

От Шмидта до Стоунколда. Эволюция

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	1
1. УСИЛИТЕЛЬ ШМИДТА	2
1.1. Анализ устойчивости.....	3
1.1.1. АФЧХ усилителя на дискретных элементах (ДУ).....	3
1.1.2. АФЧХ операционного усилителя.....	5
1.1.3. АФЧХ усилителя Шмидта	5
1.1.4. Критерий Найквиста.....	6
2. УСИЛИТЕЛЬ ГУМЕЛИ.....	7
2.1. Анализ устойчивости.....	8
2.1.1. АФЧХ составляющих усилителей	8
2.1.2. Критерий Найквиста.....	9
2.1.3. Устранение самовозбуда.....	9
2.2. Анализ эффекта «сквозного тока»	11
2.2.1. «Сквозной ток» из-за C4	11
2.2.2. «Сквозной ток» из-за паразитных емкостей предвыходных транзисторов.....	12
3. СТОУНКОЛД.....	14
4. ПО СЛЕДАМ СТОУНКОЛДА.....	16
5. НЕМНОГО ПРО ИСКАЖЕНИЯ	17
6. ВЫВОДЫ	18

ВВЕДЕНИЕ

Надо было быстренько сваять что-либо простенькое ватт на 50 и, как водится, за наиболее короткое время. Усилостроением давно не занимался, поэтому полез в и-нет за информацией на предмет выявления передовых тенденций в этом направлении, использования современных деталей, ну и, что попроще.

Сразу же наткнулся на Stonecold, соответственно, простенький, с минимумом деталек, но с довольно качественными заявленными характеристиками. И сразу завяз. Все хорошо, но по оживленной дискуссии в инете стало понятно, что качественные характеристики компенсируются сложностью настройки, непредсказуемым поведением усилителя в процессе эксплуатации, вплоть до полного выгорания деталей, плохой повторяемостью акустических параметров при замене типов радиодеталей.

Перед повторением решил слегка подработораться, что там происходит. Сначала прикинул «на пальцах», потом понял, что этого мало, и надо разбираться гораздо серьезнее. Усилитель имеет довольно сложную структуру для проведения подробного анализа, поэтому были привлечены более серьезные ресурсы.

В процессе работы выяснилось, что Stonecold – это один из вариантов общей линейки похожих усилителей, и, чтобы понять всю прелесть конструкции, надо копнуть слегка поглубже. Судя по ссылкам на первоисточник, первопроходцем в этом вопросе можно считать Грэма Шмидта (Германия). На него ссылаются все участвовавшие в этом проекте лица. Изначально речь идет о применении оригинальной мостовой схемы компенсации нелинейных искажений в оконечном каскаде усилителя мощности. Как она работает я так и не понял, несмотря на героические попытки чтения трудов авторов этой идеи (с одной стороны, теоретические изыски вгоняют меня в глубокий

и продолжительный сон, с другой – трудности владения языками, знаете ли, усиливают это действие вплоть до комы), на пальцах как она работает объяснить не могу, поэтому принимаю как аксиому. Итак, была предложена схема усилителя по Рис. 1 (схема выкопирована из трудов активного участника проекта по его модернизации, **Lincor'a**), которая обладала всем набором необходимых характеристик.

Несмотря на то, что все, кто ссылается на эту схему, именуют её «усилителем Шмидта», имею некоторые сомнения в его авторстве. В описании схемы Шмидт пишет: «Схема, показанная на рис.2, функционально реализует принцип токового управления, описанный выше. Если верить автору, данный УМЗЧ позволяет получить 100Вт на 4 Ом нагрузки, при этом K_d на частоте 1кГц заявлен 0,006% при мощности 60Вт.». Выделение моё, и имхо свидетельствует о том, что Шмидт – не автор. То есть, он не собирал этот усилитель. А просто привёл пример некоего усилителя, кем-то разработанного.

Поскольку все знают, откуда оно пошло, буду именовать его усилителем Шмидта.

Следующим был **Е.Гумеля**. Радио №9 за 1985г. Его усилитель внешне был очень похож на Шмидтовский, за тем исключением, что применены отечественные (советские) детали. И ещё имелась пара отличий, которые делают его радикально непохожим на Шмидтовский.

И, наконец, **Lincor**. Он заинтересовался этим усилителем где-то в 2000 г. и провел огромную работу по его модернизации, переводу на современную элементную базу. Провел работу по настройке усилителя с помощью подбора транзисторов и ОУ и анализу их влияния на звучание. Он же присвоил ему название Stonecold.

И еще один вариант схемы от последователей Stonecold'a. Автора не знаю, наверно, его можно найти в инете. Ее появление, как я понимаю, вызвано работами по борьбе со склонностью к самовозбуждению и несанкционированным выходом элементов из строя. В ней добавлены еще несколько диодов, большое количество блокировочных конденсаторов. Конденсаторов на схеме нет, вероятно, для того, чтобы не затруднять чтение принципиальной схемы, но на печатной плате присутствуют. При этом блокируется все, что можно. Эта схема здесь присутствует с целью показать, чем заканчивается попытка сделать конфетку из слабого материала.

В целом, было весьма забавно проследить, до каких пределов может дойти эволюция устранения всего лишь одной неопознанной неисправности. А уж если их несколько...

1. УСИЛИТЕЛЬ ШМИДТА

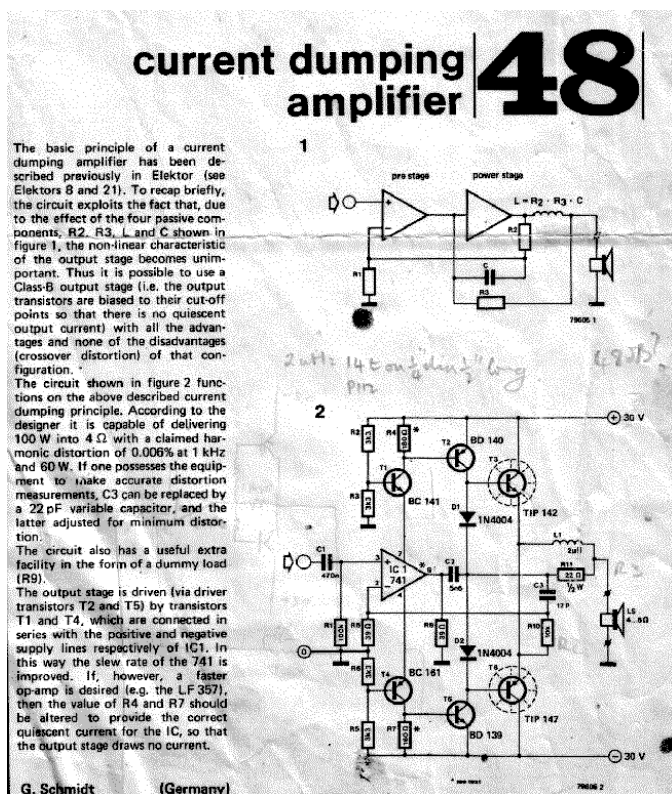


Рис. 1 Усилитель от Шмидта.

Вообще говоря, невооружённым глазом видно, что с усилителем серьёзные проблемы. В их сути, надеюсь, получится разобраться по мере расчётов. Что сразу бросается в глаза? Структура. Использован ОУ, работающий на низкоомную нагрузку (39 Ом), затем к нему приделан ещё один усилитель на дискретных транзисторах, служащий для раскачки динамика. Во втором усилителе применена местная частотнозависимая ООС через конденсатор С2.

Резисторы R10 и R5 устанавливают к-т усиления и определяют параметры усилителя, задаваемые цепью ООС.

На первый взгляд, нормальная схемотехника, но даже первоначальный расчёт вызвал недоумение. Речь идёт о параметрах обратной связи, задаваемых резисторами R10 и R5. На рисунке хорошо видно: R5=39 Ом. А вот что касается R10, то возникают непонятки. Номинал на картинке сильно размыт, и может быть принят как за 10 кОм, так и за 30 кОм. Меня бы больше устроил 30 кОм, но на рисунке, над надписью «30V» карандашом кем-то написано: «48 dB?», что как раз соответствует номиналу R10=10 кОм. Кто-то, видимо, просчитывал параметры усилителя и получил данное значение. Надеюсь, ему было более понятно, что там за номинал, потому как перед ним лежал более читаемый оригинал статьи. Но, опять же, знак вопроса после этой надписи вселяет некоторую неуверенность по поводу номинала этого резистора.

Так или иначе, примем R10=10 кОм и посмотрим, что будет в этом случае с нашим усилителем.

К-т усиления равен 48 дБ. Сразу выскажу недоумение: кому нужен усилитель с чувствительностью 40 мВ? При этом возрастают такие шумы, усиление наводок и других паразитов, предварительные каскады тоже должны работать с такими же малыми уровнями, отсюда, опять же, шум. Могу предположить, что, по всей видимости, автор усилителя исходил из проблем обеспечения устойчивости. Хватило ему этого или нет, попробуем разобраться в дальнейшем анализе.

1.1. Анализ устойчивости

Чтобы квалифицированно провести анализ устойчивости усилителя, необходимо учесть все составляющие, влияющие на его АФЧХ, да ещё желательно в динамике. Понятно, что это невозможно, поэтому приходится максимально упрощать составляющие, с тем чтобы иметь хотя бы качественное представление о процессах, происходящих внутри усилителя. Ну и потом, при необходимости, можно ввести поправки.

Исследуемый усилитель не является исключением. Для облегчения анализа разобью его на две функциональные части: операционный усилитель (ОУ) и усилитель на дискретных элементах (буду сокращённо называть его ДУ – дискретный усилитель, просьба не путать с другим похожим сокращением).

Такое разделение буду считать правомерным, поскольку полоса частот ОУ задаётся в основном внутренними элементами микросхемы и нормируется ДШ, а параметры ДУ – двумя стабильными внешними элементами – резистором и конденсатором. Функциональные части между собой развязаны, поэтому общая частотная характеристика в этих условиях является произведением двух частных.

Анализ результатов проводится на базе двух критериев: (1) - получению формы АФЧХ усилителя с включённой цепью обратной связи и обсуждению соответствия её формы заданным критериям и (2) – критерия устойчивости Найквиста.

Понятно, что такие расчёты на калькуляторе проделать невозможно, поэтому буду привлекать более серьёзное программное обеспечение.

1.1.1. АФЧХ усилителя на дискретных элементах (ДУ)

Начну с усилителя на дискретных элементах. Усилитель двухкаскадный неинвертирующий. В качестве первого каскада усиления используются выходные транзисторы ОУ (Q). Резистор малого сопротивления R9 привязывает эмиттеры выходных транзисторов к земле, формируя тем самым первый каскад усиления, включённый по схеме ОЭ. Второй каскад – на транзисторе Т2 (Т3). Его нагрузкой является входное сопротивление повторителя на Т5 (Т6). Из-за большого к-та передачи базового тока выходных составных транзисторов это сопротивление получается весьма высоким, из-за чего к-т усиления каскада на Т2 (Т3) достигает 60 дБ и более.

Его слегка упрощённая схема

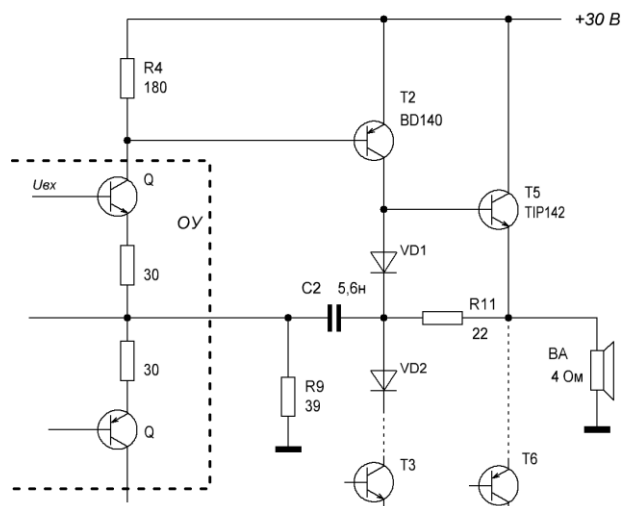


Рис. 2 Схема усилителя на дискретных элементах (ДУ)

Необходимо отметить, к-т усиления этого усилителя имеет переменное значение. В начале работы, при малом входном сигнале, выходные транзисторы заперты, и T2 (T3) работает на малую коллекторную нагрузку, фактически R11 и динамическое сопротивление диода VD1. К-т усиления при этом мал. Считать не буду, где-то 10 дБ.

Обращает на себя внимание организация отрицательной обратной связи: в качестве элемента, возвращающего выходной сигнал ко входу, используется конденсатор C2. Такая ООС является частотнозависимой, что влечёт за собой довольно интересные особенности параметров частотных характеристик усилителя. Тем не менее, такая ООС, как и любая другая, устраняет влияние паразитных полюсов ДУ, «съедает» их, и приводит АЧХ усилителя к нормированному виду. Полюсов просматривается по крайней мере два, но займусь ими, разве что только в случае необходимости. А пока что хватит одной характеристики.

С увеличением сигнала, после отпирания выходных транзисторов, нагрузка T2 резко увеличивается, и к-т усиления возрастает до 60 дБ и более. Так как усилитель работает в основном с большими сигналами, то упрощу себе работу и для расчётов приму K=60 дБ.

Рисуя АФЧХ.

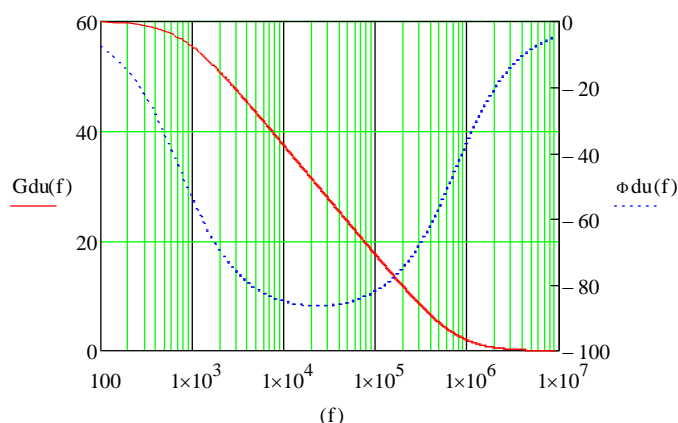


Рис. 3 АФЧХ ДУ

Хорошо видно, что до частоты 700 Гц АЧХ имеет горизонтальный характер. На этом участке реактивное сопротивление конденсатора C2 слишком велико и не оказывает влияния на частотные характеристики, усилитель находится в режиме без ООС. После этого начинается спад АЧХ с наклоном 20 дБ/дек приблизительно до 700кГц. Дальше АЧХ асимптотически стремится к 1 (0 дБ).

И ФЧХ ведёт себя тоже интересно. Как видим, с ростом частоты увеличивается задержка фазы практически до 90°, после чего фаза возвращается обратно к нулю.

1.1.2. АФЧХ операционного усилителя

Теперь разберёмся с ОУ. Поскольку применяем только высококачественные детали, буду пользоваться ОУ от TI. Вытаскиваю из ДШ параметры, нужные мне:

К-т усиления – 200 000, частотный диапазон – до 1,5 МГц.

Здесь просто, запишем эти данные в Маткад и получаем его АФЧХ.

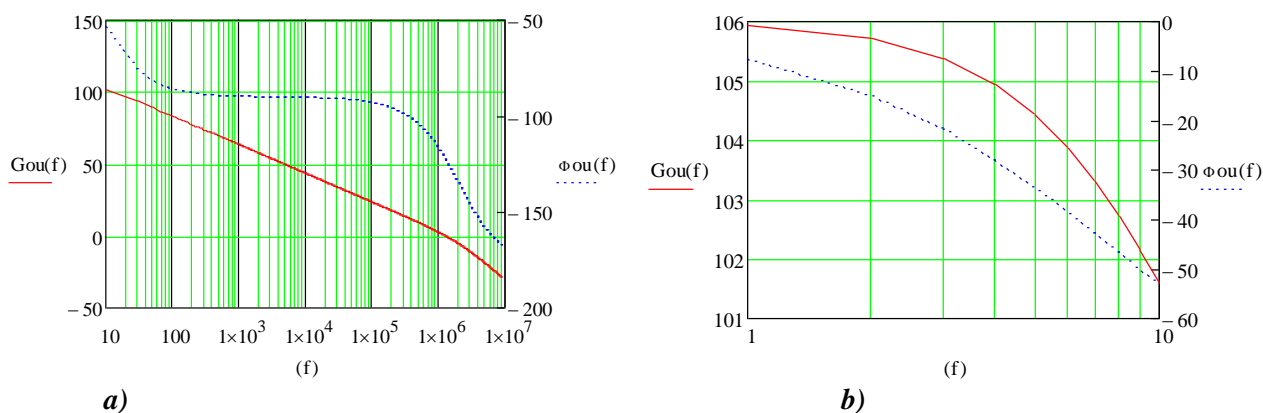


Рис. 4 АФЧХ ОУ

Слева – а) – в основном диапазоне: 10 Гц – 10 МГц, б) – более детально в районе до 10 Гц.

Здесь особенностей никаких, разве что на всякий случай можно отметить, что первый полюс расположен где-то на частоте около 8 Гц.

Возможно, кто-то обратил внимание на несколько моментов, которые не оказывают практического влияния на исследуемые характеристики, но вообще-то довольно важны при общем анализе усилителей.

1. На Рис.4, а) ФЧХ ведёт себя неким неправильным образом: начиная с частоты 100 кГц начинается дополнительная задержка фазы, которая к частоте 10 МГц стремится к 180° . Это объясняется тем, что из хулиганских побуждений я ввёл дополнительный полюс на частоте 3 МГц. Авось пригодится. При расчётах за ненужностью его можно легко сместить в сторону более высоких частот.

2. Стоит обратить внимание на то, что второй полюс висит на частоте 3 МГц, а действие его начинается на частоте 100 кГц. А на частоте 1 МГц накрутка фазы уже где-то градусов 40. Это я к тому, что пара между собой рядом расположенных полюсов, даже находящихся далеко вне рабочего диапазона частот, могут накрутить фазу градусов на 80 и дать негативную реакцию в плане устойчивости усилителя.

3. И ещё. Как следует из картинки АФЧХ ДУ, до частоты 700 Гц усилитель не охвачен ООС. Это означает, что нагрузкой ОУ является сопротивление 39 Ом. По ДШ параметры усилителя нормируются на нагрузке 2 кОм, поэтому снижение нагрузки относительно этого значения приведёт к нарушению условий работы ОУ или даже к его перегрузке. В данном случае мы работаем с малыми сигналами, поэтому катастрофических последствий, видимо, не будет, разве что снизится к-т усиления ОУ из-за снижения нагрузки внутреннего усилителя напряжения. Снижение усиления оценивается примерно на 6-10 дБ, что, скорее всего, не критично в наших исследованиях.

1.1.3. АФЧХ усилителя Шмидта

Ну вот, имеем частотные характеристики функциональных частей усилителя, осталось их перемножить и нарисовать АФЧХ усилителя Шмидта без ООС. В общем-то, она не несёт информации для анализа, просто для иллюстрации.

На Рис.5 дополнительно приведена линия теоретического к-та усиления усилителя с замкнутой цепью обратной связи $K_b=48$ дБ. Прекрасно видно, что она имеет пересечение с АЧХ усилителя без ООС в точке, где наклон АЧХ составляет 40 дБ/дек. В этих условиях ждать устойчивости усилителя по крайней мере наивно. Вот и посмотрим, так ли это.

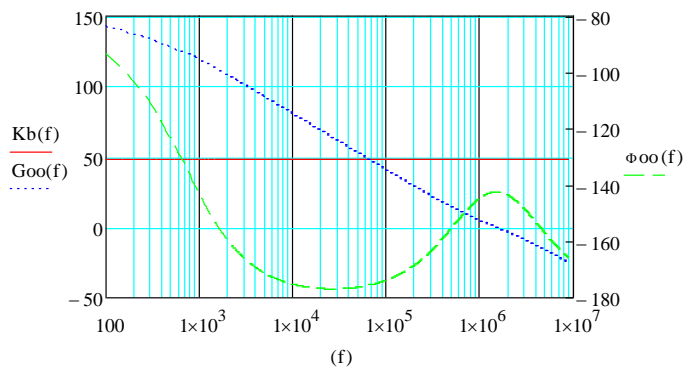


Рис. 5 АФЧХ усилителя Шмидта без ООС

Перехожу к анализу. Строю два графика. 1 – АФЧХ усилителя, на котором буду анализировать характерное поведение, 2- график на основании критерия Найквиста, на котором буду отслеживать такое же характерное поведение. И в том, и в другом случае полученная картинка даёт совершенно однозначное представление об устойчивости усилителя. Ну вот и посмотрим.

На Рис.6 приведён график к-та усиления и задержки фазы с включённой ООС.

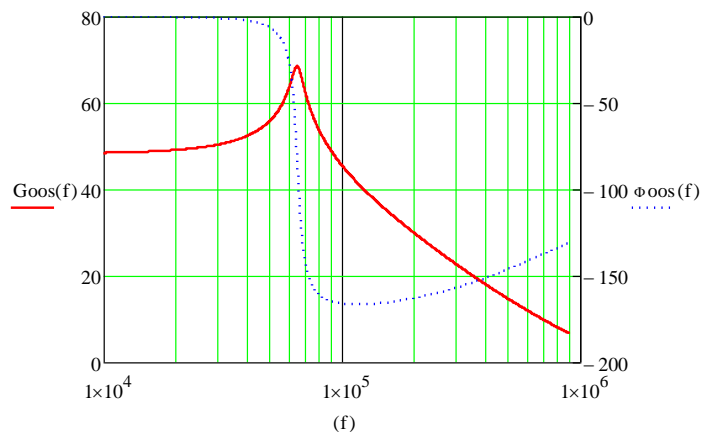


Рис. 6 АФЧХ усилителя Шмидта с ООС

Характерным поведением здесь является наличие резонансного пика на АЧХ к-та усиления с включённой ООС. Его наличие определяется тем, что сигнал через цепь ООС возвращается на вход усилителя в той же фазе, что и входной сигнал. В результате два сигнала складываются, что эквивалентно дополнительному усилению в некотором диапазоне частот, который расположен там, где должен располагаться срез АЧХ в «нормальном» усилителе. Если задержка фазы не превышает 130 град, то такого пика не наблюдается, и усилитель считается абсолютно устойчивым. Согласно теории этот пик вообще должен отсутствовать. В принципе, его наличие допускается, но величина не должна превышать 3 дБ. Ессно, можно и больше, но тогда есть риск получить искажённую переходную характеристику, либо, при увеличении пика, усилитель может прийти до самовозбуждения.

И что же мы имеем? А имеем мы резонансный пик величиной 20 дБ. Понятно, что усилитель можно считать абсолютно неустойчивым.

1.1.4.Критерий Найквиста

А проверим-ка усилитель с точки зрения Найквиста. В этом критерии рассматривается петлевое усиление усилителя с замкнутой цепью ООС. Предполагается, что последняя является частотнезависимой.

$$K_n(f) = A(f) * \beta$$

Здесь $K_n(f)$ – коэффициент усиления усилителя без ООС, β – к-т передачи цепи ООС.

Утверждается, что $K_n(f)$ не должен равняться минус 1. То есть, активная часть $K_n(f) = G(f) \neq 1$, а фаза $\phi(f) \neq -180^\circ$. Если это происходит, усилитель однозначно неустойчив. Если фаза на участке, где к-т усиления больше единицы, приближается к -180° или становится меньше этого значения (если

по модулю, то больше), то усилитель потенциально неустойчив. Это очень неприятное состояние, поскольку при внешнем сохранении устойчивости любой чих может сместить характеристику в область неустойчивости.

Для анализа пользуемся декартовыми координатами.

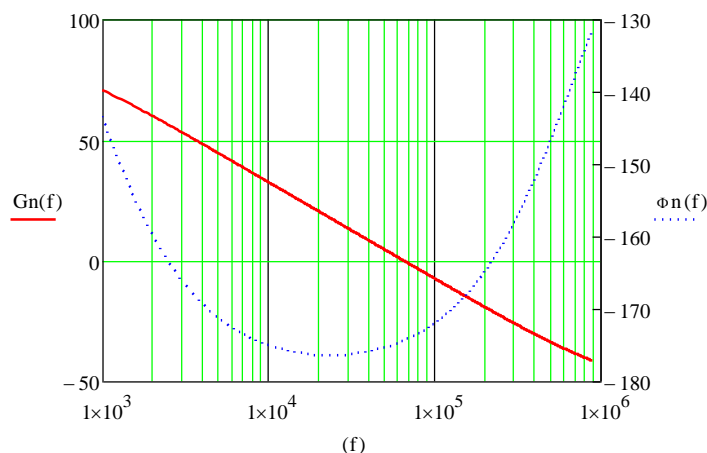


Рис. 7 Критерий Найквиста

Ну вот, на Рис.7 имеем графики по критерию Найквиста. Прекрасно видно, что фаза в диапазоне от 10 до 100 кГц имеет минимум и приближается к -180 град. Мало того, безопасные с точки зрения устойчивости значения задержки фазы (-150 град) расположены на частоте около 10 кГц. К-т усиления становится меньше 1 только на частоте 70 кГц, т.е., в диапазоне частот от 10 кГц до 100 кГц мы имеем потенциально неустойчивое состояние усилителя. Как ни странно, усилитель при таком состоянии может не возбуждаться. Но! Любая флуктуация фазы или к-та усиления может вызвать срыв усилителя в генерацию. Точно также, замена одного элемента на другой, даже практически идентичный, может ввести усилитель в режим генерации.

Небольшое обсуждение полученных результатов. Как видим, петлевое усиление равно 0 дБ на частоте 70 кГц. Если мы **увеличим** его, так что нулевая точка сдвинется, например, на частоту 400 кГц, то задержка фазы примет значение около -150 град, при этом будет обеспечена бОльшая устойчивость усилителя. Однако в этом случае участок, где фаза практически равна -180 град, никуда не девается, а это сохраняет опасность неустойчивой работы.

Такого же результата можно добиться, если **уменьшить** петлевое усиление, так чтобы точка 0 дБ опустилась, к примеру, до 1 кГц. В этом случае усилитель становится абсолютно устойчивым, правда, запас по фазе будет около 35 град, имхо маловат, необходимо ещё ниже спустить нулевую точку. Хотя можно установить нулевую точку и выше, на 2 кГц. Запас по фазе в этом случае будет около 25 град, что вполне обеспечит относительно устойчивую работу усилителя, но, скорее всего, искажений АЧХ и переходной характеристики избежать не удастся.

В целом вывод.

1. Усилитель Шмидта является абсолютно неустойчивой конструкцией. Это подтверждается и АЧХ с ООС, и критерием Найквиста. Поэтому-то вообще непонятно, как его могли собрать и настроить. Есть подозрения, что эта схема была использована исключительно для иллюстрации работы моста. А Шмидт, не разобравшись, транслировал конструкцию как законченный усилитель. Впрочем, поскольку я использовал достаточно грубые приближения в подходе к расчётам, вполне возможно, что в реальной схеме имеются компенсации факторов, приводящих к откровенной неустойчивости усилителя.

2. Как следует из анализа, возможность для устранения рассматриваемого недостатка, неустойчивости, имеется. Однако имеющиеся побочные дефекты отбивают всякое желание заниматься постройкой этого усилителя.

Теперь перехожу к анализу усилителя от Гумели.

2. УСИЛИТЕЛЬ ГУМЕЛИ

Схема.

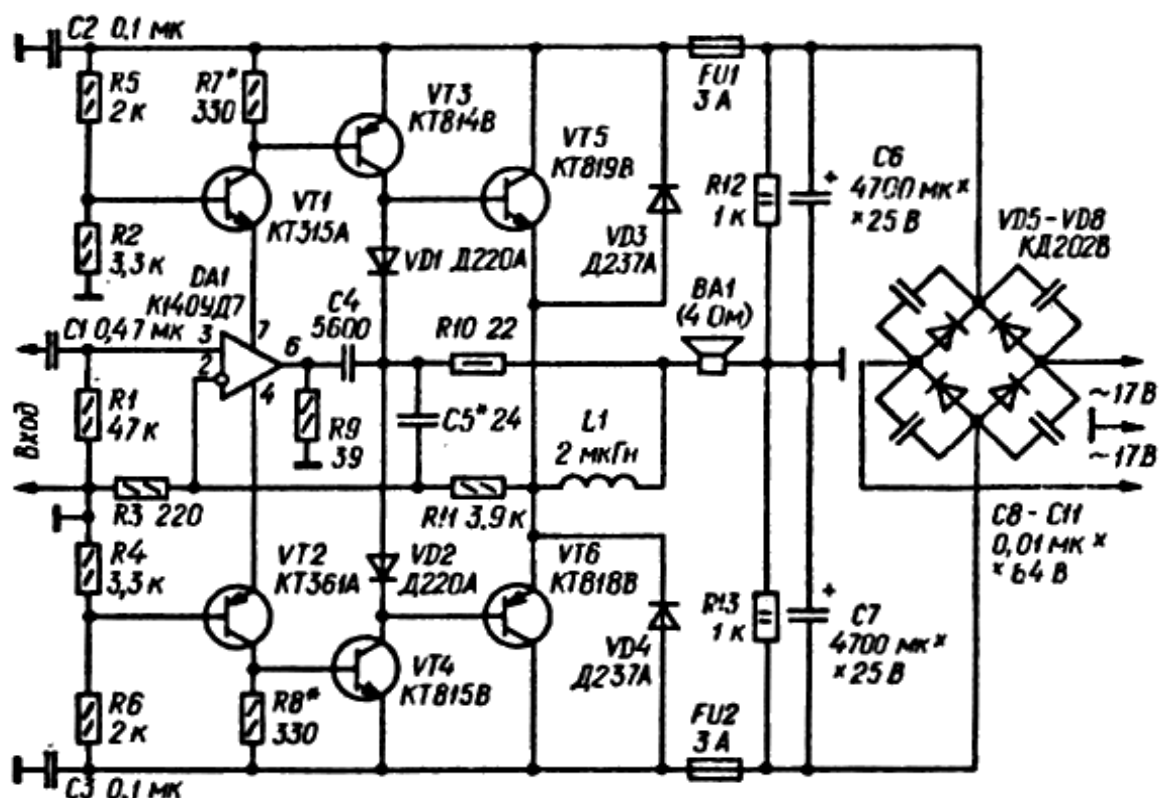


Рис. 8 Усилитель Гумели.

Как видим, при разработке усилителя г-н Гумеля внёс два принципиальных изменения, которые могут повлиять на изменение характеристик усилителя:

1. Уменьшил общий к-т усиления усилителя. Теперь он определяется отношением резисторов $R_{11}=3,9\text{кОм}$ и $R_3=220$ и равен 25,4 дБ. Это, возможно, позволяет опустить линию ООС в область обратного перегиба АЧХ ДУ и попасть в область АЧХ всего усилителя с наклоном 20 дБ/дек.

2. В качестве выходных транзисторов применил обычные биполярные транзисторы. Это позволило уменьшить к-т усиления выходного каскада примерно до 35 дБ.

К чему привели данные изменения, выясним в процессе расчёта.

2.1. Анализ устойчивости

2.1.1. АФЧХ составляющих усилителей

Для построения АФЧХ необходимо учесть, что ОУ К140УД7 имеет слегка худшие характеристики, чем LM741. Так, его к-т усиления нормируется на уровне всего лишь 90дБ, а полоса частот 800 кГц. Этими данными буду пользоваться для расчётов.

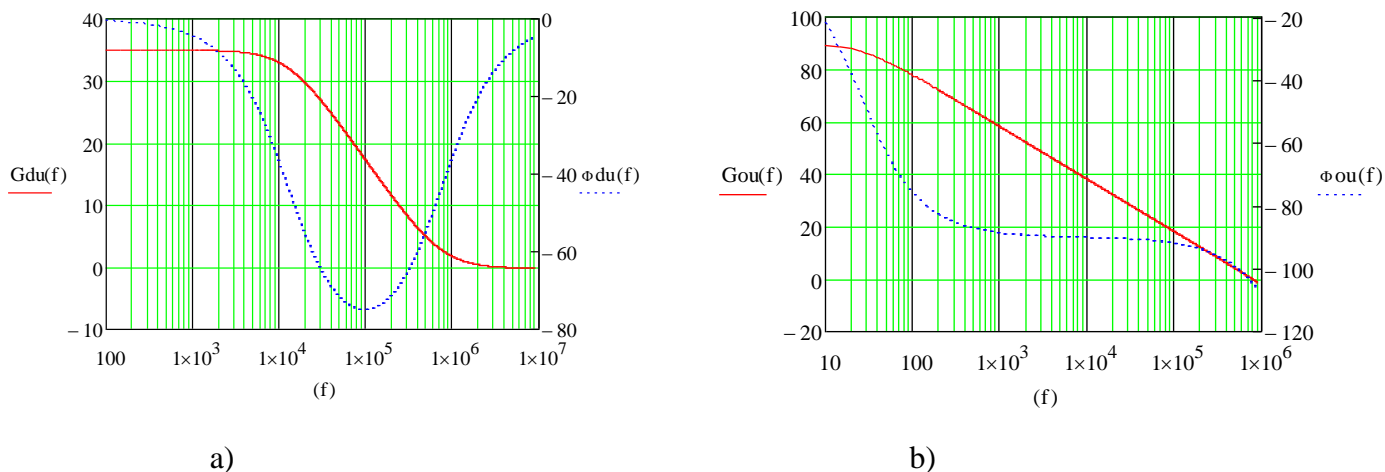


Рис. 9 АФЧХ ДУ(а) и ОУ (б)

АФЧХ на Рис. 9 приводятся в качестве иллюстрации к расчёту. Здесь, видимо, важно отметить, что из-за уменьшения k -та усиления ДУ спад его характеристики начинается гораздо позже, чем у Шмидта, на частоте примерно 5 кГц. Остальное не имеет особенностей, поэтому обсуждать не буду.

АФЧХ усилителя Гумели без ООС приводить тоже не буду ввиду отсутствия полезной информативности. Сразу перехожу к анализу.

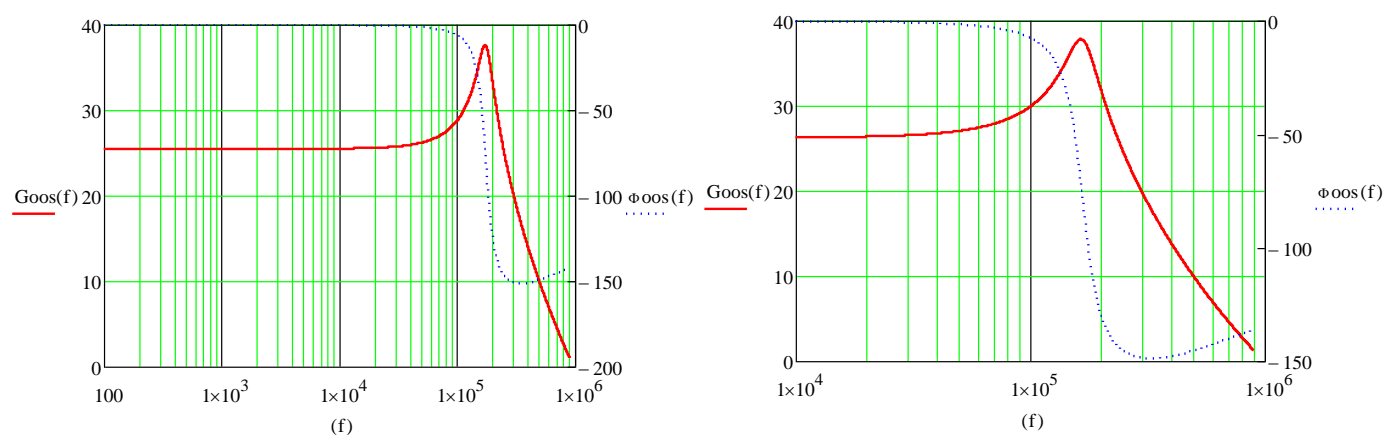


Рис. 10 АФЧХ усилителя Гумели с ООС

Как видно из Рис.10, на частотах около 200 кГц имеется резонансный пик. По сравнению со Шмидтом его величина гораздо меньше, порядка 10 дБ, что, впрочем, также является недопустимым с точки зрения обеспечения устойчивости.

2.1.2. Критерий Найквиста

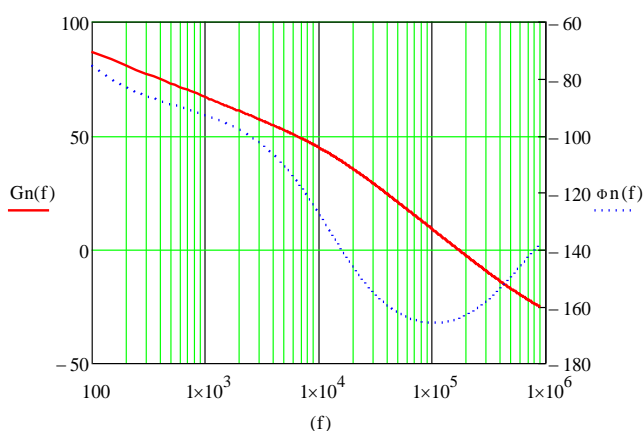


Рис. 11 Критерий Найквиста

А теперь критерий Найквиста.

Видим, что точка усиления 0 дБ практически совпадает с точкой максимальной задержки фазы. По сравнению с усилителем Шмидта запас по фазе увеличился градусов на 10, до -170°. Такая величина – это всё равно, что мёртвому припарка, но всё же.

Изменения, введённые Гумелей, принесли свои плоды. Тем не менее, усилитель всё равно остался неустойчивым.

2.1.3. Устранение самовозбуда

Не могу отказать себе в удовольствии немного пофантазировать на тему устранения рассматриваемого недостатка.

Как видим, если сместить точку единичного усиления в район частоты 20 кГц, то усилитель становится безусловно устойчивым. Запас по фазе составит около 40° град, что выравнивает АЧХ и переходную характеристику. Для этого можно пойти несколькими путями. Например, изменить параметры усиления ОУ либо дискретного усилителя ДУ.

Посмотрим, что будет, если в усилителе Гумели применить более качественный ОУ, типа TL071.

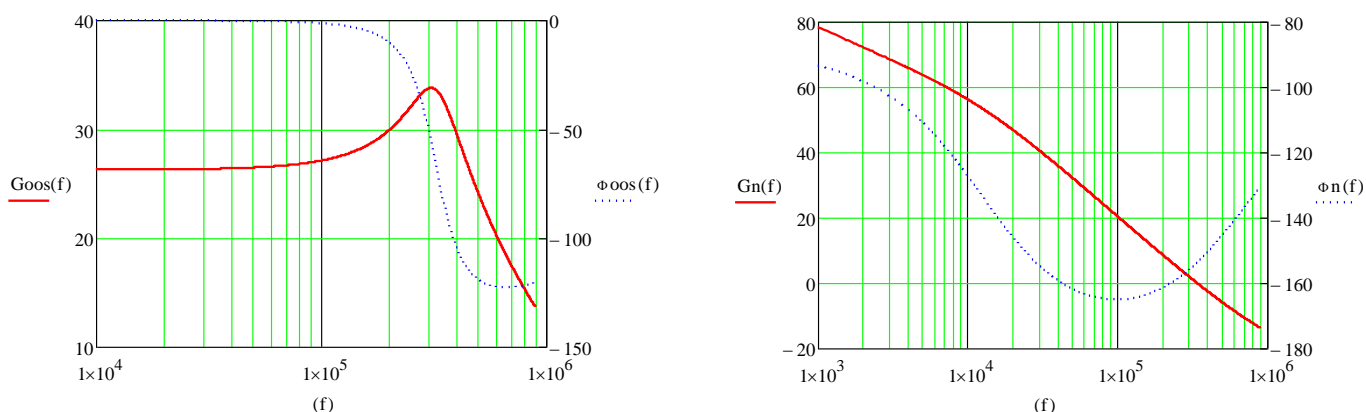


Рис. 12 Усилитель Гумели с продвинутым ОУ

Надеюсь, понятно: слева – усиление с ООС, справа – Найквист.

Резонансный пик уменьшился до 8 дБ, а задержка фазы по Найквисту – до 155° . Судя по графикам, применение более качественного ОУ приводит к улучшению устойчивости усилителя. Для полной устойчивости этого, конечно, мало, но некоторая тенденция просматривается.

И, наконец, реализую свою хулиганскую мечту: в предыдущий вариант анализа вставлю в ОУ второй полюс на частоте 6 МГц. Этот полюс принадлежит операционному усилителю и в обычном применении, без ДУ, спрятан под линией единичного к-та усиления, поэтому влияния не оказывает. В нашем случае из-за большого усиления ДУ он поднимается к линии усиления ООС и начинает оказывать своё воздействие. Получаю

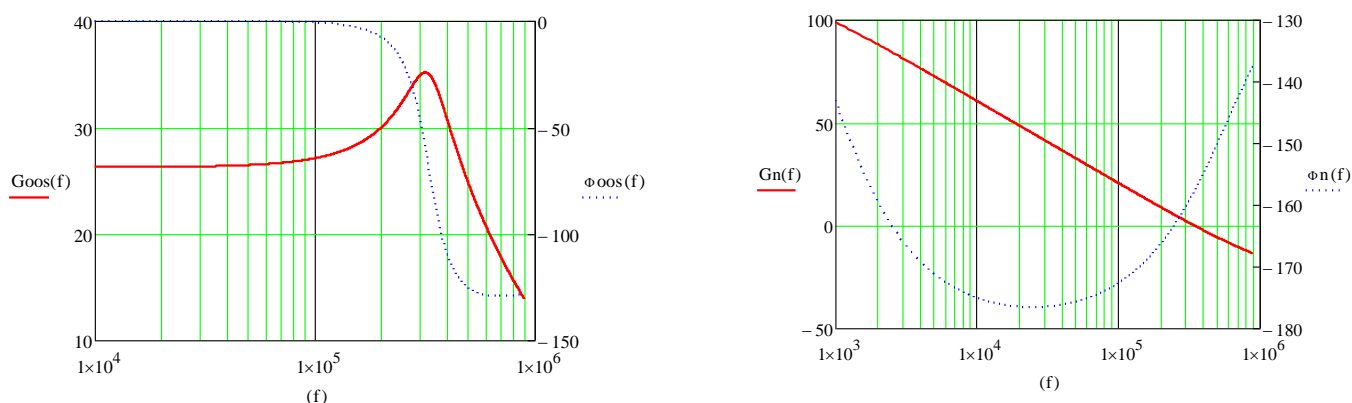


Рис. 13 Усилитель Гумели с качественным ОУ с учётом второго полюса

По сравнению с предыдущим примером слегка увеличился резонансный пик, а вот задержка фазы по Найквисту в нулевой точке практически не изменилась, лишь немного увеличилась. Но. Максимальное значение задержки фазы увеличилось градусов на 10, и диапазон, в котором фаза приближается к опасному значению -180° , расширился по частоте. Понятно, что условия обеспечения устойчивости усилителя ухудшились, несмотря на то, что полюс находится более чем на порядок выше по частоте, на которой происходят указанные события.

Ещё один эксперимент. Вообще-то известно давно, что если к ОУ на выходе приделать дополнительный усилитель, то его к-т усиления должен быть как можно меньше, только в пределах необходимой дополнительной раскачки сигнала, это ещё Колумбет Алексенко знал. Например, 5. Таки используем это значение в наших формулах.

Изменение вводим в исходный усилитель.

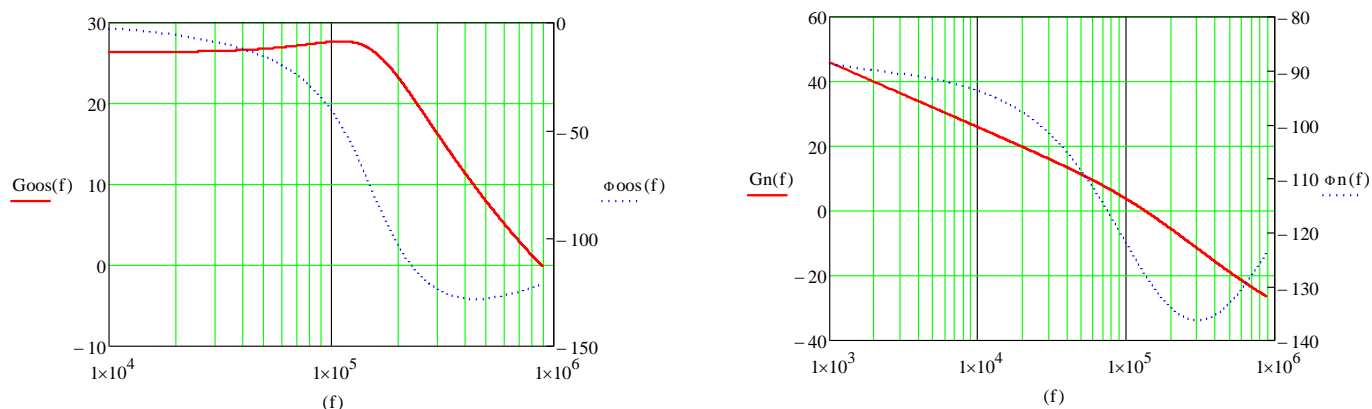


Рис. 14 Усилитель Гумели с $K_{дУ}=5$: k -т усиления и Найквист

Видно, что резонансный пик на АЧХ уменьшился до пары децибелл, а точка единичного усиления по Найквисту накручивает фазу менее чем на 130° . Такой усилитель обещает быть безусловно устойчивым.

2.2. Анализ эффекта «сквозного тока»

2.2.1. «Сквозной ток» из-за C_4

Теперь перейдём к ещё одному интересному эффекту данного усилителя, и связан он с установкой конденсатора C_4 . Проявляется в виде «сквозного тока» и приводит к выгоранию выходных транзисторов. Поскольку эффект связан с наличием C_4 , то таким же свойством обладает и усилитель Шмидта, и Стоунколд.

Для анализа нам нужна принципиальная схема усилителя на дискретных элементах.

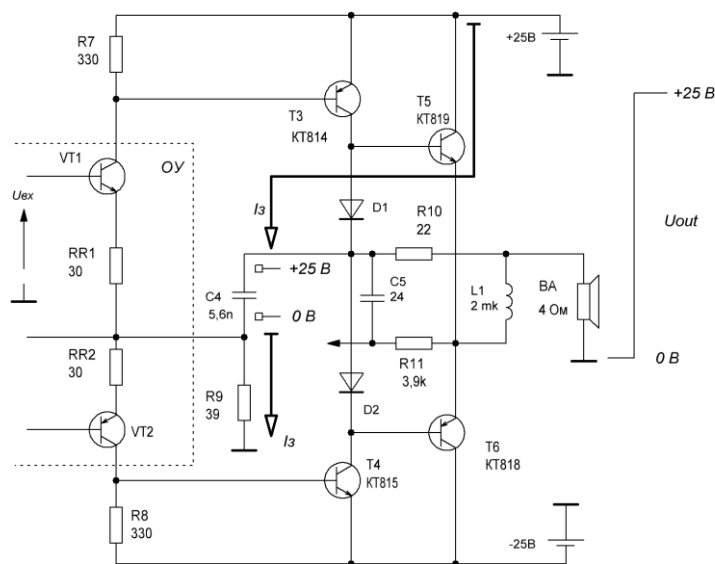


Рис. 15 Усилитель ДУ из усилителя Гумели. Заряд C_4

Предположим, на выходе усилителя установилось напряжение, равное 25 В. Ну или близкое к нему. Конденсатор C_4 заряжается током через T_3, T_5, D_1, R_{10} и R_9 так, что напряжение на верхней (по схеме) обкладке конденсатора C_4 относительно земли становится близким к 25 В.

А теперь примем, что напряжение резко изменилось от 25 вольт до нуля. Напряжение на C_4 измениться скачком не может, поэтому на верхней обкладке устанавливается нулевое напряжение относительно земли, а на нижней – минус 25 вольт. Поскольку напряжение на базе VT_1 в данный момент около нуля, а на эмиттере -25 В, то транзистор отпирается, и через него течёт ток перезаряда конденсатора C_4 . Часть этого тока протекает через базу T_3 , этот транзистор также отпирается и отпирает транзистор T_5 .

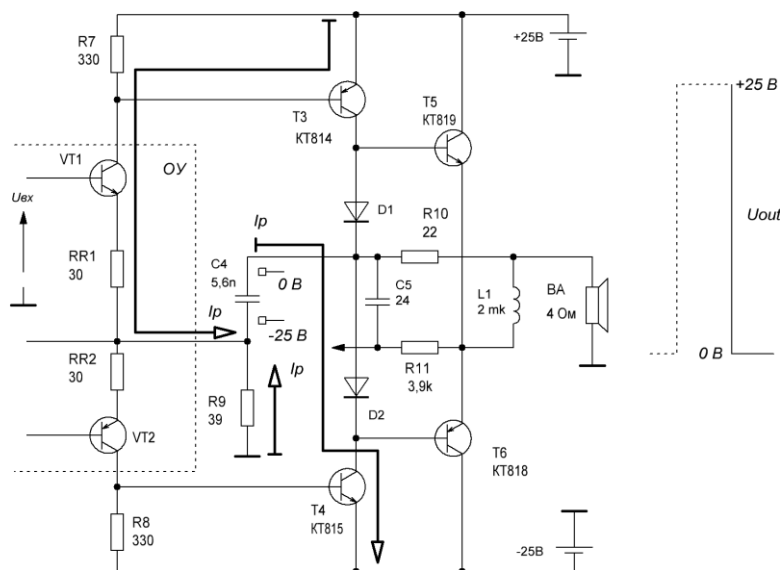


Рис. 16 Усилитель ДУ из усилителя Гумели. разряд C_4

Транзистор T_6 в этот момент уже открыт, либо ООС открывает его для компенсации роста напряжения на нагрузке, вызванного увеличением тока через T_5 .

Таким образом, через транзисторы T_5 и T_6 одновременно протекает ток, вызванный перезарядом конденсатора C_4 .

Что из этого происходит, испытали многие, повторявшие этот усилитель.

2.2.2. «Сквозной ток» из-за паразитных емкостей предвыходных транзисторов

И ещё один эффект, в принципе, незаметный по своей малости, но при определённых условиях способный привести к сквозному току. Как известно, транзисторы обладают кучей паразитных параметров, потенциально ухудшающих работу усилителя. Попробую рассмотреть, на что может повлиять наличие паразитных емкостей транзистора. Речь идёт о паразитных емкостях коллектор-база транзисторов T_3 , T_4 . Для $KT814$ эти ёмкости нормируются в пределах 40 пФ. В принципе, не очень большие, тем не менее, в определённых условиях они могут привести к неработоспособности усилителя. Если вместо них установить, к примеру, $KT816/KT817$, то эти ёмкости увеличиваются до 60 пФ, а есть транзисторы, у которых они возрастают и до 100 пФ. Ясно, что эффект будет только усиливаться.

Опять рассматриваем усилитель на дискретных элементах.

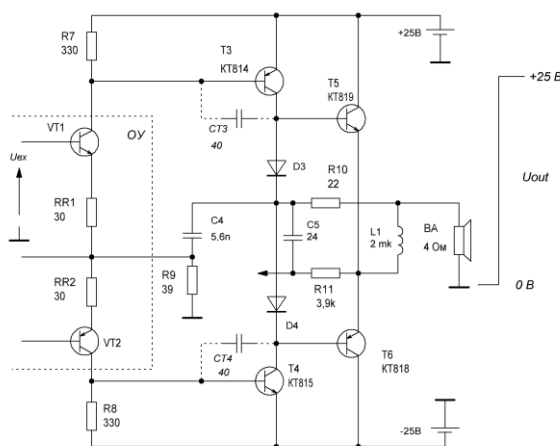


Рис. 17 Усилитель ДУ от усилителя Гумели. Заряд паразитных емкостей

Предположим, что на выходе установилось напряжение, близкое к напряжению питания. В этом случае потенциалы на паразитных ёмкостях: C_{T3} – напряжение между обкладками близко к

нулю, C_{T4} – правая (по схеме) обкладка имеет напряжение, близкое к напряжению питания, 25 В, левая около 0,6 В относительно минуса питания (-25В).

Теперь предположим, что ОУ выдаёт на ДУ напряжение управления, перебрасывающее выход с плюса на минус, т.е., на выходе снижается до - 25 В.

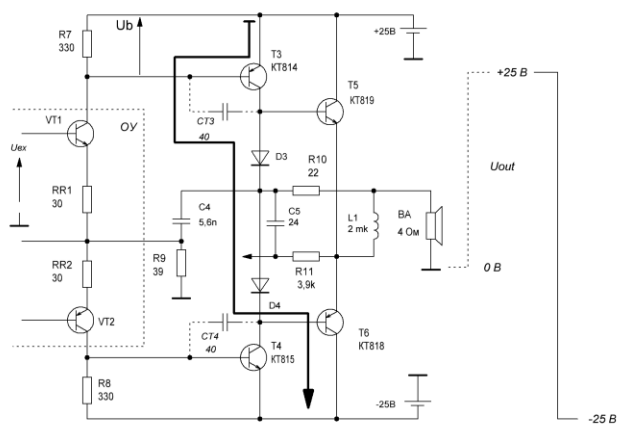


Рис. 18 Усилитель ДУ от усилителя Гумели. Перезаряд паразитных емкостей

Что произошло? Транзистор Т4, и вместе с ним Т6, открылся под воздействием сигнала с ОУ. На транзистор Т3 с ОУ выдан сигнал на закрывание, поэтому он должен быть заперт. Казалось бы, напряжение на выходе должно скачком перейти с +25В на -25В. Но нет.

Транзистор Т3 должен быть заперт, поэтому постоянный ток, зависящий от тока ОУ, через R7 не течёт (ну, не считая остаточной составляющей от постоянно действующих каскадов ОУ). Но паразитная ёмкость C_{T3} начинает перезаряжаться через резистор R7 и базу Т3. Транзистор Т3, так как через базу течёт ток, до момента полного перезаряда C_{T3} входит в линейный режим, при этом ток перезаряда ёмкости должен поддерживать одновременно базовый ток и формировать ток через R7, поддерживающий напряжение 0,6В.

Транзистор Т4 также переходит в линейный режим. Положительно заряженная обкладка паразитного конденсатора C_{T4} начинает разряжаться через коллектор открытого VT2, напряжение на левой обкладке приложено в противофазе к отпирающему напряжению транзистора Т4, т.е., начинает запирает транзистор Т4, что означает поддержание линейного режима до момента окончания перезаряда конденсатора. В отличие от C_{T3} ток перезаряда определяется выходным током ОУ (плюс, естественно, ток базы Т4), его максимальное значение определяется резистором нагрузки R9.

Понятно, что выходной ток ОУ гораздо больше, чем ток через резистор R7, поэтому процесс отпираения транзистора Т4 заканчивается гораздо раньше, чем процесс запираения транзистора Т3. Поэтому во время действия крутого фронта импульсного напряжения на нагрузке возможно формирование сквозного тока через выходные транзисторы.

Ну и наконец, попробую оценить, насколько критичен такой дефект. Для этого посчитаю время перезаряда C_{T3} . Воспользуюсь следующими предположениями.

1. Конденсатор C_{T3} принимаю по данным KT814 $C_{T3} = 40$ пФ.
2. Так как транзистор во время перезаряда будет находиться в активном режиме, то напряжение на R7 должно поддерживаться на уровне 0,6В. Такое напряжение будет создаваться током через конденсатор и током через ОУ. Ток через ОУ определяется током через оконечные и предварительные каскады, соотношение не знаю, потому приму в равном значении. В данный момент считаю выходные каскады запертыми, поэтому ток ОУ будет в два раза меньше. Соответственно, напряжение на R7 будет также в два раза меньше. Тогда для поддержания напряжения 0,3 В от перезаряда C_{T3} требуется ток $0,3В/330\text{ Ом} = 0,91\text{ мА}$.
3. Теперь можно рассчитать время, за которое произойдёт перезаряд C_{T3}

$$t = \frac{E * C}{I} = \frac{50В * 40\text{ пФ}}{0,91\text{ мА}} = 2,2\text{ мкс}$$

Получается, что транзистор Т3 в течение 2,2 мкс после прохождения импульса на запираение будет открыт. Мало того, его базового тока вполне должно хватить для обеспечения коллекторного

тока, достаточного для отпирания выходного транзистора. А поскольку Т4 уже тоже будет открыт, то получается, что в течение 2,2 мкс в транзисторах выходного каскада при импульсном воздействии будет течь сквозной ток.

Понятно, что на самом деле величина эта мизерная, и она вряд ли приведёт к выгоранию транзисторов. Понятно, что с целью оценки масштабов проблемы я сделал предположения, хотя и весьма приблизительные, но и весьма вероятные. Тем не менее, об этом дефекте необходимо помнить и принимать меры для его минимизации при настройке и проектировании усилителей такой структуры. В самом деле, при установке транзисторов с паразитными конденсаторами в 100 пФ мы получаем время сквозного тока в 6 мкс, а вот это уже критично. Кроме того, я же мог и ошибиться в своих предположениях. А вдруг там всё ещё хуже?

3. СТОУНКОЛД

Разработкой и доводкой этого усилителя занимался уважаемый Lincor. Вернее, это была не разработка, а тестирование и доработка гибрида из двух предыдущих усилителей на предмет замены типов транзисторов и микросхем. Как писал сам автор, за основу была взята схема Шмидта и проведены работы по обеспечению стабильности и качества звучания.

В результате была получена принципиальная схема

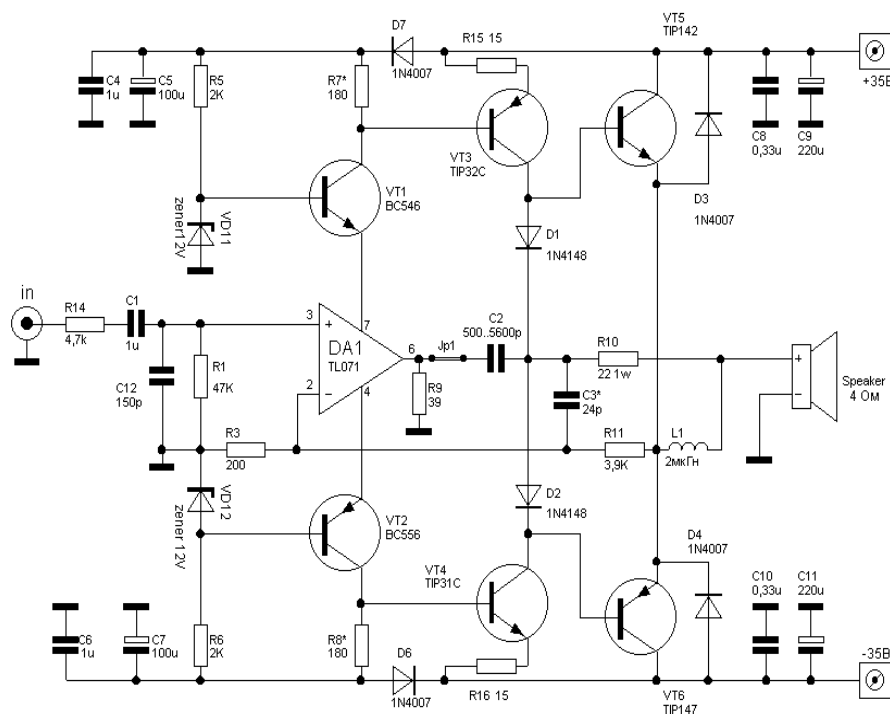


Рис. 19 Усилитель Stonecold

С одной стороны, так да, с другой не совсем. Изменения, которые оказывают принципиальное влияние на работу усилителя:

1. От Шмидта: восстановлен выходной каскад на составных транзисторах,
2. От Гумели: к-т усиления также определяется отношением резисторов в 3,9 кОм и 200 Ом (слегка меньше) и составляет 26,2 дБ.
3. Добавлено: применён более скоростной ОУ типа TL071.
4. Конденсатор С2 теперь можно подбирать.
5. В эмиттерах VT3 (VT4) установлены резисторы по 15 Ом, уменьшающие к-т усиления этих каскадов.
6. Добавлены диоды D6 и D7.

К чему это привело – будем посмотреть. АФЧХ строить, имхо, необходимости нет, проведу только поверхностный сравнительный анализ.

1. К-т усиления ДУ по сравнению с усилителем Гумели опять серьёзно увеличился. На основании приведённого выше анализа устойчивости с разным усилением ДУ приходим к выводу, что устойчивость сильно ухудшилась.

2. К-т усиления всего усилителя практически не изменился, поэтому его влияние нейтральное: устойчивость не изменилась.

3. Применение более скоростного ОУ скорее слегка улучшает устойчивость, но влияние очень мало.

4. Резисторы в эмиттерах уменьшают усиление выходного каскада. Однако их установка увеличивает входное сопротивление этого каскада, откуда увеличивается усиление каскада на выходных транзисторах ОУ. Итого эффект будет вряд ли заметен, а поэтому не окажет влияния на устойчивость.

5. Диоды D6, D7. Снимаю шляпу! С одной стороны, откровенный схемотехнический ляп. Ну ладно, это могла быть неточность на принципиальной схеме. Но на печатке диоды разведены именно так, как указаны. С другой – установка этих диодов, видимо, позволила Lincor'у снизить к-т усиления ДУ и тем самым повысить устойчивость усилителя. Поясню, что я имею в виду.

Рассмотрим узел на VT1, D7 и VT3. Диод включен между базой и эмиттером VT3. В исходном состоянии конденсатор C5 заряжен до напряжения, на 0,6 В меньшего напряжения питания, и, поскольку питает слаботочные каскады, разряжается единицами миллиампер, откуда время его разряда довольно большое.

Предположим, что по каким-то причинам напряжение на C8, C9 начинает снижаться. Для определённости примем, что:

1. На нагрузке 4 Ом действует прямоугольный импульс амплитудой 30 В.

2. Длительность импульса 8 мс (такая длительность выбрана из следующих соображений: поскольку блок питания нестабилизированный, то конденсаторы подзаряжаются двумя полупериодами сетевого напряжения, т.е., с частотой 100 Гц или периодом 10 мс. Чтобы исключить режим подзаряда конденсаторов во время анализа, размещаем импульс между двумя пиками подзаряда).

3. Ток в нагрузке составит $30/4=7,5$ А.

4. Емкость фильтра питания C8, C9 на схеме указана 220 мкФ. Однако в блоке питания должны были быть применены гораздо более серьёзные ёмкости – порядка 10 000 мкФ. Считаю, на какое напряжение сумеют разрядиться такие ёмкости при выбранных параметрах:

$$\Delta U = \frac{I * t}{C} = \frac{7.5 * 0.008}{0.01} = 6 \text{ В}$$

Неплохо! Получили, что во время отбора тока 7,5 А напряжение на эмиттере VT3 может «провалиться» на 6 В. Напряжение в базе VT3 поддерживается на прежнем уровне, так как C5 разряжается очень медленно, а диод D7, как только напряжение на аноде уменьшится, перейдёт в запёртое состояние. Понятно, что VT3 в это время должен полностью закрыться. Но это невозможно, потому как через него идёт управляющий сигнал для обеспечения уровня выходного напряжения в нагрузке. Поэтому для его поддержания в рабочем состоянии ООС будет обязана компенсировать это уменьшение посредством увеличения тока через VT1. Опять же, насколько? ОУ должен компенсировать изменение напряжения на 6 В, поэтому $\Delta=6\text{В}/180\text{Ом}=33$ мА. Это чё-та слишком круто! Для компенсации паразитного эффекта нам нужно будет увеличить ток через ОУ на 33 мА! Интересно, а откуда оно возьмётся? Ну ладно, это не моё дело. Я просто фиксирую схемотехнический ляп.

НО! Как ни странно, именно этот ляп позволяет уменьшить к-т усиления ДУ. Если в нормальных условиях, без диода, ОУ было необходимо обеспечить на базе транзистора изменение всего на 0,1 В, то теперь, при наличии диода, на 6 В. Ясно, что к-т усиления ДУ уменьшился в $6/0,1=60$ раз. Как ни странно, в данном случае имеется тенденция к выполнению условия обеспечения устойчивости, рассмотренного в усилителе Гумели. Понятно, что цифры приведены ориентировочные, в основном, для качественного рассмотрения эффекта, тем не менее, такое построение усилителя, видимо, принесло свои плоды, и Стоунколд действительно приобрёл некое подобие стабильности.

А если емкость в БП уменьшить в 2 раза? Есть вероятность дальнейшего улучшения параметров.

Правда, в случае если импульс тока попадёт на момент подзаряда емкости фильтра, таки есть риск получить модуляцию с частотой выпрямленного напряжения.

Общий вывод философский.

1. Некоторые решения приводят к ухудшению устойчивости усилителя, некоторые нейтральны, некоторые повышают её. В целом же как был усилитель неустойчивым, так и остался.

2. Диоды D6 D7, хотя и, вполне возможно, ведут к повышению устойчивости усилителя, но в таком виде в нормальном усилителе оставлять их нельзя, так как кроме рассмотренного эффекта появляется частотно зависимая ООС через эмиттеры транзисторов. Это приведёт к появлению дополнительных полюсов и опять-таки ухудшению устойчивости.

3. Сохраняются условия гибели силовых транзисторов.

4. ПО СЛЕДАМ СТОУНКОЛДА

Не могу не привести эту схему. По той причине, что она наглядно показывает действие принципа «сделай то, не знаю, что», и что в результате получается.

Основным отличием является отсутствие ёмкости коррекции в ДУ. Кроме того, исправлен ляп с диодами: VD9 и VD10 установлены правильно и не оказывают влияния на усиление ДУ.

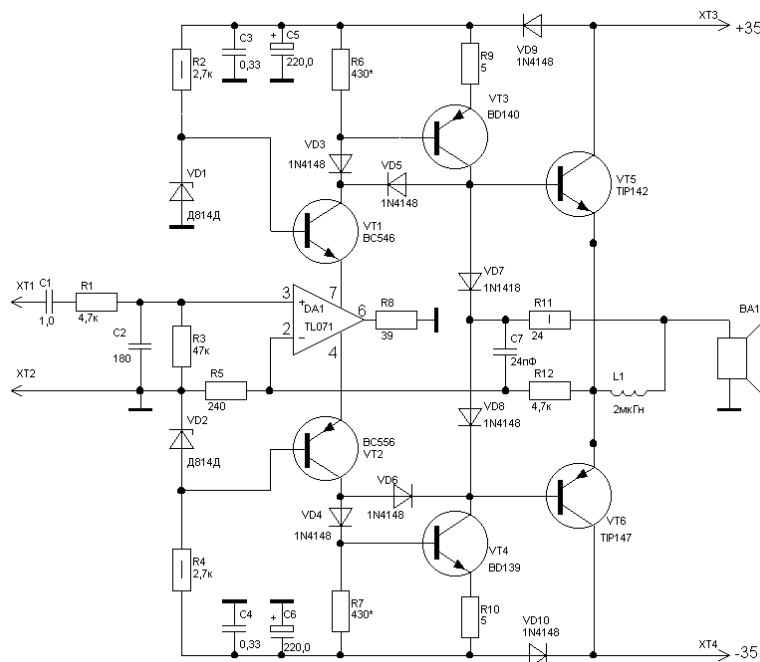


Рис. 20 Вариант Stonecold от неизвестного (мне) автора

Ну что можно сказать? Конденсатора ООС нет, отсутствует одна из причин «вылета» выходных транзисторов. Вторая причина осталась, но надо посмотреть, как оно будет работать. Поскольку местная ООС в ДУ исчезла, то на арену выходят полюса, которые были ею нейтрализованы. Наиболее очевидный из них – это полюс, образованный паразитной ёмкостью к-б транзистора VT3 (VT4) и входным сопротивлением каскада на том же транзисторе.

Данных по ёмкости для BD140 не нашёл, поэтому опять приму её на уровне для KT814, т.е., равной 40 пФ. Про β не могу сказать, поскольку разброс огромный, приму просто $\beta=100$. Ну и для TIP142 задействую $\beta=3000$. Исходя из этих условий считаю частоту полюса: $F=6,6$ кГц. Для усилителя в целом он является вторым полюсом, поскольку первый, как и прежде, задаётся полюсом ОУ.

И ещё один момент: в таком варианте ОУ во всём диапазоне частот работает в режиме перегрузки малым сопротивлением 39 Ом, поэтому придётся учитывать и этот момент. Уменьшаем его к-т усиления без ООС на 8 дБ.

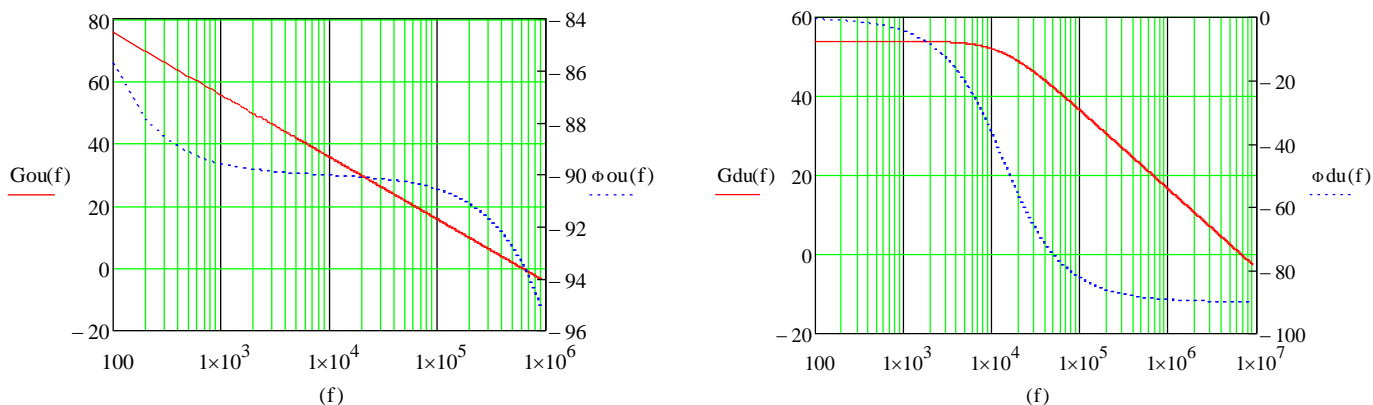


Рис. 21 Слева АФЧХ ОУ, справа АФЧХ дискретного усилителя ДУ

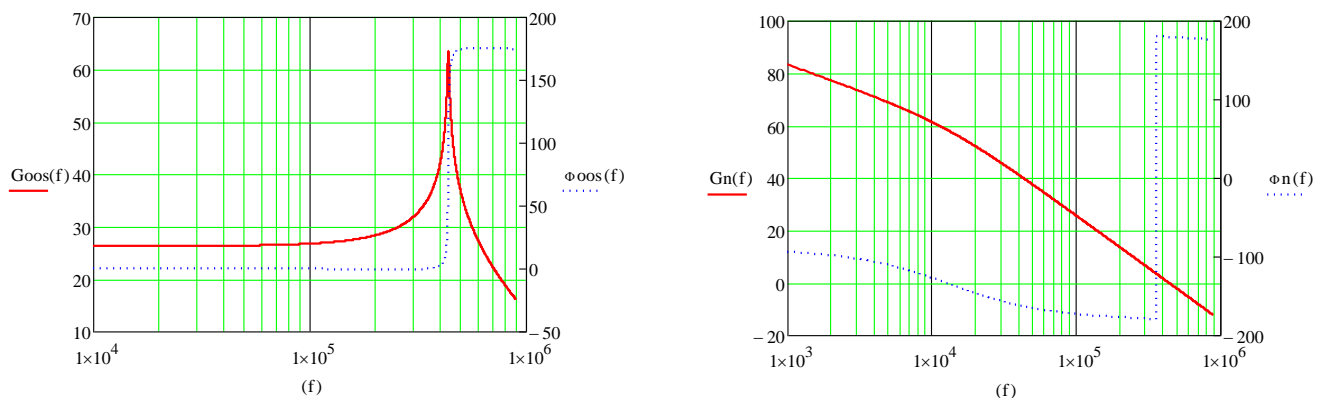


Рис. 22 Слева АФЧХ усилителя с ООС, справа - Найквист

Слов нет. Усилитель абсолютно неустойчив. Даже не интересно. По Найквисту: в точке с $K=1$ (0 дБ) фаза равна -180° .

Возникает смутное подозрение, что этот усилитель так и не был настроен. Ну да, принципиальная схема и печать в инете присутствуют, но это всё, что есть. Реально его настроить невозможно.

5. НЕМНОГО ПРО ИСКАЖЕНИЯ

Не могу обойти вниманием ещё один момент: а что там у нас с искажениями? Опять привожу цитату из Шмидта: «данный УМЗЧ позволяет получить 100Вт при работе на 4 Ом нагрузку, при этом K_Γ на частоте 1кГц заявлен 0,006% при мощности 60Вт». Возвращаюсь к АФЧХ усилителя без ООС.

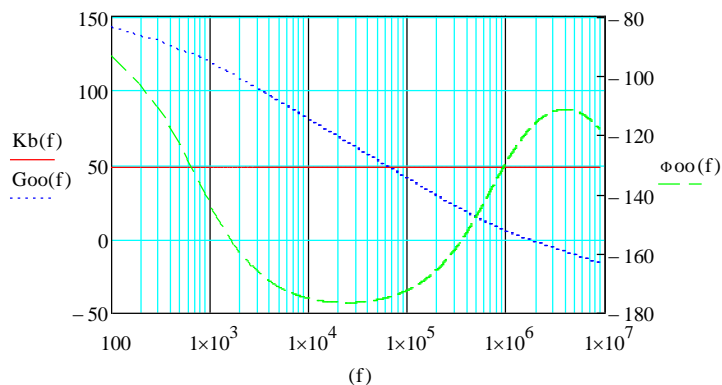


Рис. 23 АФЧХ усилителя Шмидта без ООС

Смотрим к-т усиления на частоте 1 кГц: 120 дБ. К-т усиления с ООС: 48 дБ. Отсюда: запас по усилению $120-48=72$ дБ.

Примем искажения на этой частоте с разомкнутой ООС равными 20%. Вполне себе стандартные искажения. И эти искажения цепь ООС уменьшает до $K_\Gamma=20\%/72\text{дБ}=0,005\%$.

Я чего-то не понимаю? Эта чё? Получается, что уровень гармоник без всякого моста, компенсирующего искажения, будет соответствовать заявленному значению. А нахрена тогда этот мост? И так хорошо. Или ребята просто посчитали, что там будет, и, типа, озвучили? А делать усилитель, в общем, и не надо?

А вот если посмотреть, что происходит на частоте 5 кГц, так там ещё интереснее. К-т усиления в этой точке около 90 дБ. Запас по усилению получается 42 дБ, отсюда $K_{\Gamma}=20\%/42\text{дБ}=0,16\%$. А это что такой за усилитель, с такими искажениями?

Ну ладно, допустим, Шмидт не знал, с чем имеет дело. Посмотрим на усилитель от Гумели.

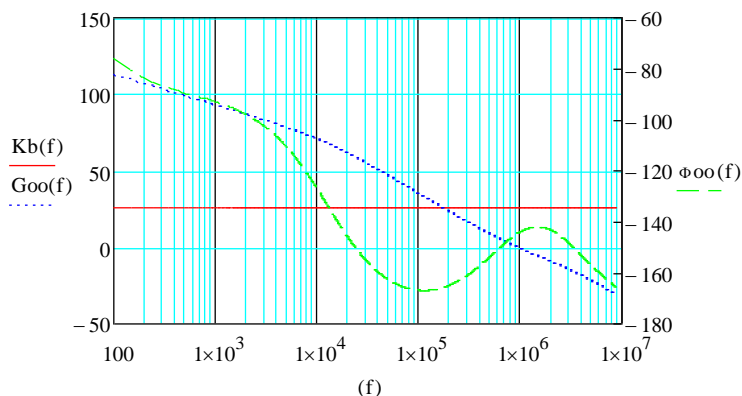


Рис. 24 АФЧХ усилителя от Гумели без ООС

Смотрим к-т усиления на частоте 1 кГц: 93 дБ. К-т усиления с ООС: 24 дБ. Отсюда: запас по усилению $120-48=69$ дБ.

Запас по усилению 69 дБ! Вау! А ведь ничего не изменилось, K_{Γ} будет практически таким же, как у Шмидта, в районе 0,005%. Слегка похуже, 0,007%. Понятно, это значение будет гулять в зависимости от параметров использованных компонентов.

Теперь цитирую Гумеля: «при номинальной мощности 60 Вт коэффициент гармоник на частоте 1000 Гц не превышает 0,006%». Что-то мне это напоминает...

Господа, вы зачем мучились с этим самым мостом?

А на частоте 5 кГц запас по усилению получается 56 дБ. И по этому параметру он сильно превосходит усилитель Шмидта. Почему так, объясняю: из-за малого усиления ДУ наклон характеристики с 40 дБ/дек начинается с гораздо большей частоты.

Что касается варианта усилителя от Lincor'a, то оценить его возможности из-за пресловутых диодов не представляется возможным. Но ежели их убрать, то тогда к-т усиления увеличивается на 25 дБ, и вполне возможно получение $K_{\Gamma}=0,0005\%$. Вот только послушать их не удастся, жалко.

6. ВЫВОДЫ

1. Все усилители на основе анализа их АФЧХ оказались близкими к неустойчивости, причём для анализа использовались всего две составляющие характеристики. Если учесть все дестабилизирующие факторы, то результат, естественно, будет ещё хуже.
2. В усилителях не предусмотрено никаких элементов настройки. Я имею ввиду коррекцию АЧХ.
3. Усилители обладают общим дефектом, приводящим к выходу из строя выходных транзисторов.
4. Прекрасно видно, как из одного изначально не очень хорошего усилителя, не понимая, откуда растут ноги, в процессе модернизации можно сделать несколько вариантов таких же не очень хороших усилителей. Это я мягко так.
5. К сожалению, провести измерения и настройку ни одного из усилителей с помощью импульсного сигнала в данном случае невозможно, потому как это неминуемо приведёт к выгоранию выходных транзисторов.
6. Не просматривается направление улучшения параметров этих усилителей. Никакое.
7. Как ни странно, с точки зрения акустики звучание всех усилителей может быть весьма приятным на слух, что подтверждают многочисленны отзывы последователей.
8. Усилитель Шмидта и последний, неизвестный, скорее всего, никогда не были настроены.

9. Как ни странно, тема корректирующего моста получила продолжение в промышленном усилителе. Я имею ввиду Quad-405. Однако при внешней общей схожести схемотехники в усилителе заложены несколько иные принципы работы, поэтому он в рамки данного исследования не попал.

С уважением

Vilsi Domm