

Забыл. Вдогонку. Надо бы посмотреть зависимость устойчивости от сопротивления нагрузки. Увеличиваем нагрузку до 8 Ом. Смотрим.

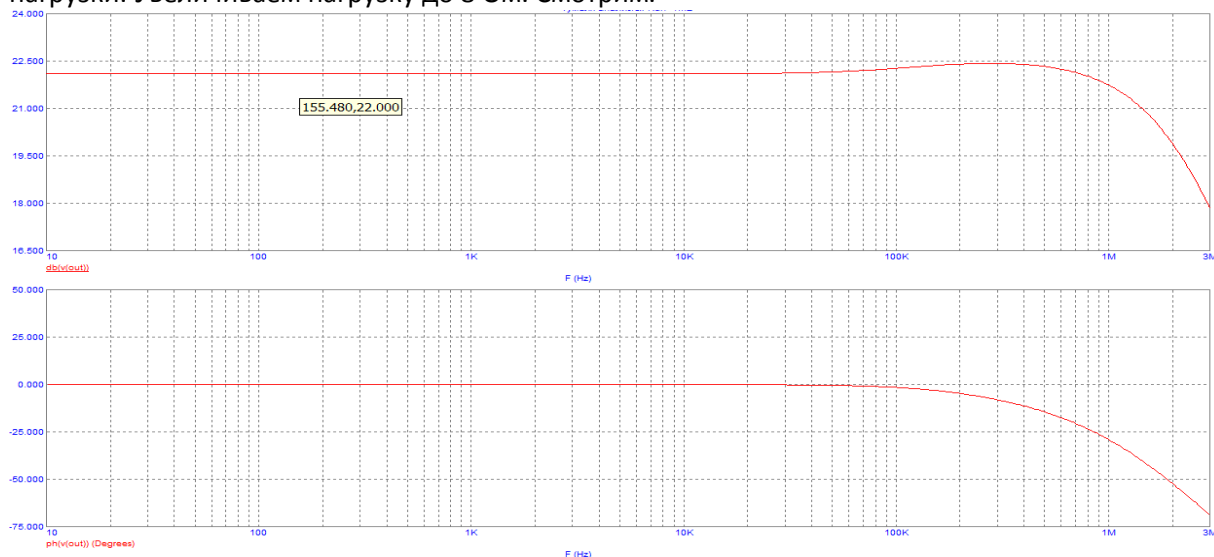


Рисунок 1 АФЧХ с 8 Ом нагрузки.

Практически ничего не изменилось.

А теперь интересно бы посмотреть, что делается в характерных точках усилителя. Их не так уж много: 1 – на выходе ОУ, 2 – в базах предвыходных транзисторов, 3 – собственно, выход, для контроля. Начнем с АЧХ. Начальный ток оставляем, нагрузка 4 Ом, ООС замкнута.

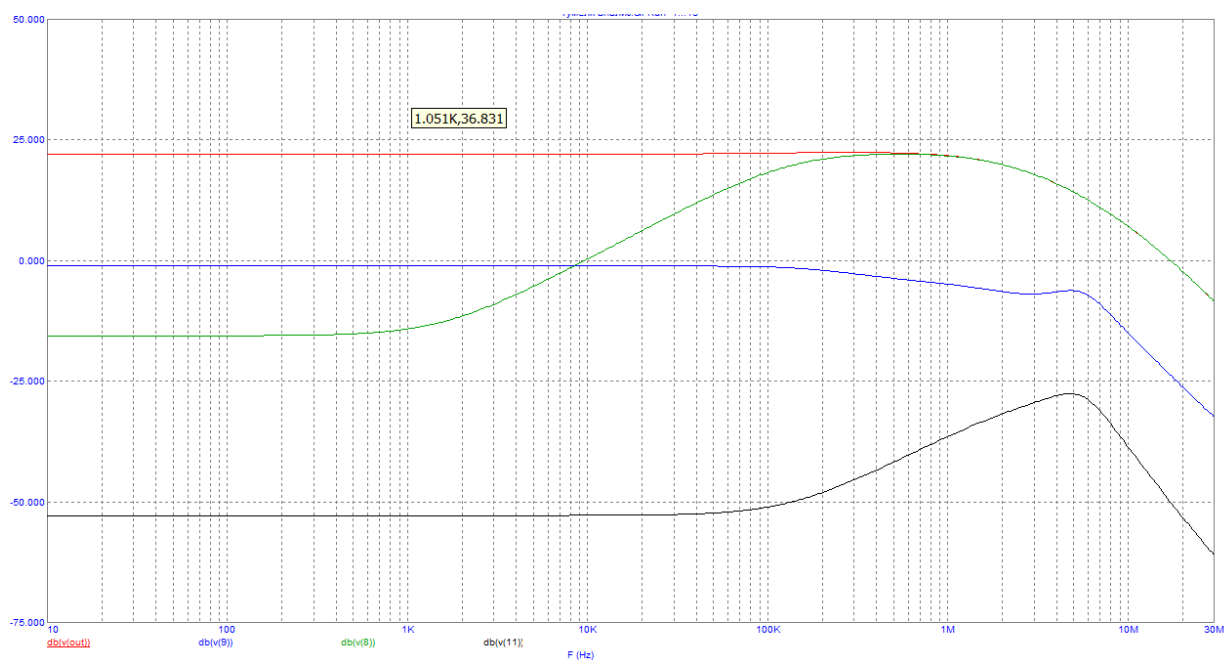


Рисунок 2 АЧХ в характерных точках.

Здесь красным – конечная АЧХ, синим – АЧХ на базе нижнего транзистора Q4, черным – на базе верхнего транзистора Q3, зеленым – на резисторе R10 (выход ОУ).

Что можно сказать? Для начала – черный график. По большому счету сигнал в верхнее плечо усилителя в исходном, линейном, режиме не доходит, подавление составляет порядка 53 дБ. Некоторый рост начинается с частоты 100к, хотя сигнал остается все равно малым, с этим ростом попробуем разобраться потом.

По минусовому плечу картинка иная. Здесь уже уровень сигнала равен -1 дБ. Относительно выхода ОУ разность составляет 14,5дБ (НЧ, до 3к, где еще не действуют частотные зависимости). В

данном случае эта разность – к-т усиления усилителя на VT1 из ОУ (см. Как это работает). Мы его посчитали равным 4,6 (13,3 дБ). В данном случае у нас резистор 220 Ом, поэтому к-т усиления $220/39=15\text{дБ}$. Ну, минус еще входное сопротивление транзистора Q3. Как бы совпадение хорошее.

ЛИРИЧЕСКОЕ ОТСТУПЛЕНИЕ.

Если внимательно проанализировать схемотехнику выходных каскадов ОУ, то можно заметить, что обычно они имеют следующий вид.

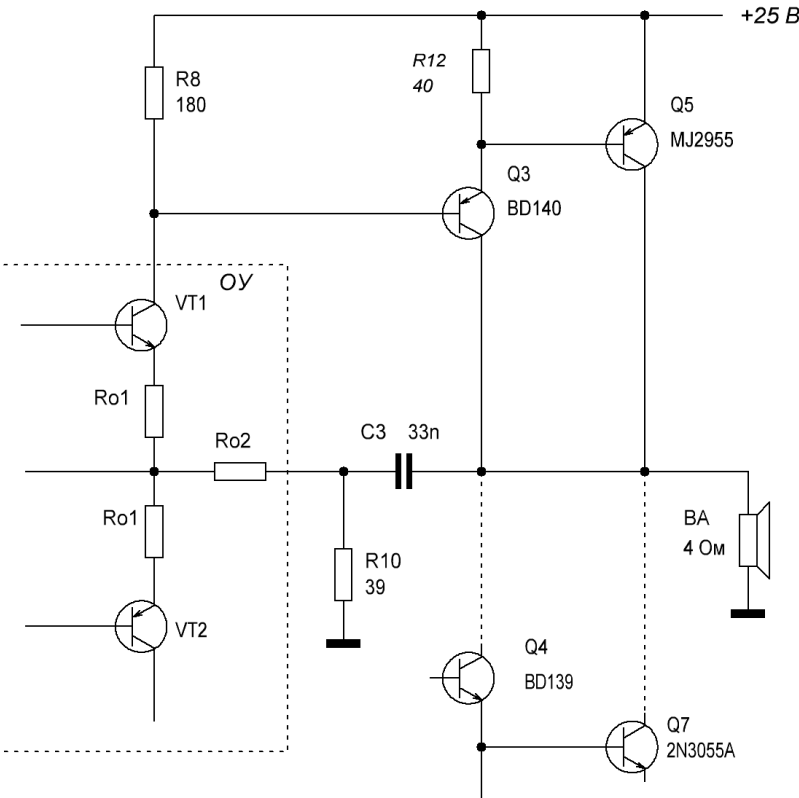


Рисунок 3 Схемотехника выходного каскада ОУ.

Как видим, на самом деле к-т усиления будет зависеть не только от резистора R10, но и от внутренних резисторов операционного усилителя. Масштабы проблемы можно оценить из следующих данных. Примеры 1-4 для TL071, как стандартного ОУ, но от разных производителей.

№ п/п	Производитель ОУ	Ro1 Ом	Ro2 Ом	R8 Ом	К-т усиления каскада на VT1, дБ
1.	ST Microelectronics	100	200	220	-3,8
2.	Motorola	0	0	220	15
3.	SGS Thomson Microelectronics	100	200	220	-3,8
4.	Texas Instruments	64	128	220	-0,4
5.	544УД2	36	0	220	9,3
6.	140УД7	30	0	220	10,1
7.	140УД6	30/50	0	220	10,1/7,9
8.	AD825	8	0	220	13,4

Видим, что диапазон изменения коэффициента усиления усилителя на выходном транзисторе ОУ изменяется от -3,8 до 15 дБ, т.е., почти в 10 раз. Если считать, что коэффициенты усиления ОУ примерно одинаковы, порядка 90 дБ, то применение в конкретной схеме даже разных ОУ с надписью на

корпусе «TL071» может привести к странному эффекту: из-за разных к-тов усиления выходного каскада меняется к-т усиления всего усилителя без ООС. Тогда при введении ООС меняется глубина обратной связи. Соответственно, меняется подавление паразитных гармонических составляющих. Цена вопроса – 20 дБ. К сожалению, вывод достаточно умозрительный, потому как для сима адекватной модели не имею.

Смотрим дальше: к-т усиления от базы Q4 до выхода составляет около 23 дБ. Раньше мы посчитали что-то около 80. Здесь пока тоже без комментариев.

Обращает на себя внимание следующее. В начальном режиме по постоянному току усилитель устанавливается с небольшим «перекосом». Т.е., начальное смещение по выходу составляет -14мВ. Для этого выходной каскад ОУ должен обеспечить ток в минусовом плече, достаточный для начального смещения выхода. При этом ток в положительном плече не течет (нет усиления по переменному току). Это означает, что комплементарный каскад из выходных транзисторов ОУ имеет зону отсечки, когда оба транзистора заперты. Тогда для нашего усилителя в начальном режиме нижний транзистор находится в активном состоянии, а верхний – в отсечке.

Такая работа каскада обеспечивает поочередное включение верхнего и нижнего трактов усиления сигнала, без влияния на противоположный.

Однако и здесь имеется одно лирическое отступление. В TL071 от Motorola между базами и эмиттерами стоит резистор. Это означает, что оба транзистора могут находиться в активном состоянии в течение всего периода усиления сигнала. Хорошо это или плохо – пока сообразить не могу.

И еще один момент – интересное поведение АЧХ на выходе ОУ. Об этом позже.