

(внимание, замечена опечатка: в предыдущей части рассуждения по поводу Моторолы слегка неправильны. Надеюсь исправить это в последующих изданиях)

Опять вдогонку. Интересно, как будет работать усилитель при отключении/включении нагрузки. В этот момент усиление транзисторного усилителя может скакнуть в бесконечность со всеми вытекающими.

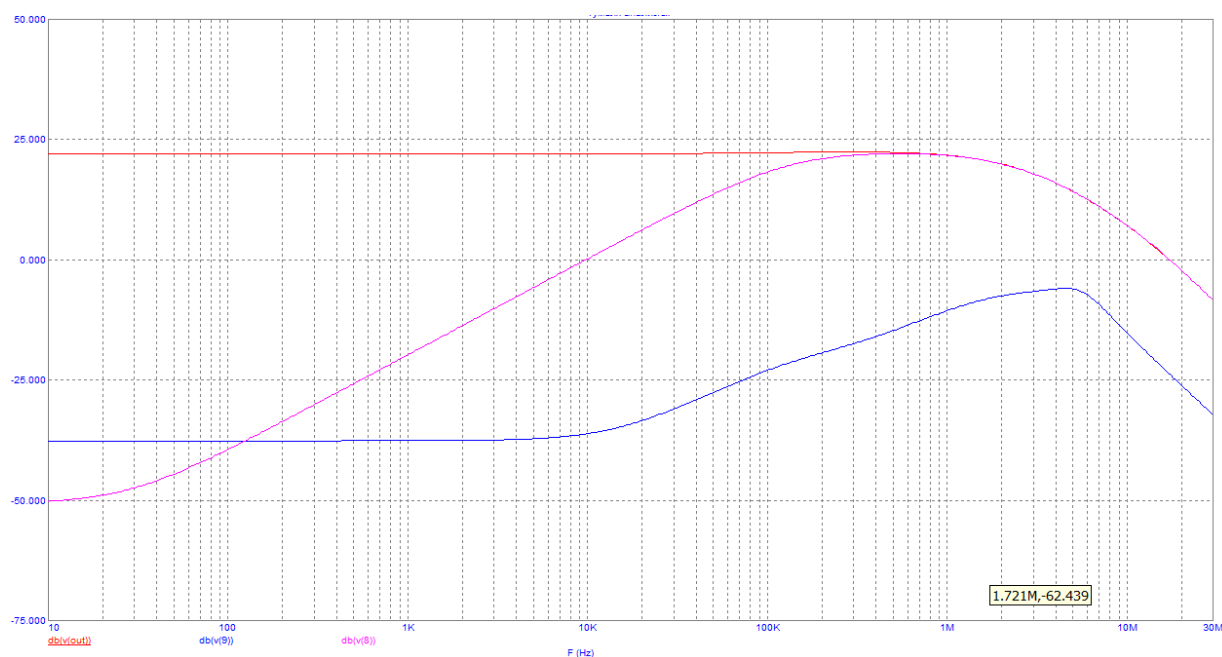


Рисунок 1 АЧХ усилителя без нагрузки.

Как видим, с точки зрения устойчивости практически ничего не изменилось. Стоит отметить увеличение усиления транзисторной части с 23 до 60 дБ в низкочастотной части. Однако такое усиление не приводит к какой-либо катастрофе, поскольку с ростом частоты падает сопротивление конденсатора $C3$. В результате в качестве нагрузки начинает выступать резистор $R10$, что в общем снижает усиление каскада на высоких частотах до приемлемого значения. Кроме того, с ростом частоты увеличивается ООС того же каскада через ту же емкость, что в свою очередь снижает и стабилизирует к-т усиления с повышением частоты.

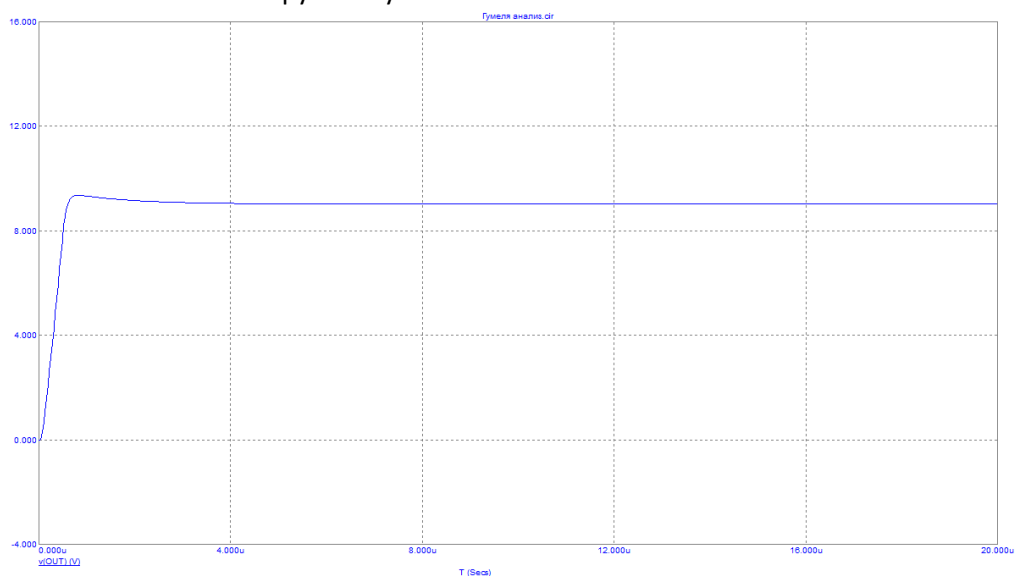


Рисунок 2 Переходная характеристика усилителя без нагрузки.

Переходная характеристика также не дает особых поводов для беспокойства.

Ладно, продолжаем разговор.

Внимательный читатель, наверно, уже заметил, что полоса пропускания усилителя составляет порядка 2М, даже несмотря на довольно тормознутые транзисторы ВК и первый полюс на 1 кГц (имхо). А частота единичного усиления уползает куда-то к 20М. С этой точки зрения усилитель является довольно продвинутым.

А теперь посмотрим, что нам скажет переходная характеристика.



Рисунок 3 Переходные характеристики в интересных точках.

Верхняя эпюра – напряжение на выходе усилителя, средняя – ток выхода ОУ (через R10), на нижней зеленым – ток нижнего транзистора ВК, красным – верхнего. В общем, особо ничего нового. В моменты действия переднего и заднего фронтов входного импульса на выходе ОУ имеются всплески тока. Их длительность определяется временем прохождения сигнала со входа на выход, которое зависит от скорости перезаряда неких емкостей в усилителе. После захвата выходного сигнала цепью ООС выброс снижается, и ООС входит в режим слежения, при этом в поддержании выходного тока ОУ нет необходимости, он уменьшается до разумных пределов.

Для поддержания адекватного тока перезаряда емкостей (называть СЗ не хочется, хотя других тут нет) по выходу ОУ необходимо задать вполне конкретную амплитуду тока. Посмотрим, во что это выльется в предельном режиме. Масштаб слегка изменим. ВК вгоняем в отсечку, без начального тока.

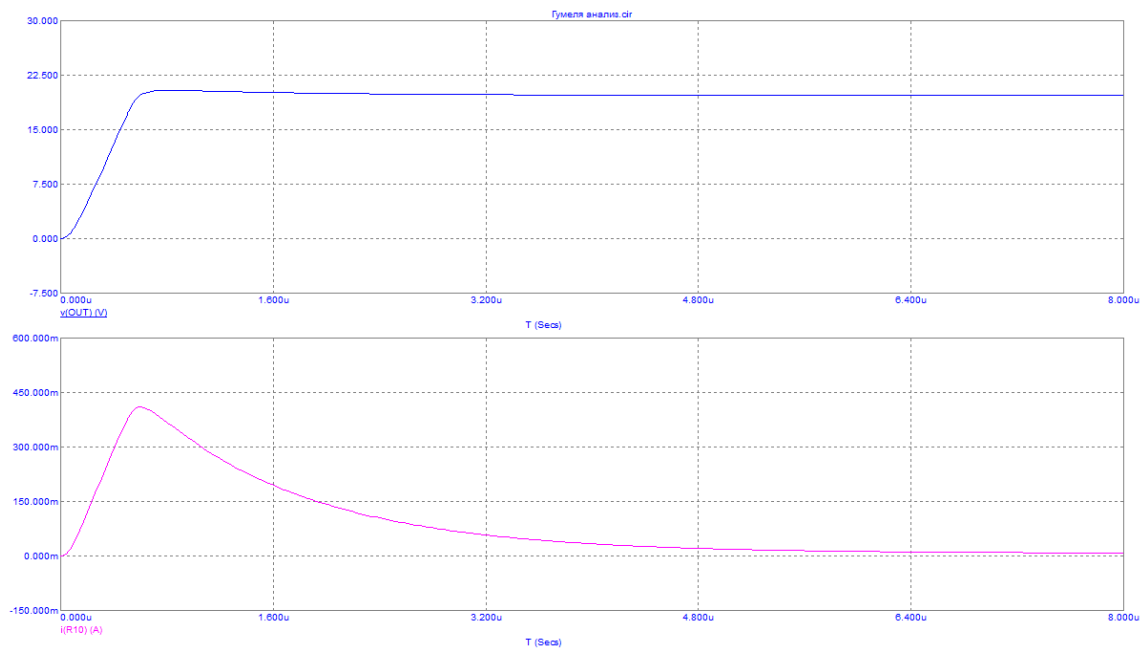


Рисунок 4 Переходные характеристики на выходе ОУ.

На верхней эпюре – выходной импульсный сигнал, его амплитуда для более надежного запугивания читателя выбрана максимальной для используемого питания. Нижняя эпюра демонстрирует бросок тока на выходе ОУ. На ней видно, что в экстремальной точке значение тока составляет 420 мА. Не знаю, насколько адекватна математическая модель AD825, но СИМ ее отработывает, правильно или нет, но ток, который снимается с ОУ, кажется весьма завышенным. Но это и хорошо, так как вынуждает задуматься о влиянии данной характеристики усилителя на выходные параметры. Допустим, 825 – опер с повышенной нагрузочной способностью. А что нам поведают другие? Тут опять придется рисовать схему выходного каскада. Начнем с 140УД7.

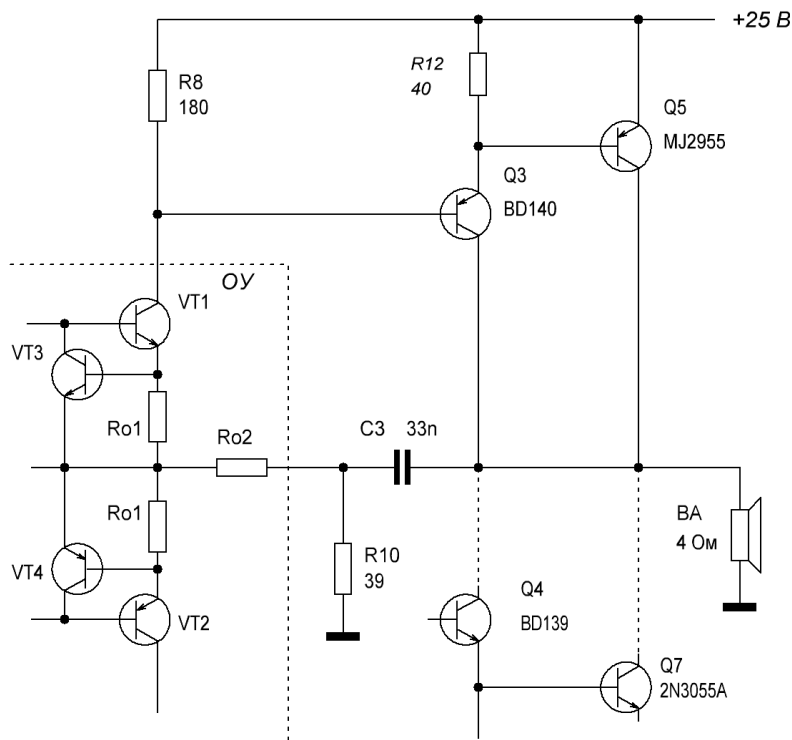


Рисунок 5 Схема выходного каскада ОУ.

Транзисторы VT3, VT4 выполняют функции защиты при превышении выходного тока ОУ. Если напряжение на Ro1 под действием выходного тока достигает 0,6В эти транзисторы открываются, и выходной ток стабилизируется на достигнутом уровне. Для 140УД7 резисторы равны 30 Ом. Отсюда выходной ток в ограничении равен $0,6/30=20$ мА. И все! Сравнивая полученное значение с необходимым, понимаем, что перезаряд емкости происходит медленнее в $420/20=21$ раз. Т.е., время нарастания выходного напряжения возрастет в 21 раз. Если учесть, что время нарастания на картинке примерно 0,6 мкс, то для ОУ 140УД7 это время составит $0,6*21=12,6$ мкс. Ну и скорость нарастания $20,4В/12,6мкс=1,6В/мкс$. Неплохо, да? Скорость нарастания рассматриваемого усилителя равна 1,6 В/мкс только потому, что в выходном каскаде ОУ присутствует ограничение по току. Желающие могут посчитать полосу большого сигнала. И это еще мы не учли собственную довольно малую скорость нарастания ОУ. Но нам это не особо надо, поскольку мы исследуем физику процесса.

А что же TL071-й? А здесь все неплохо. Исключая Motorola. В ней-то как раз и присутствует такой каскад. Он, правда, выполнен слегка по другой схеме, но принцип тот же. И ток ограничения у него задается резистором 24 Ом. Проведя предыдущий расчет, получим скорость нарастания 2,0 В/мкс. Это для скоростного ОУ!

В других TL071 такого ограничения тока нет, по крайней мере, не просматривается. Однако, раньше мы рассмотрели структуру выходного каскада, где было выявлено наличие резисторов на пути выходного тока. Так, для ST Microelectronics их сумма равна $100+200+39=339$

Ом. При этом максимальный выходной ток составит $15\text{В}/339=44\text{ мА}$. На самом деле меньше, потому что выходное напряжение (имеется ввиду, внутреннее для ОУ) не достигнет 15 В. В этих условиях скорость нарастания составит 3,6 В/мкс. Таки опять не очень, я бы сказал.

Посмотрим на 544УД2. В нем применен свой способ ограничения тока, несколько более сложный. Тем не менее, просматривается: $0,6/36=17\text{ мА}$. Ну, что есть.

Вывод: здесь, как и в частотном анализе, параметры усилителя зависят, похоже, даже еще в большей степени, от параметров применяемых ОУ. Даже применение скоростных оперов одной серии не дает гарантии не только качественных параметров, но и их повторяемости. В каждом случае необходимо рассматривать внутреннюю структуру ОУ.

ЛИРИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ

Рассмотрим еще одну фишку о влиянии начинки ОУ. Для этого придется воспользоваться схемой от ST Microelectronics.

TL071 - TL071A - TL071B

SCHEMATIC DIAGRAM

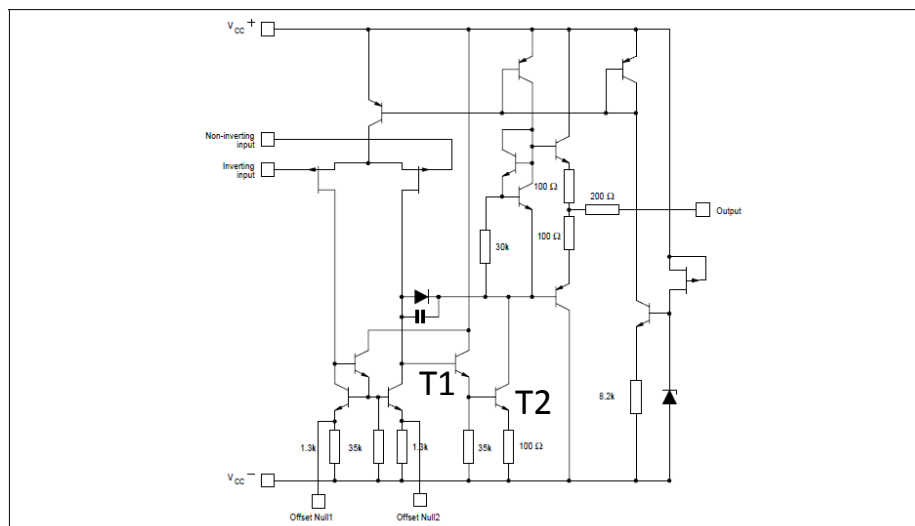


Рисунок 6 Начинка ОУ.

На ней хорошо видно, что выходные каскады ОУ соединены непосредственно с выводами питания ОУ. Кроме них, с питанием соединен транзистор T1, служащий повторителем для T2. Остальные каскады ОУ включены в питание через стабилизаторы тока.

Предположим, что на вход усилителя (имеется ввиду - от Гумели) подается импульсный сигнал. Как мы видели ранее, в начале процесса цепь ООС не замкнута, выходной каскад ОУ обеспечивает ток перезаряда емкости, как может, и находится в одном из крайних положений. В этот момент внутри ОУ наступает Армагеддон. Входной каскад перегружен, все транзисторы усилителей смещены в крайние по питанию положения, все ждут замыкания ООС. В том числе и предвыходной каскад. А теперь предположим, что T1 находится в насыщении, T2 - тоже в насыщении. При этом по цепи коллектор T1/база-эмиттер T2/резистор 100 Ом течет ток. Величину его можно оценить из следующих соображений.

По даташиту выходное линейное напряжение этого ОУ может быть до -13,5 В. Предполагая, что, раз ОУ в предельном режиме, то T2 также будет в предельном, т.е., в насыщении. Так как нам обещали -13,5 В в линейном режиме, то, скорее всего, напряжение в насыщении коллектора T2 будет не меньше. Напряжение базы транзистора в этом режиме обычно больше, чем между коллектором и эмиттером. Но, поскольку речь идет о фиксации эффекта, примем его условно, равным 0,6В. Тогда ток через резистор в эмиттере T2 составит $(15-13,5-0,6)/100=9\text{ мА}$. В данном случае речь идет именно о базовом токе, так как ток питания всего

ОУ составляет 2 мА и стабилизирован источниками тока. Ну а базовый ток течет прямо через коллектор Т1 и на выводы питания. Как все уже поняли, этот ток – сквозной.

Масштабы разрушения можно посмотреть

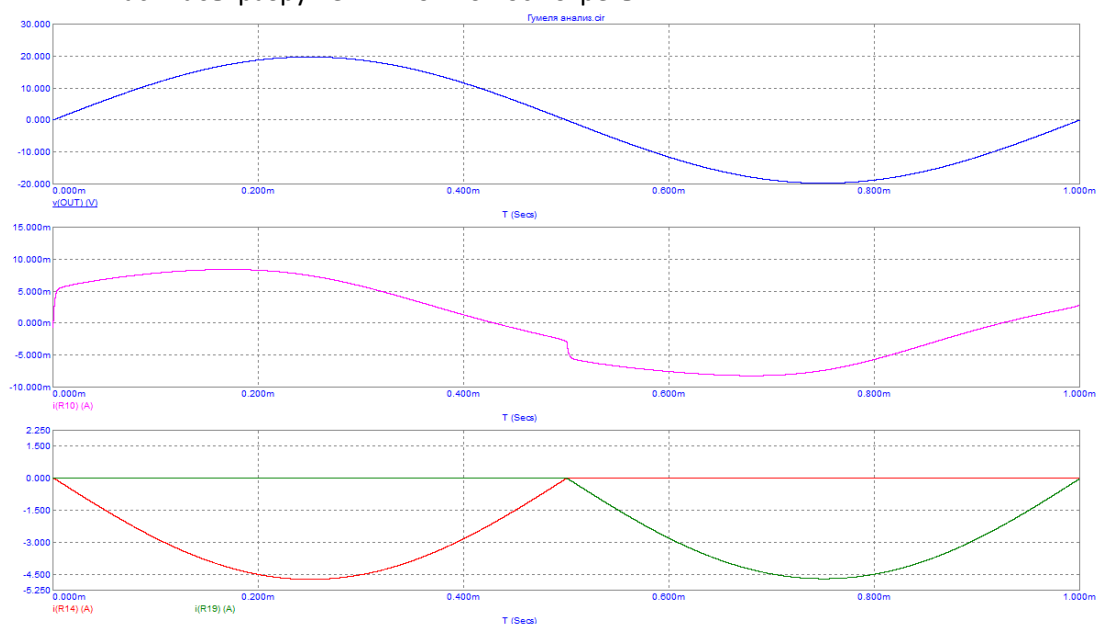


Рисунок 7 Проверка выходного тока.

Здесь верхняя эпюра – выходное напряжение, средняя – выходной ток ОУ, нижняя – токи ВК. Глянем на среднюю. Максимальный ток в данном случае составляет 8,5мА, т.е., он даже меньше рассчитанного. Если в ОУ вдруг возникнет сквозной ток такого уровня, то в ВК также будет сквозной ток соответствующего уровня – 4,8 А. Надеюсь, запугать удалось ☺. Но, даже если я ошибся, даже на порядок, проблема сквозных токов все равно имеется.

Необходимо отметить, что внутренняя структура различных ОУ различна (круто сказано! ☺). 544УД2 не имеет сквозного каскада, так как все его транзисторы включены через источники тока, что должно стабилизировать изменения потребляемого тока в граничных режимах. Каскады TL071 от Motorola также включены через токовые источники. 140УД6/УД7 отдаю на растерзание читателю.