не менее, наши расчёты достаточно приблизительны, и, при использовании элементов с реальными параметрами, да ещё при изменении условий, в которых используются радиоэлементы, возможны серьёзные отклонения от рассчитанной АЧХ в критической точке.

Можно ещё увеличить СЗ, критическая точка сползёт по АЧХ влево, в область более высокого усиления, но тогда снизится запас по усилению в области звуковых частот, что приведёт к росту НИ.

Дефект второй – «сквозной ток»

Дефект второй. Он возникает из-за наличия той же самой ёмкости СЗ. Механизм его возникновения определяется необходимостью перезаряда ёмкости токами при импульсном напряжении на выходе усилителя. Импульсное напряжение на выходе возникает, если на вход усилитель подать импульсное напряжение с целью тестирования, либо появится паразитная наводка, либо, как говорит сам автор, при «касании одного из входов усилителя пальцем». Если первый вариант ещё может как-то контролироваться, например, уровнем напряжения либо установкой по входу сглаживающих цепей коррекции, уменьшающих крутизну фронтов, то в последних двух на выходе появляется неконтролируемое импульсное напряжение с крутыми фронтами и размахом от минуса до плюса питания.

При появлении такого напряжения конденсатор СЗ начинает перезаряжаться, причём токи перезаряда протекают через ОУ, что, в свою очередь, вызывает паразитные токи в выходных транзисторах. Величина таких токов может быть довольно серьёзной, есть подозрение, ампер до десяти, что вызывает перегрев и тепловой пробой выходных транзисторов.

Внешне это выглядит так, что через ОУ протекает сквозной ток, который отпирает транзисторы выходного каскада. Но на самом деле такая реакция вызвана исключительно пороком схемотехники, конкретно, применением конденсатора СЗ.

Ну а теперь рассмотрим более подробно механизм возникновения этого эффекта.

Для пояснения рисую выходной каскад совместно с кусочком выходного каскада ОУ. Ненужные для объяснения элементы отбрасываю.

Предполагаю, что на вход ОУ подано такое напряжение, что выход усилителя перешёл скачком (ну, может, не скачком, но достаточно быстро) в насыщение по положительной волне, т.е., на выходе стало +25В. При этом транзисторы Т3 и Т5 отпираются, через них течёт пока ещё полезный ток, который поступает в нагрузку, устанавливая на ней уровень напряжения 25 В.

Конденсатор СЗ через открытые транзисторы Т3, Т5 и резистор R10 заряжается током заряда I_z так, что на верхней (по схеме) обкладке по окончании заряда относительно земли устанавливается напряжение +25В. На нижней обкладке в это время фиксируется напряжение 0 В.

Схема по окончании процесса заряда показана на Рис. 3.

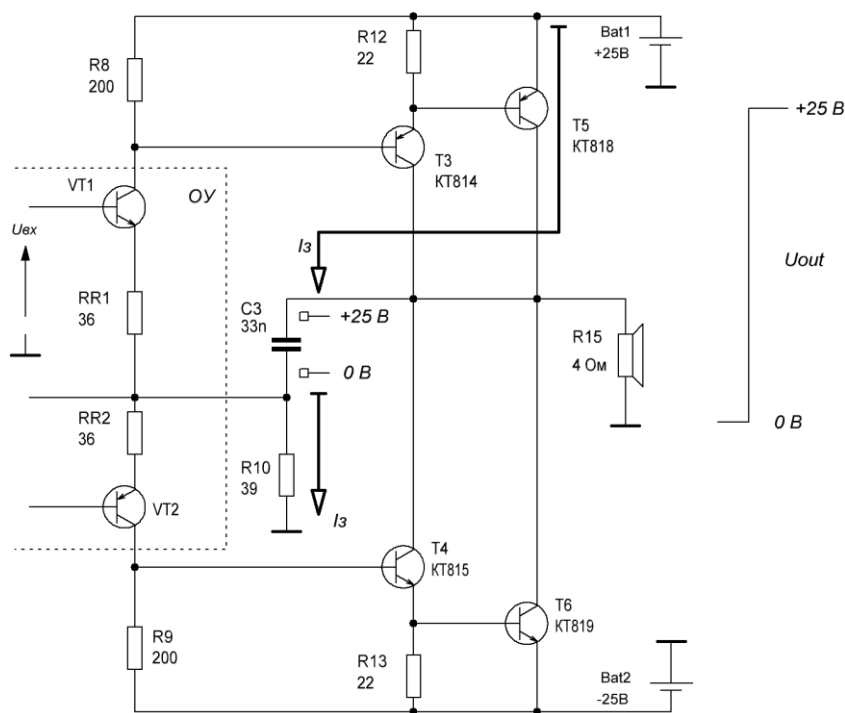


Рис. 3 Схема заряда конденсатора C3.

Процесс заряда закончен, напряжение на выходе скачком возвращается в исходное состояние. На самом деле, поскольку процесс неконтролируемый, напряжение на выходе изменяется от питания до питания, т.е., прыгает на уровень -25В, но для лучшего понимания принимаю, что напряжение становится равным нулю. Что происходит?

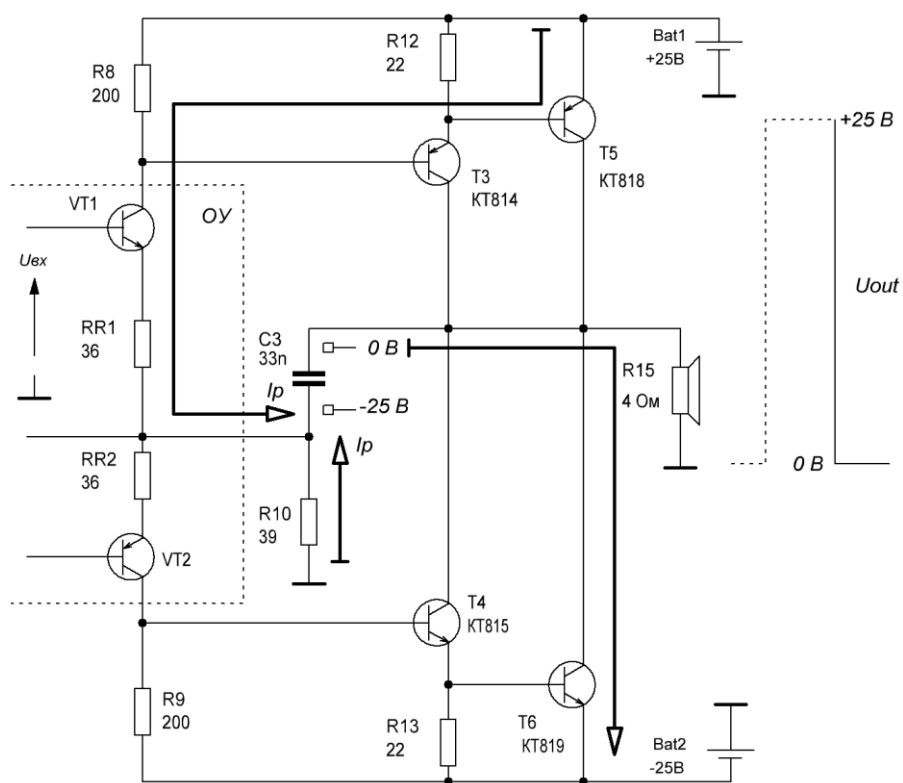


Рис. 4 Схема разряда конденсатора C3.

Важно, чтобы длительность фронта импульса была минимальной. Казалось бы, транзисторы T5, T6 запираются, T3 и T4 возвращаются в исходное состояние. Как бы ничего не должно происходить. Но! У нас есть заряженный конденсатор C3, который вносит свои коррективы.

После отработки усилителем отрицательного перепада напряжения на верхней обкладке конденсатора относительно земли устанавливается нулевое напряжение, на нижней - минус 25 В. Конденсатор не может перезарядиться мгновенно. Начинается перезаряд ёмкости через транзистор Т4, сопротивление нагрузки, резистор R10 и по цепи эмиттер-база Т5/эмиттер-база Т3/коллектор-эмиттер VT1/RR1. Напряжение на эмиттере VT1 цепью ООС устанавливается на уровне 0 В, а вот напряжение на эмиттерном резисторе RR1 равно напряжению на нижней обкладке С3. Поэтому на резисторе в начальный момент после окончания импульса возникает ток $25 \text{ В} / 36 \text{ Ом} = 0,7 \text{ А}$. На всякий случай, этот ток поступает в базу Т3, а из его эмиттера в базу Т5, вызывая огромный ток его коллектора.

Разумеется, такой ток вызывает увеличение напряжения на нагрузке. Чтобы его скомпенсировать, цепь ООС отпирает нижний транзистор Т6 для стравливания излишнего тока. Таким образом, в коллекторах выходных транзисторов начинает течь огромный ток, вызванный исключительно током перезаряда конденсатора С3.

И, как следствие, в ОУ тоже начинает течь сквозной ток, часть из которого – это ток перезаряда С3, а часть – ток компенсации, необходимый ООС для управления выходными транзисторами.

Я принял, что напряжение выходного импульса возвращается к нулевому значению. А теперь представьте, что напряжение падает в -25В. При этом напряжение на нижней обкладке конденсатора будет составлять уже -50 В, что сильно усугубит ситуацию с током перезаряда, и вообще может привести к пробоем самого ОУ.

Мы получили, что ток перезаряда и ток выходных транзисторов может достигать огромной величины. На самом деле таких токов, конечно, не будет. Во-первых, длительность фронтов реального сигнала является более растянутыми, во-вторых, перезаряд ёмкости начинается сразу после начала действия импульса, поэтому до таких напряжений и токов просто не доходит. Тем не менее, как показывает практика, того, что получается, вполне достаточно для сгорания мощных транзисторов. Количество тепловой энергии хватает, чтобы спалить выходные транзисторы за один цикл переколебаний, причём корпус транзистора может даже не нагреться.

Дефект третий – опять «сквозной ток», дополнение

И ещё один дефект. Видимо, г-ну Гумеле показалось мало, что первые два дефекта гарантированно выводят усилитель из строя, поэтому он решил добавить от себя ещё один. Речь идёт о конденсаторах С4, С5. Не знаю, насколько они улучшают параметры усилителя, но их установка также приводит к возникновению сквозных токов через выходные транзисторы.

Опять рисуем упрощённую схему. Предположим, на выходе имеется резкий перепад напряжения от нуля до 25 В.

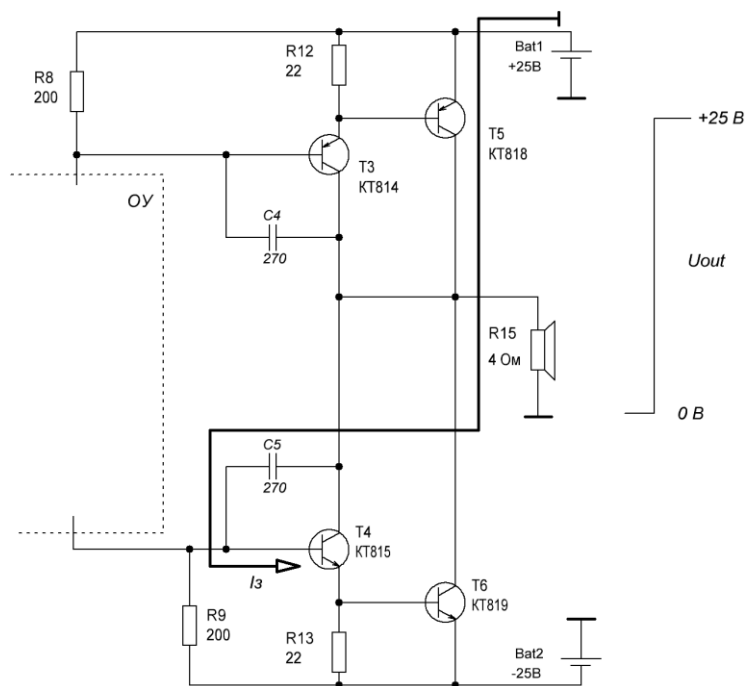


Рис. 5 Влияние конденсаторов С4, С5

Как видим, напряжение на конденсаторе C5 в начальный момент составляет около 25 В. Резкий перепад напряжения вызывает необходимость перезаряда этой ёмкости, так, чтобы на правой обкладке установилось +25В, а на левой – напряжение, которое не может быть выше +1,2 В относительно источника -25В или -23,8 В относительно земли. То есть, через C5 необходимо обеспечить такой ток заряда, чтобы дополнительно зарядить её на 25 В.

Такой ток вполне обеспечивается, а протекает он через открытый транзистор Т5 и базу Т4. Естественно, частично будет уходить через R9 на минус источника. Та часть зарядного тока, которая уходит на базу Т4, вызывает увеличение его коллекторного тока, который, в свою очередь, будет поступать в базу Т6, отпирая его и увеличивая его коллекторный ток. Поскольку Т5 уже открыт, то через к его уже существующему току добавляется ток Т6, а через выходные транзисторы течет сквозной ток, который может привести, и приводит, к выходу из строя выходных транзисторов.

Ну и ещё один момент. Представим, что на выходе напряжение с +25 В прыгнуло на -25В. Здесь уже необходим перезаряд C4.

Рассматриваемый эффект в таком построении выходного каскада присутствует всегда, вопрос лишь в величине ёмкости C4 или C5, насколько ток её перезаряда способен открыть выходные транзисторы. Естественно, уменьшение или вообще отсутствие этих конденсаторов способны снизить описываемый эффект.

С другой стороны, наличие довольно приличных паразитных коллекторных емкостей транзисторов Т5, Т6 предполагает наличие такого же эффекта напрямую в базу выходных транзисторов. Из-за малого сопротивления R12, R13 эффект может и не проявиться, однако о его существовании необходимо иметь представление.

В связи с вышеизложенным необходимо предусматривать меры по обеспечению условий работы элементов, чтобы исключить возможные экстремальные режимы. Например, возникает желание заменить пару выходного каскада на одиночный дарлингтон, вроде TIP142\147. Но у них паразитная емкость коллектор-база составляет порядка 300 пик, что уже представляет определённую опасность. Поэтому от такой замены лучше сразу отказаться.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены три дефекта усилителя, разработанного г-ном Гумелей.
2. Дефекты представляются неустраняемыми, кроме, пожалуй, третьего, который вполне возможно значительно ослабить.
3. Совместное действие всех трёх дефектов затрудняет регулировку и эксплуатацию усилителя. При неосторожном обращении возможен выход из строя выходных транзисторов
4. Для компенсации дефектов автор был вынужден установить дополнительные элементы, которые ухудшают параметры усилителя и маскируют происходящие в нем процессы. К этим костылям можно отнести сглаживающие цепи на входе усилителя, которые затягивают фронты сигналов.
5. Наличие сквозных токов как через ОУ, так и через выходные транзисторы, вызывает предположение о том, что звуковые характеристики усилителя оставляют желать лучшего. Есть подозрение, что дефекты, обозначенные в публикации, возникают не только во время переходных процессов, но и на звуковых сигналах. Поскольку реакция усилителя на такое возмущение не является гармонической, то появляются негармонические составляющие, и тогда акустическое восприятие может быть довольно неприятным.
6. Усилитель не рекомендуется к повторению.

С уважением

Vilsi Domm