

## МКУС в УМЗЧ с крайне глубокой стопроцентной ООС на ВЧ.

В этом нет ничего нового  
Ибо вообще ничего нового нет.  
Н. Рерих

В целом эта статья продолжает тему МногоКанальных Усилительных Структур (МКУС) в звуковых усилителях мощности, поднятую в публикациях [1, 2, 3]. Там же даны теоретические аспекты и обоснованы минимальные требования предъявляемые к УМЗЧ.

Данный УМЗЧ, безусловно, представляет собой более совершенную конструкцию по сравнению с версиями многоканальных УМЗЧ представленных в [1, 2, 3], так как обладает стопроцентной, на высоких частотах (ВЧ), крайне глубокой ООС. Совокупное усиление его каналов более 150 дБ на частоте 20кГц, что позволяет получить очень низкий коэффициент искажений (0.0002%). Но не смотря на это, усилитель не является схемотехнически сложным устройством, поэтому его допустимо отнести к классу упрощенных версий УМЗЧ.

Следует отметить что самой идее многоканального усиления уже более полувека, тем не менее о её большой популярности к сожалению говорить не приходится. Между тем именно МногоКанальные Усилительные Структуры позволяют резко улучшить ряд основных (ключевых) параметров УМЗЧ. А именно обеспечить, крайне малое время реакции петли ООС (ВРП ООС) и соответственно высокие перегрузочные каскадов, широкую полосу работы ООС, большой запас усиления внутри петли ООС.

### Критерии и принципы ООС:

Произведем оценку влияния критериев ООС на параметры усилительных каскадов и УМЗЧ в целом. Основным критерием оценки качества работы ООС следует считать параметр Время Реакции Петли ООС (ВРП ООС =  $T_z$ ) или аналогичный параметр Частота Замыкания Петли ООС (ЧЗП ООС= $F_{зам} = 1/T_z$ ). Как отмечено в [1] ВРП ООС должно быть крайне малым и в следствие чего ЧЗП ООС получается предельно высокой. Это необходимо для обеспечения высоких перегрузочных характеристик каскадов, в том числе и в области частот близких к частоте замыкания петли ООС [2]. В этом случае, уровни сигналов, помех, и пр, на частотах близких к  $F_{зам}$ , весьма небольшие. При увеличении ВРП ООС (понижении  $F_{зам}$ ) работа петли ООС, как правило, приобретает прерывистый характер. В свою очередь это приводит к значительным ошибкам в системе авторегулирования с обратной связью, что обусловлено размыканием ООС в нелинейных динамических режимах. Этим создаются условия для резкого расширения спектра искажений, обвального роста интермодуляции высоких порядков [1] и шумоподобной интермодуляции [2], а также весьма существенно увеличиваются проявления джиттероподобных искажений [1].

Как сказано выше ВРП ООС должно быть крайне малым, что необходимо для качественной работы ООС. Однако понятно что в конкретных усилителях ВРП ООС принимает конкретное значение. Например ВРП ООС равно 10нс ( $F_{зам} = 1/10нс = 100МГц$ ), это много или мало? Для частоты сигнала в 1кГц при  $F_{зам} = 100МГц$ , получим достаточно высокое качество работы ООС. В свою очередь для частоты сигнала в 1МГц при  $F_{зам} = 100МГц$ , получим относительно низкое качество работы ООС.

Соответственно оценивать качество работы ООС, для отдельно взятого сигнала, следует на основе отношения частоты замыкания петли ООС ( $F_{зам}$ ) к частоте исходного сигнала.

Основным критерием эффективности работы ООС следует считать охват усилителя (или каскадов) достаточно глубокой стопроцентной ООС на ВЧ [2]. Большой запас усиления внутри петли ООС - есть совершенно необходимое (обязательное) условие для обеспечения высоких перегрузочных и соответственно высоких линейных характеристик усилителя (каскадов), в полосе работы ООС. Особенно эффективна стопроцентная ООС при большом запасе усиления в инвертирующих усилителях (каскадах). Так как фактически ООС переносит (перенаправляет) общее усиление, во внутрь петли ООС. Соответственно (на ВЧ) коэффициент усиления ( $K_{ус}$ ) усилителя сильно уменьшается, а запас усиления внутри петли ООС увеличивается, в том числе и на частотах выше частоты единичного усиления УМЗЧ. При этом искажения снижаются как бы дважды. Во первых за счёт снижения уровня ВЧ сигнала (зависимость близка к кубической [1]) и далее за счёт роста усиления внутри петли ООС.

Одновременно необходимо обратить внимание на следующий негативный момент. Введение общей стопроцентной ООС, фактически соединяет вход усилителя (каскада) с его выходом. В целом это общепринятое (стандартное) решение для очень многих схем в звукотехнике. Тем самым, паразитные сигналы (искажения, шум, помехи, и т.д.) попадают на вход усилителя (каскада). Если это происходит в полосе работы ООС, то ООС подавляет (компенсирует) эти сигналы, собственно это и есть её основная функция. Если же это происходит на частотах выше полосы работы ООС (т.е. на частотах близких к  $F_{зам}$ ), то этим создаются условия для циркуляции этих паразитных сигналов в среде УМЗЧ, со всеми вытекающими отсюда последствиями [2].

Соответственно можно сделать вывод что, стопроцентная ООС ужесточает требования к перегрузочным характеристикам каскадов на частотах выше полосы работы ООС (область частот близких к  $F_{зам}$ ). Они должны быть очень высокие, а усиление (на этих частотах) для всех каскадов предельно низким [1]. Здесь следует обратить внимание, на то что стопроцентная ООС на ВЧ в инвертирующих усилителях (каскадах), обладает очень ценным свойством, фактически представляя собой входной фильтр низких частот.

Кратко следует коснуться и такого параметра как скорость нарастания напряжения на выходе реально работающего УМЗЧ. В качественном усилителе скорость нарастания напряжения на выходе УМЗЧ весьма низкая, что жестко обусловлено наличием в усилителе общей стопроцентной ООС на ВЧ [2].

Обычно считается что данный параметр (скорость нарастания напряжения на выходе УМЗЧ при включенной ООС) характеризует перегрузочные характеристики выходного каскада усилителя. Однако это не совсем корректно. Более точно оценивать перегрузочные характеристики выходных каскадов усилителей следует на основе относительного коэффициента равного отношению скорости нарастания выходного напряжения с отключенной ООС, к скорости нарастания выходного напряжения с включенной ООС ( $K_{отн} = V_{оос\ откл} / V_{оос\ вкл}$ ), при фиксированном входном сигнале.

Так например радиочастотные ОУ, как правило, имеют высокие перегрузочные характеристики выходного каскада и весьма высокую скорость нарастания выходного напряжения при отсутствии ООС. При охвате данного ОУ общей стопроцентной ООС на ВЧ, мы получим весьма низкую скорость нарастания выходного напряжения на выходе ОУ. Тем самым коэффициент отношений ( $K_{отн}$ ) скоростей нарастания на выходе ОУ будет большим, соответственно и перегрузочные характеристики по скорости нарастания будут высокими. Для усилителя (УМЗЧ) у которого отсутствует общая стопроцентная ООС на ВЧ, получим коэффициент отношений ( $K_{отн}$ ) скоростей нарастания равный единице.

Несколько слов следует уделить и такому понятию как фаза или фазовая задержка. В целом фаза легко контролируемый и легко изменяемый параметр. Следует подчеркнуть что изменение фазы исходного сигнала ни как не влияет на характеристики усилителя. Но при

этом обязательно должны быть устранены (подавлены) паразитные резонансные процессы, а также обеспечено крайне малое ВРП ООС.

## Выводы и следствия:

Конечно, высокие перегрузочные характеристики каскадов можно получить при помощи режимов с очень большими напряжениями и токами покоя. Не исключено их применение и в выходном каскаде УМЗЧ, однако на сегодняшний день такой подход следует считать деструктивным. Более рационально и правильно, высокие перегрузочные характеристики каскадов, в звуковом диапазоне, получить при помощи крайне малого ВРП ООС [1] и крайне глубокой стопроцентной ООС на ВЧ. Особо следует отметить что крайне глубокая ООС эффективно компенсирует (подавляет) любые виды искажений. В том числе и в выходных каскадах работающих в режиме класса С, D или их модификациях.

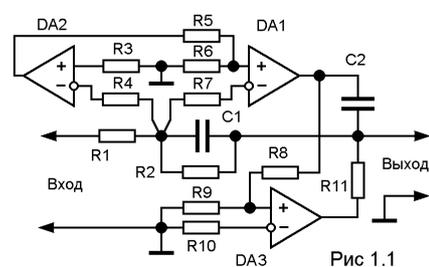
В общем и целом, любой усилитель можно рассматривать как дискретное (цифровое) устройство. Соответственно ВРП ООС, это время между дискретными (цифровыми) отсчётами сигнала, а частота замыкания петли ООС это частота дискретизации. Уменьшение весовых значений между ближайшими цифровыми отсчётами, при уменьшении ВРП ООС, улучшает точность и качество работы ООС. В соответствии с этим наличие какого либо ВЧ сигнала с частотой равной или выше частоты дискретизации недопустимо. В противном случае часть энергии ВЧ сигнала автоматически переносится в низкочастотную область т.е. в звуковой спектр. Точность и качество работы ООС улучшается и при понижении частоты исходного (рабочего) сигнала, тем самым усилитель должен обладать высоким быстродействием, но узкой полосой пропускания.

Низкая частота дискретизации (низкая  $F_{зам}$ ) особенно при форсировании усиления на этих частотах (близких к  $F_{зам}$ ) и низких перегрузочных характеристиках, как правило ведет трансформации типичных искажений (гармоники и интермодуляция), в атипичные (интермодуляция высоких порядков [1], шумоподобная интермодуляция [2], заметный рост проявлений джиттероподобных искажений [1]). Именно атипичные искажения приводят к потере прозрачности и увеличению жесткости звучания, ухудшению чёткости локализации звуковых образов, примешивают к звенящим составляющим шипящие призвуки.

Для реализации высокого быстродействия (крайне малого ВРП ООС), усилителей звуковой частоты, следует применять элементы СВЧ или КВЧ диапазона. Здесь очень привлекательно выглядит применение радиочастотных ОУ, которые скорректированы по частоте до единичного коэффициента усиления ( $K_{ус}=1$ ). Причём целесообразно применять (или разрабатывать) такие ОУ которые допускали бы возможность частотной коррекции как  $K_{ус}=1$  так и  $K_{ус}=0,5-0,7$ .

## Структура УМЗЧ:

Рассмотрим структурную схему рис 1.1 трехканального инвертирующего усилителя приведенную в [1] (рис 1). Здесь DA1 главный канал усилителя, обладающий приоритетом на замыкание петли ООС, а усилители DA2 и DA3 образуют дополнительные каналы, действующие по критерию подавления сигнала соответственно на входе и выходе DA1[1]. При чём DA2 прецизионный ОУ работающий в малосигнальном режиме. Временно упростим данную схему и исключим DA3, а также R3; R4; R7. Рассмотрим полученную структурную схему рис 1.2 с критической точки зрения, имеются ли у данной схемы какие либо недостатки? Да такие недостатки есть. Основной недостаток, это возможность прохода нелинейного (предискаженного) сигнала с выхода DA2 во внутрь петли ООС, через нелинейное входное сопротивление DA1. Безусловно,



влияние подобной нелинейности на характеристики УМЗЧ весьма мало. Однако для усилителя с тенденциозно высокими параметрами подобные проявления должны быть исключены полностью. Введение разделительного конденсатора на входе DA1 рис 1.3 несколько улучшает характеристики усилителя, но в целом вопрос остается открытым.

Рассмотрим усилитель на рис 1.4, данная схема фактически идентична приведённой на рис 1.2. Однако в ней имеются определённые отличия, в частности каждый элемент петли ООС (R1; R2; C1) выполнен двойным, причём  $R1.1 = R1.2$ ;  $R2.1 = R2.2$ ;  $C1.1 = C1.2$ . При наличии переключки П1 схема на рис 1.4 полностью идентична приведённой на рис 1.2. Однако если переключку П1 разорвать (исключить), то это не приведёт к каким либо существенным изменениям в работе усилителя, что обусловлено идентичностью цепей ООС. В тоже время, разрыв переключки исключает попадание предискаженного сигнала с выхода DA2 во внутрь петли прецизионной ООС (R1.2; R2.2; C1.2), тем самым усилитель на рис 1.5 приобретает весьма ценное качество.

В целом соблюдать идентичность цепей ООС ( $R1.1 = R1.2$ ;  $R2.1 = R2.2$ ;  $C1.1 = C1.2$ ) необязательно. Однако обязательно следует обеспечить точность (идентичность) коэффициентов передачи этих ООС. Что выполняется при условии пропорциональности (равенства отношений номиналов) элементов ООС  $R1.1/R1.2 = R2.1/R2.2 = C1.1/C1.2$ .

Дополнительный усилитель DA2 на рис 1.5 можно рассматривать как внешний селектор искажений, а саму структуру усилителя в целом, как схему с многопетлевой (многоканальной) ООС. Однако важно не то с каких позиций рассматривать данный усилитель, а те обязательные условия выполнение которых обеспечивает безукоризненную (высокоточную) работу ООС и данной структуры в целом. Повторим их ещё раз, это достаточно высокие перегрузочные характеристики главного канала (DA1), что в первую очередь обусловлено крайне малым ВРП ООС при широкой полосе работы стопроцентной ООС на ВЧ.

Соответствии с этим в качестве DA1 может быть использован любой усилитель который бы соответствовал данным требованиям. Причём не имеет ни какого значения выходная мощность данного усилителя. Это может быть как ОУ, так и мощный УМЗЧ. Данным требованиям например удовлетворяют версии многоканальных УМЗЧ [2, 3].

## УМЗЧ:

Как отмечено в [3] весьма привлекательно выглядит структура УМЗЧ где мощный выходной каскад максимально упрощён, применение крайне глубокой ООС позволяет получить ультравысокие линейные характеристики данного усилителя.

На основании перечисленных выше доводов и аргументов [1, 2, 3], был разработан вариант усилителя представленный на рис. 2. Фактически данный усилитель представляет собой версию УМЗЧ [3] с дополнительным усилителем (DA2) включенным по входу [1]. Безусловно, таким же дополнительным усилителем (DA2), включенным по входу, может

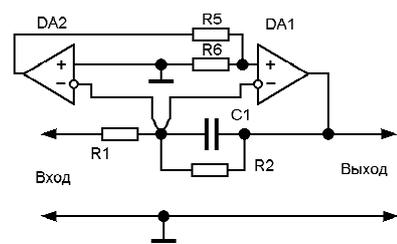


Рис 1.2

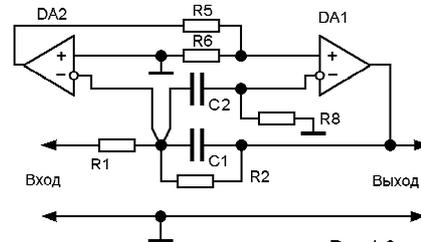


Рис 1.3

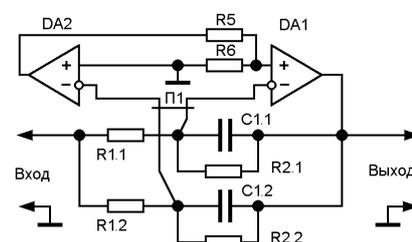


Рис 1.4

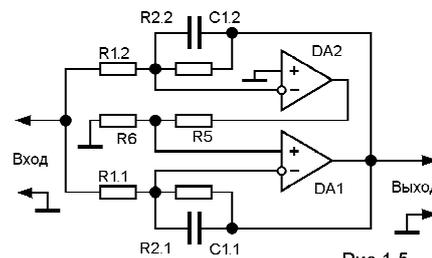


Рис 1.5

# МКУС в УМЗЧ с крайне глубокой стопроцентной ООС на ВЧ.

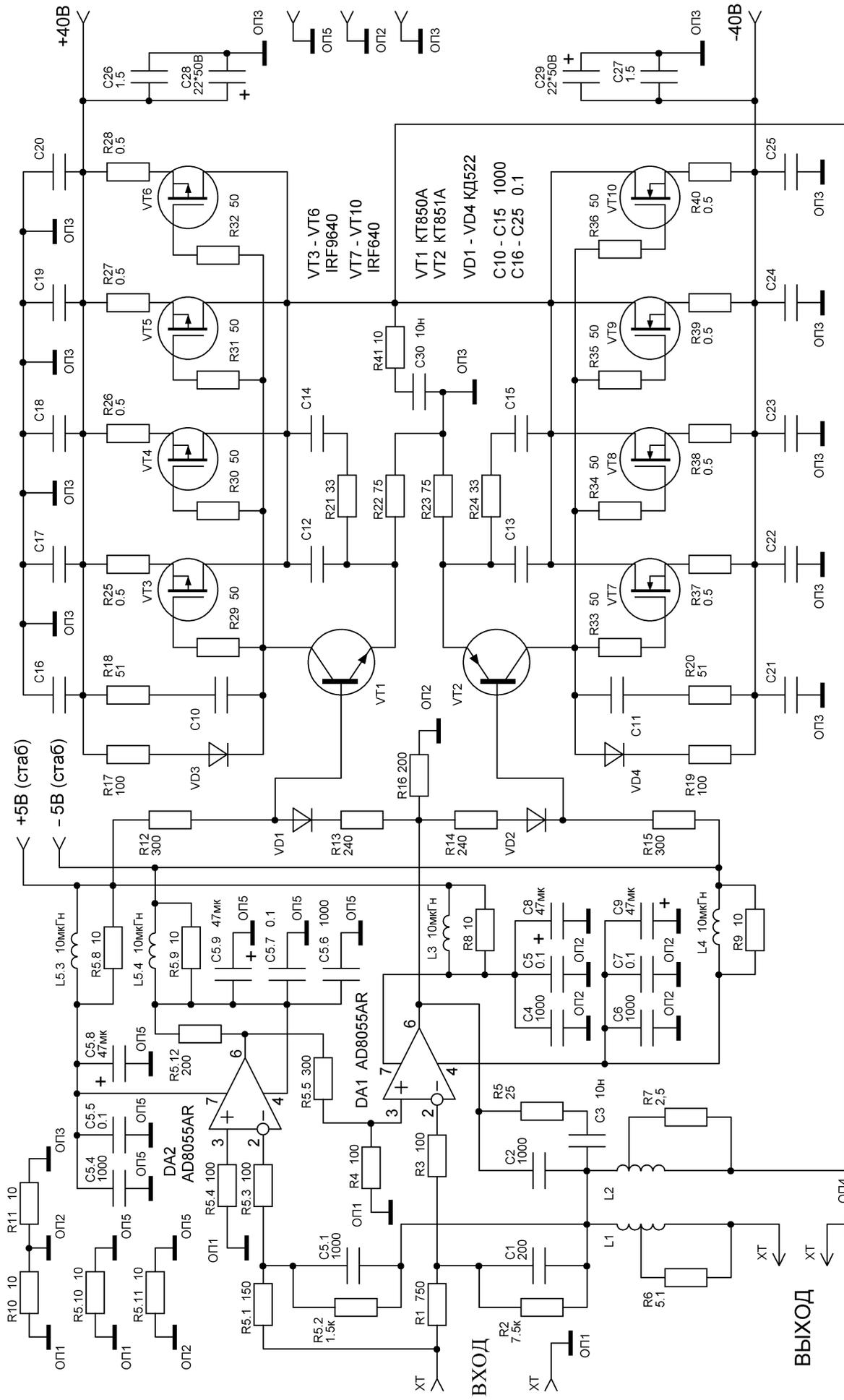


Рис. 2

быть оснащён (дополнен) и вариант УМЗЧ [2]. В силу схожести функций вновь введённые (дополнительные) элементы сохраняют нумерацию главного канала но начинаются с дополнительного префикса (индекса) цифры 5.

Усилитель представленный на рис. 2 и УМЗЧ [2, 3] обладают одинаковой и структурой и типом общей ООС рис. 3, и как следствие идентичными параметрами: широкой полосой работы ООС (200МГц), низкой скоростью нарастания выходного напряжения, низкой частотой единичного усиления (1МГц), низкой частотой среза петли ООС (узкой полосой пропускания по уровню -3 дБ), АЧХ и ФЧХ рис. 4. В качестве главного канала УМЗЧ применён радиочастотный ОУ AD8055AR (DA1). Именно, главный канал обладает приоритетом на замыкание петли ООС [1], и обеспечивает не большое ВРП ООС равное времени задержки этим ОУ. В целом, УМЗЧ охвачен несколькими петлями ООС, общей прецизионной крайне глубокой стопроцентной ООС (С5.1, R5.2) на ВЧ и местной глубокой стопроцентной ООС (С1, R2) на ВЧ, а также местными ООС в выходном каскаде.

Дополнительный усилитель DA2 (AD8055AR) это предварительный прецизионный усилитель, работающий в малосигнальном (статическом) режиме [1]. Малосигнальный режим DA2 реализуется при выполнении нескольких условий. Большим запасом усиления внутри петли ООС главного канала (DA1), а также точностью (идентичностью) коэффициентов передачи ООС главного канала (С1, R2) и прецизионной ООС (С5.1, R5.2). Для прецизионной работы ОУ DA2 необходимо высокое качество общих проводов ОП1, ОП5. Выходной каскад ОУ DA2 работает в режиме класса А, с большим током покоя (R5.12). Делитель R4/R5.5 обеспечивает приоритет главного канала на замыкание петли ООС [1].

Следует отметить что сам ОУ AD8055AR достаточно линейный даже на весьма высоких частотах. Например на частоте 5МГц искажения ОУ составляют порядка 0.01%.

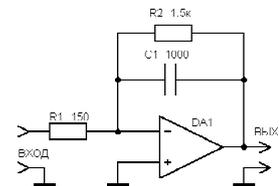


Рис 3

### Краткие технические характеристики ОУ AD8055AR [4]:

1 Скорректирован до $K_{ус}$ =	1
2 Полоса пропускания по уровню (3дБ)	300МГц
3 Частота единичного усиления	~ 200МГц
4 Усиление на частоте 40кГц; 100кГц	70дБ; 60дБ
5 Усиление на частоте 1МГц	40дБ
6 Скорость нарастания	1400В/мкс
7 Время задержки (при большом сигнале)	2.5нс
8 Напряжение шума	6нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$
9 Напряжение питания	+/- 5В
10 Выходное напряжение	+/- 3В
11 Максимальный выходной ток	~ 100ма

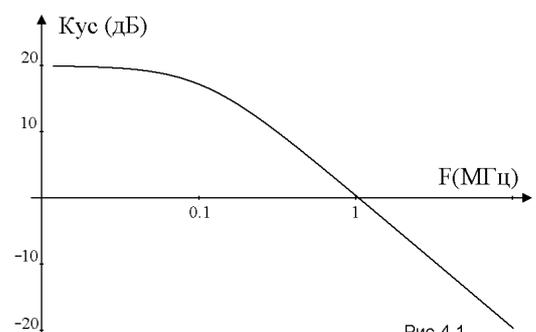


Рис 4.1

### Краткие технические характеристики УМЗЧ:

1. Выходная мощность $R_n = 4\Omega$	120Вт
2. Киск при 20кГц и $U_{вых}$ ампл = 20В	0.0002%
3. Усиление на частоте 20кГц (ООС откл)	150дБ
4. Коэффициент усиления ( $K_{ус}$ )	-10 (20Дб)
5. Полоса пропускания по уровню (-3дБ) (частота среза петли ООС)	100кГц
6. Частота единичного усиления (F1)	1МГц
7. ВРП ООС не более	2.5нс

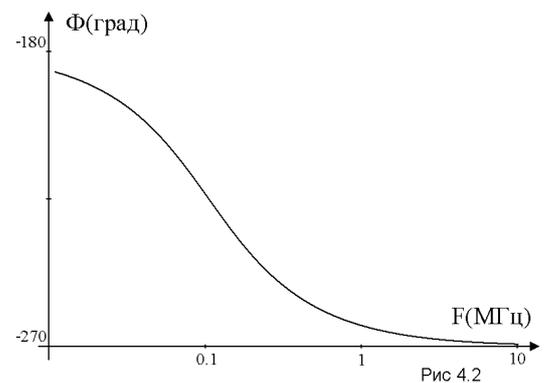


Рис 4.2

Как сказано выше данный усилитель представляет собой версию УМЗЧ [3] с дополнительным усилителем (DA2) включенным по входу. Таким же дополнительным усилителем (DA2) может быть оснащён (дополнен) и вариант УМЗЧ [2]. Входные каскады УМЗЧ [2, 3] идентичны, там же [2, 3] подробно пояснена и работа их выходных каскадов. Кратко принцип работы УМЗЧ заключается в том что, сигнал объединяется на выходе сумматора (точка соединения элементов L2, C2, C3 согласующего устройства) и далее приходит на выход УМЗЧ (верхний вывод L1). Именно к этой точке подключены две цепи ООС. Общая, прецизионная, крайне глубокая, стопроцентная ООС (C5.1, R5.2) на ВЧ и местная ООС главного канала (C1, R2). Дополнительный (предварительный) усилитель DA2 дополнительно усиливает сигнал ошибки внутри прецизионной петли ООС и подаёт его на второй вход главного канала (вывод 3 DA1). Этим, на соответствующую величину, увеличивается запас усиления внутри петли ООС. На частотах до 40кГц дополнительный прирост усиления (внутри петли общей ООС) составляет порядка 58дБ (70дБ –12дБ), а на частотах до 100кГц порядка 48дБ (60дБ –12 дБ). В случае обрыва на выходе DA2 или исключения DA2 и элементов цепи ООС R5.1, C5.1, R5.2, усилитель автоматически превращается в вариант УМЗЧ [3].

### Измерения и настройка:

Как сказано выше, структура, тип и номиналы элементов цепи общей ООС данного УМЗЧ соответствуют усилителю на рис. 3. Соответственно УМЗЧ обладает АЧХ и ФЧХ которые представлены на графиках рис. 4.1 и на рис. 4.2.

На фотографиях рис. 5.1 - рис. 5.4 представлены осциллограммы на выходе главного канала (DA1) и выходе УМЗЧ (измерение в точке соединения L1 и L2), при испытании его синусоидальным или импульсным (меандр) сигналами. Сигнал на выходе DA1, представляет собой усиленную на 70дБ ошибку, внутри петли ООС. На рис. 5.1 представлен режим работы (режим большого сигнала) при синусоидальном входном сигнале ( $U_{вх} = 2В$ , 20кГц) и соответственно выходном напряжении УМЗЧ 20В (амплитуда 29В), без нагрузки. А на рис. 5.2 тот же сигнал, но при сопротивлении нагрузки 40м и соответственно выходной мощности 100Вт. При цене деления соответственно 1В/дел, 10В/дел.

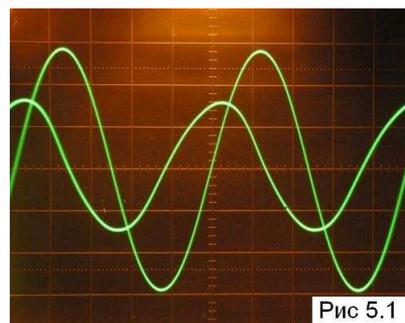


Рис 5.1

Переходная характеристика УМЗЧ, при входном сигнале типа меандр частотой 50кГц, представлена на рис. 5.3 (режим малого сигнала, без нагрузки). Цена деления соответственно 1В/дел, 5В/дел. Из фотографии видно, что сигнал на выходе УМЗЧ (верхний на рисунке) имеет амплитуду около 5В (размах 10В), а также достаточно низкую скорость нарастания выходного напряжения. На рис. 5.4 показан тот-же сигнал, но при нагрузке сопротивлением 40ма, при такой же цене деления.

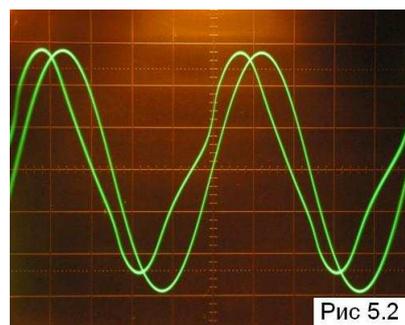


Рис 5.2

В целом условия измерений и осциллограммы представленные рис 5.1 - рис 5.4 соответствуют осциллограммам рис. 5.1 - рис. 5.4 варианта УМЗЧ [3]. Амплитуда и форма сигнала на выходе главного канала (DA1) никак не связана с наличием или отсутствием дополнительного (предварительного) усилителя DA2, так как обусловлена АФЧХ выходного каскада (VT1-VT10).

На рис. 6 представлен режим работы DA1 при номинале резистора R7 в 75 Ом и исходных данных аналогичных рис. 5.3 (размах 7,5В). Увеличение номинала шунтирующего резистора R7 (с 2,5Ом до 75Ом) приводит к резкому увеличению добротности катушки L2

согласующего устройства и соответственно к возникновению высокодобротного колебательного процесса внутри петли ООС.

Можно констатировать что даже большие изменения фазового сдвига, вызванные наличием внутреннего резонанса, не могут существенно (заметно) влиять на выходной сигнал, в том случае если перегрузочные каскады и усилителя в целом, достаточно высокие. На рис. 7.1 представлен режим работы DA2 при исходных данных аналогичных рис. 5.3, а на рис. 7.2 при исходных данных аналогичных рис. 5.4. Цена деления для сигнала на выходе DA2 0,1В/дел.

На фотографиях рис. 8.1 - рис. 8.5 представлены осциллограммы на выходе DA2 и выходе УМЗЧ, при испытании его синусоидальным (20кГц) сигналом. Цена деления для сигнала на выходе DA2 10мВ/дел.

Как было сказано выше, критерием минимума выходного напряжения ОУ DA2 следует считать идентичность коэффициентов передачи ООС главного канала (C1, R2) и прецизионной ООС (C5.1, R5.2). Для выполнения данного условия достаточно произвести точный подбор элементов C1, R2. Оптимальным вариантом, с практической точки зрения, следует считать методику при которой R1 дополняется параллельным резистором, а R2 дополняется параллельным подстроечным резистором их номиналы соответственно в 20-50 раз большие. Далее C1 дополняется параллельным подстроечным конденсатором с номиналом в 10-20 раз меньшим. Например R1доп.=20к, R2доп.=330к, C1доп.=20пФ. После настройки (подбора) номиналов подстроечных элементов (сопротивления R2доп. и конденсатора C1доп.), в схему впаиваются элементы с постоянными номиналами.

Для настройки этих подстроечных элементов (R2доп., C1доп.) рекомендуется подать на вход УМЗЧ синусоидальный сигнал  $U_{вх} = 2В$ , 20кГц, т.е. исходные данные аналогичны рис. 5.1. Далее по минимуму выходного напряжения на выходе DA2 производят регулировку R2доп., а по минимуму фазы сигнала производят регулировку C1доп. рис. 8.1. На рис. 8.1 показан режим работы DA2 для случая когда емкость C1=210пФ, на рис. 8.2 показан режим работы DA2 при емкости C1=212пФ, а на рис. 8.3 когда C1=208пФ. При точном подборе R2 и C1 напряжение на выходе ОУ DA2 менее 3мВ, в свою очередь напряжение ошибки внутри петли ООС (точка соединения R5.1 и R5.2), т.е. напряжение на входе ОУ DA2 на 70Дб меньше (при полосе до 40кГц) и не превышает 1мкВ. В соответствии с этим уровень (напряжение) искажений на выходе УМЗЧ (верхний вывод L1) в десять ( $K_{усл}=10$ ) раз больше и составляет 10мкВ.

В случае большого номинала R2 сигнал на выходе ОУ DA2 будет инвертирован, а фаза составит 180 гр. С учётом фотографий рис. 8.1 - рис. 8.3, а также рис. 6, можно сделать обобщающий вывод о том что фаза на выходе ОУ DA2 (т.е. внутри петли ООС) может принимать любые значения от 0 до 360 гр. Соответственно можно констатировать, что даже очень большие изменения фазовой

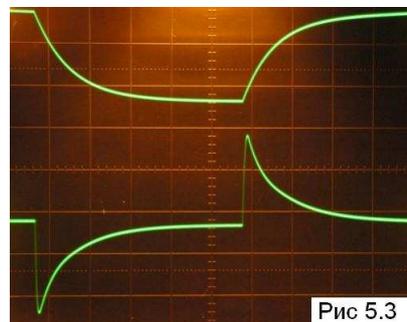


Рис 5.3

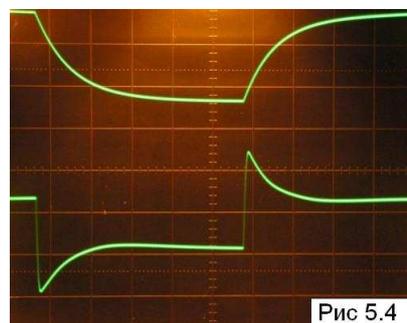


Рис 5.4

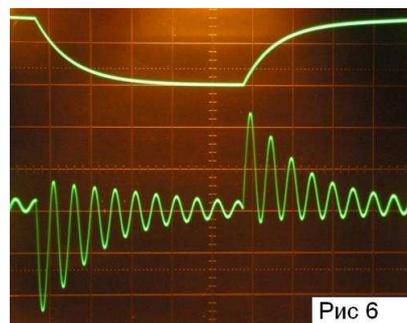


Рис 6

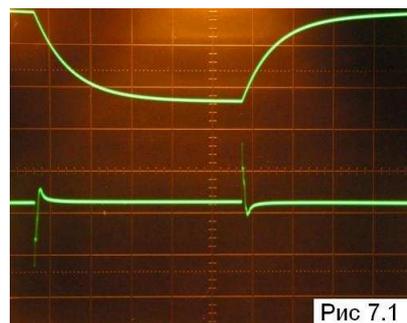


Рис 7.1

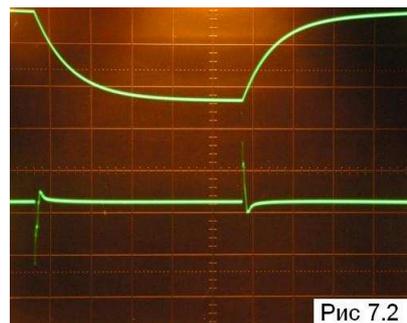


Рис 7.2

ошибки (задержки) внутри петли ООС практически ни как не влияют на характеристики усилителя.

На фотографии рис. 8.4 представлены осциллограммы на выходе DA2 при выходной мощности 100Вт т.е. исходные данные аналогичны рис. 5.2. Уровень сигнала ошибки на выходе DA2 уменьшается при понижении частоты исходного сигнала, при уменьшении амплитуды исходного сигнала или при увеличении напряжения питания выходного каскада. На фотографии рис. 8.5 представлены осциллограммы на выходе DA2 при выходной мощности 50Вт.

### Детали о деталях:

В силу очень высоких рабочих частот ( $f_{\text{зам}} > 400 \text{ МГц}$ ) следует применять компоненты предназначенные для поверхностного монтажа (чип - элементы). Особенно это важно для R1-R5, R5.1-R5.2, C1-C7, C5.1, DA1, DA2. Все эти элементы должны быть расположены очень близко с DA1. Причём для увеличения габаритной мощности в позициях R5.1, R5.2, R5 следует применить несколько резисторов (типоразмера 1206) включенных в параллель R5.1=2x300, R5.2=10x15к, R2=2x15к, R5=4x100. В позиции C5.1, C1, C2 и C5.4, C5.6, C4, C6 следует применить конденсаторы типа МП0, также низким ТКЕ должен обладать и C3. Конденсатор C5.1 осуществляет прецизионную стопроцентную ООС и соответственно должен быть очень высокого качества, из SMD рекомендуется конденсатор типа МП0 и номинальным напряжением 500В, однако они достаточно дефицитны. Из распространённых типов рекомендуется конденсатор КСО, СГМ напряжением 250-500В и ёмкостью 1000пФ.

При "сборке" многослойных резисторов (R5.2=10x15к) рекомендуется их смочить спиртоканифольным раствором.

Индуктивности L1 и L2 одинаковые и намотаны на каркасе диаметром 14 мм, проводом 0.8-1 мм. Число витков каждой катушки равно 28 (25-30). Катушка индуктивности L1 имеет отвод от середины. Между этим отводом и концом катушки подключен резистор номиналом 5 Ом.

Индуктивность L2 имеет отвод от восьмого витка. Между этим отводом и концом катушки (28 виток) подключен резистор номиналом 2,5 Ом. Тем самым, данный резистор, шунтирует 3/4 длины намотки катушки. Этим обеспечивается достаточно эффективное снижение добротности.

В качестве индуктивностей L3, L4 и L5.3, L5.4 желательно применить заводские дроссели Д0.1 номиналом 5-20мкГн. При их отсутствии, рекомендуется использовать в качестве каркаса резисторы типа МЛТ 0,25 намотав на них 20 витков проводом 0,1-0,15мм.

Особо следует отметить идентичность параметров выходных транзисторов (VT3-VT10). Дело в том что эти транзисторы обладают достаточно различными напряжениями отсечки и разной крутизной передаточной характеристики. Это приводит к тому, что в реально работающем усилителе разброс токов стока транзисторов очень большой. Зачастую возникает ситуация когда реально работает один транзистор из четырех. Даже относительно

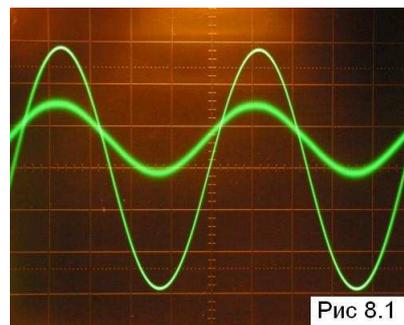


Рис 8.1

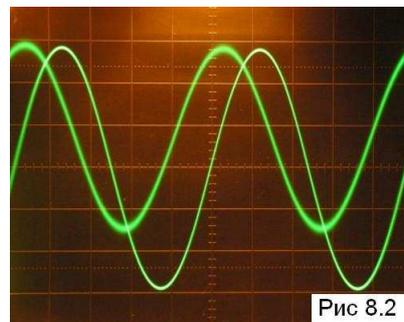


Рис 8.2

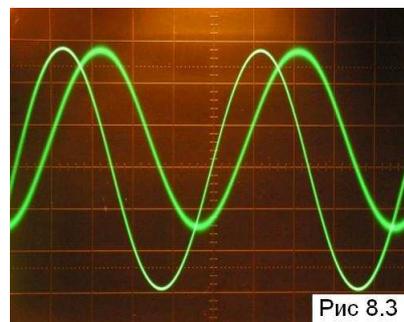


Рис 8.3

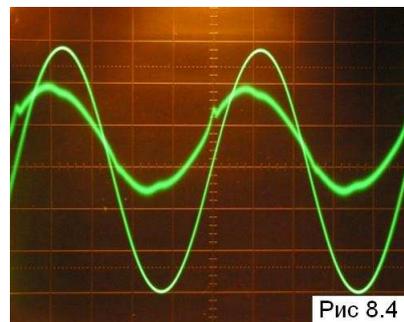


Рис 8.4

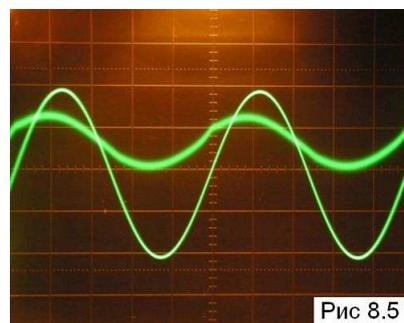


Рис 8.5

большие номиналы сопротивлений в цепях истоков, обеспечить достаточно равные токи стоков не могут. Поэтому подчеркнем, что при полевых транзисторах на выходе УМЗЧ, для любительского исполнения, более целесообразно использовать подобранные транзисторы, что позволяет исключить сопротивления в цепях истоков. Критерий режимов для подбора следующий - это половина напряжения питания ( $40\text{В}/2$ ) 20В, и половина максимального выходного тока ( $8\text{А}/2$ ) 4А. При четырёх транзисторах в плече получаем ток стока для одного транзистора равным 1А.

Как сказано в [3] диоды VD1-VD4 выполняют функции терморезисторов. Соответственно диоды должны иметь тепловой контакт с коллекторами (или стоками) транзисторов VD1-VT1, VD2-VT2, VD3-VT3, VD4-VT7. Для исключения нагрева транзисторов VT1, VT2 (от мощных выходных транзисторов) они должны быть размещены на отдельных радиаторах.

Ток покоя выходного каскада (50-100мА), целесообразно выставить после прогрева УМЗЧ. Как правило (при данных номиналах элементов) выходной каскад работает в режиме с низким током покоя (класс С), который существенно зависит от качества стабилизации напряжения питания ОУ ( $\pm 5\text{В}$ ). Для увеличения тока покоя следует уменьшить (на 2-5%) номинал R22; R23 или соответственно увеличить номинал R17; R19. Уменьшать сопротивление R22; R23 рекомендуется при помощи дополнительных резисторов подключенных параллельно. Номинал дополнительных резисторов порядка 1к - 3к.

Также стоит обратить внимание уважаемого читателя на нецелесообразность упрощения схемы, посредством уменьшения числа выходных транзисторов. Усилитель будет работать и в таком варианте. Но при этом снизится надёжность и эффективность работы на низкоомную нагрузку (реальную АС).

Понятно, что достаточно высокие технические характеристики УМЗЧ достигнуты за счёт высоких параметров применённого ОУ. На сегодняшний день подобных радиочастотных ОУ разработано достаточно много, в том числе допускающих работу со стопроцентной ООС [5]. Однако, в данной версии УМЗЧ, не следует использовать ОУ с большим напряжением питания. Так как это приведёт к увеличению мощности рассеиваемой ОУ, и соответственно к его перегреву, что снизит надёжность.

Особый интерес могут представлять ОУ с достаточно высоким отношением качество/цена при доступных ценах. Например покупная цена (с НДС) на декабрь 2004г. ОУ AD8055AR составила 50р.

Май 2005г. А. Литаврин.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. МКУС-V1.PDF // Литаврин А. Многоканальное усиление в УМЗЧ с крайне глубокой ООС. - Радио, 2004, № 3, с. 18-20; № 4, с. 19-21.
2. МКУС-V2.PDF // Литаврин А. Простой усилитель или МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС. - Радио дело, 2006, № 9, с. 34-41.
3. МКУС-V3.PDF // Литаврин А. МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС. - Радио дело, 2007, № 1, с. 12-15. // Литаврин А. УМЗЧ с параллельным каналом и максимально глубокой ООС. - Радио, 2007, № 6, с. 19-22.
4. <http://www.analog.com> (<<search>>AD8055)
5. <http://www.cqham.ru>