

Очень простой усилитель или МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС на ВЧ.

Совершенство в разработке достигается не тогда,
когда нечего добавить, а тогда когда нечего убрать.

Антуан де Сент-Экзюпери

В целом эта статья продолжает тему МногоКанальных Усилительных Структур (МКУС) в звуковых усилителях мощности, поднятую в публикациях [1,2]. Там-же даны теоретические аспекты и обоснованы минимальные требования предъявляемые к УМЗЧ. Из них наиболее важные, это крайне малое время реакции петли ООС (ВРП ООС) и глубокая (80-100дБ) стопроцентная ООС на ВЧ. Данные параметры обеспечивают презиционность и четкость работы петли ООС, высокие перегрузочные характеристики каскадов УМЗЧ (на ВЧ), отличное качество звукового сигнала. Реализовать их возможно только на основе МКУС.

В данной статье мы рассмотрим вопрос о обосновании и целесообразности применения максимально упрощённых версий выходных каскадов УМЗЧ.

Для начала отметим что существует достаточно большое количество литературы где делаются попытки обосновать, те или иные структуры или схемотехнику УМЗЧ. Как правило подобные публикации не содержат грубых ошибок, однако в целом процесс повествования можно охарактеризовать как "переливание из пустого в порожнее". Поводом для достаточно негативной оценки автором, публикаций подобного рода, служит весьма поверхностный анализ причин некорректной работы УМЗЧ.

Рассмотрим понятия - общая ООС и местная ООС, в чём их сходство, и различие. На первый взгляд эти ООС имеют разные определения. Общая ООС, это ООС охватывающая весь усилитель, а местная ООС это ООС охватывающая каскад или группу каскадов. Однако если пристальней посмотреть на работу этих ООС в многокаскадном усилителе, то становится очевидным, что ключевым техническим фактором этих различий следует считать разное ВРП ООС. Итак, именно крайне малым ВРП ООС и обусловлено высокое качество работы местной (а зачастую и стопроцентной) ООС, в одиночных усилительных каскадах (ОБ,ОК). Это всецело подтверждается практикой. Однако местная ООС обладает общеизвестными недостатками, причём главный недостаток это небольшой запас усиления внутри петли ООС. У общей ООС недостатков нет, если ВРП ООС минимально [1,2].

Какой из сказанного выше можно сделать вывод? Следует максимально использовать каскады с местной (как правило стопроцентной) ООС и причём охваченные глубокой (или крайне глубокой) общей стопроцентной ООС на ВЧ. Далее, следует подчеркнуть, что каких либо технических отличий общей и местной ООС не существует, если ВРП ООС крайне малое.

Весьма привлекательно здесь выглядит структура где выходной каскад максимально упрощён. Улучшение, относительно низких, линейных характеристик, подобных выходных каскадов, следует обеспечивать посредством дополнительных усилителей (ОУ) и глубокой (крайне глубокой) ООС.

Произведем сравнительный анализ структур наиболее известных версий УМЗЧ. Так достаточно хорошо известна структура УМЗЧ где управление выходным каскадом осуществляется по цепям питания ОУ [3,4]. Нужно отметить что, на момент появления, эти схемы отличалась от прочих относительно небольшим ВРП ООС, равным времени задержки самим ОУ. Однако подобные усилители имеет ряд врожденных дефектов. Наиболее существенный из которых связан с большими ВЧ пульсациями (искажениями) на шинах

питания ОУ. Безусловно часть этих помех проникает и во входные цепи ОУ, то есть во внутрь петли общей ООС.

Конечно наиболее популярная и массовая структура выходного каскада УМЗЧ, это генератор тока управляющий мощным (выходным) повторителем (эмиттерным или истоковым). Данная структура уже давно стала классикой схемотехники УМЗЧ и служит основой для многих и многих УМЗЧ, например [1,2,5,6]. Однако версии УМЗЧ [5,6] (и их клоны) достаточно сложны и имеют ряд недостатков, что связано с большим количеством последовательных каскадов усиления, а также отсутствием стопроцентной ООС на ВЧ. Вариант УМЗЧ [2] выгодно отличается от этих версий, так как обладает крайне малым ВРП ООС и глубокой стопроцентной ООС на ВЧ. Для высоких частот, выходной каскад УМЗЧ реализован на одиночном полевом транзисторе со стопроцентной местной ООС.

Итак, данный усилитель [2] представляет собой оптимальную, причем максимально упрощенную классическую структуру УМЗЧ (генератор тока управляющий мощным повторителем). Понятно что данная оптимальность тесно связана с применением в выходном каскаде мощных полевых транзисторов, обладающих большим коэффициентом усиления по мощности, а также другими положительными свойствами [2].

Существует ещё один аргумент, в пользу полевых транзисторов. Так если 5-10 лет назад комплементарные пары мощных полевых транзисторов были в дефиците, то на сегодняшний день подобные транзисторы имеются в широкой продаже по доступным ценам.

Между тем усилитель [2] см рис. 1.1 содержит, дополнительный высоковольтный источник питания, необходимость которого обусловлена большим входным напряжением выходного каскада, работающего как повторитель. В сущности дополнительный источник питания, это функционально избыточный элемент. Попробуем его исключить из схемы. Для этого следует включить транзисторы выходного каскада по схеме общим истоком рис. 1.2, далее дополним схему предвыходным каскадом. Однако данная модификация выходного каскада весьма нелинейна и нестабильна, что связано с отсутствием местных ООС. Введём местную ООС рис. 1.3

(R1, R2) и далее общую (для выходного каскада)

стопроцентную ООС на ВЧ рис 1.4 (C1, C2).

Введение общей ООС фактически приводит к тому что, на высоких частотах, предвыходной каскад начинает выполнять функции эмиттерного повторителя. В целом это обусловлено следующими требованиями. Напряжения и токи коллекторов должны быть большими (25В и 25мА соответственно), а нагрузка в цепи коллекторов низкоомной.

Полученный вариант выходного

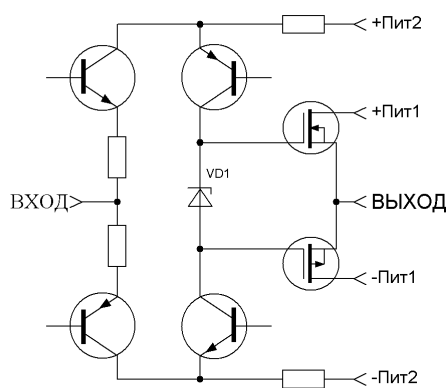


Рис. 1.1

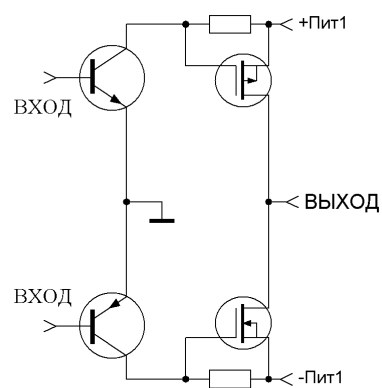


Рис. 1.2

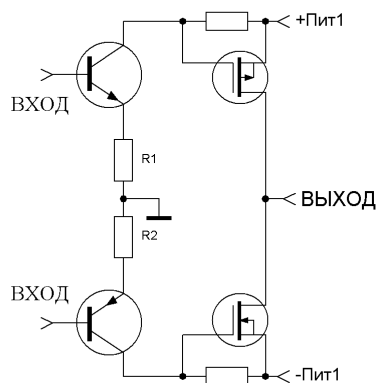


Рис. 1.3

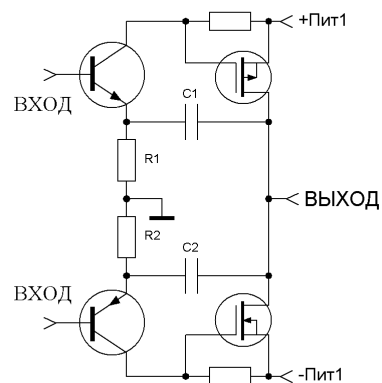


Рис. 1.4

каскада, по ряду технических параметров, несколько проигрывает в сравнении с версией УМЗЧ [2], но при равных токах покоя предвыходного каскада. При большем токе покоя предвыходного каскада (25мА против 5мА в [2]), эти схемы по техническим характеристикам допустимо считать близкими. Несомненным плюсом полученного варианта УМЗЧ, следует считать отсутствие дополнительного высоковольтного источника питания.

Итак, мы получили максимально упрощённый вариант УМЗЧ, тем не менее какие либо существенные недостатки у данного усилителя отсутствуют. Можно констатировать что данный УМЗЧ представляет золотую середину между многокаскадными УМЗЧ [5,6] и ламповыми усилителями, ибо обладает их достоинствами при отсутствии их недостатков.

УМЗЧ:

Как отмечено в [2], в относительно простых усилителях затруднительно обеспечить весь спектр требований предъявляемых к современным высококачественным УМЗЧ. Однако базовые требования, безусловно, должны быть учтены в любом УМЗЧ. Кратко повторим их. Это крайне малое ВРП ООС и общая глубокая (80-100дБ) стопроцентная ООС на ВЧ. Именно эти параметры играют ключевую роль в обеспечении высоких динамических характеристик каскадов усилителя. Конечно реализовать эти требования можно и в УМЗЧ на дискретных элементах. Но рациональней и правильней для этого использовать радиочастотные ОУ допускающие стопроцентную ООС, например AD8055.

Краткие технические характеристики AD8055AR [7]:

1 Скорректирован до $K_{ус}$	1
2 Полоса пропускания по уровню (ЗдБ	300МГц
3 Частота единичного усиления	~ 200 МГц
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	~ 100 ма

Подобные ОУ разработаны для применения в видеоусилителях. Как следствие они по определению обладают: большой широкополосностью и высокой линейностью, при значительном уровне сигнала (порядка 1В) как на входе так и на выходе ОУ, малым временем задержки и малым временем установления выходного сигнала, высокой скоростью нарастания выходного напряжения и большим усилением, а также имеют достаточно большой выходной ток. Использование радиочастотных ОУ особенно актуально при их применении в УМЗЧ, для обеспечения высоких перегрузочных характеристик по входу.

На основании перечисленных выше доводов и аргументов [1,2], был разработан вариант усилителя представленный на рис. 2. Фактически данный усилитель представляет собой версию УМЗЧ [2] с переработанным (видеоизменённым) выходным каскадом. В соответствии с этим УМЗЧ на рис. 2 и УМЗЧ [2] 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. 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 глубокой общей стопроцентной ООС (C1, R2) на ВЧ.

Выходной каскад УМЗЧ выполнен, на мощных полевых транзисторах. Как уже отмечалось [2], полевые транзисторы (на низких частотах) относительно нелинейные. То есть, каскады, собранные на их основе создают значительные гармонические искажения, особенно в двухтактном режиме при большой выходной мощности. Это происходит от того что, напряжение на входе выходного каскада (Узи) весьма большое и как следствие линейность достаточно низкая. Но в тоже время, при малом уровне сигнала, даже если он достаточно широкополосный, линейность выходного каскада на полевых транзисторах будет очень высокой. Выходной каскад (двухкаскадный) охвачен местной стопроцентной ООС на ВЧ (C12, C13).

В данном УМЗЧ время задержки выходным каскадом фактически равно времени задержки предвыходным каскадом, выполненном на одиночном транзисторе VT1(VT2), как отмечено выше, на ВЧ, он выполняет функции эмиттерного повторителя. Этим обеспечивается относительно небольшое время задержки самим выходным каскадом, достаточно низкий уровень интермодуляции высоких порядков и шумоподобной интермодуляции. Что, в свою очередь, при общей глубокой стопроцентной ООС на ВЧ, обеспечивает хорошие технические характеристики УМЗЧ и высокое качество звукового сигнала.

Между тем следует отметить что выходной каскад данного УМЗЧ (рис. 2) обладает большим временем задержки по сравнению с временем задержки выходным каскадом усилителя прототипа [2], так как реализован на биполярном транзисторе (VT1, VT2).

Краткие технические характеристики УМЗЧ:

1. Выходная мощность $R_n = 4\text{Om}$	120Вт
2. Кг при 20кГц и $U_{\text{вых}} \text{ амп} = 20\text{В}$	0.01%
3. Кинт (1кГц) при $U_{\text{вых}} \text{ амп} = 20\text{В}$	0.005%
4. Усиление на частоте 20кГц (ООС откл)	100дБ
5. Усиление на частоте 1кГц (ООС откл)	100дБ
6. Коэффициент усиления	-10 (20Дб)
7. Полоса пропускания по уровню (-3Дб) (частота среза петли ООС)	100кГц
8. Частота единичного усиления (F1)	1МГц
9. ВРП ООС не более	2.5нс

Рассмотрим работу усилителя при разных частотных сигналах. На высоких частотах (выше 1МГц), сигнал пришедший на вход УМЗЧ (R1) поступает (через ограничительный резистор R3) на вход ОУ DA1. С выхода ОУ сигнал через согласующее устройство (элементы C2, C3, R5) приходит на выход УМЗЧ (точка соединения L1 и L2). Далее, через цепь ООС (элементы C1, R2) возвращается на вход УМЗЧ, замыкая петлю ООС (точка соединения R1, R2, R3). Также, с выхода ОУ, ВЧ сигнал поступает и на базы транзисторов (VT1 - VT2) комплементарного эмиттерного повторителя. С выхода повторителя, ВЧ сигнал, приходит (через конденсаторы C12, C13 и цепи R21; C14, R24; C15) на выход мощного усилительного каскада (точка соединения стоков VT3-VT10) и далее (через L2) приходит на выход УМЗЧ. Индуктивность L2 образует совместно с элементами C2, C3, R5, согласующее устройство, которое служит для объединения сигналов выше 1МГц и ниже 1МГц, на выходе УМЗЧ. Индуктивность L2, пропускает низкочастотные сигналы и не пропускает ВЧ сигналы на выход УМЗЧ, чем обеспечивается приоритет главного канала (ОУ DA1) на замыкание петли ООС посредством C2, C3, R5. Причём L2, обладает весьма низкой добротностью, что предотвращает колебательные (резонансные) процессы в согласующем устройстве. Дополнительно, (на низких частотах) сигнал усиливается каскадом на VT3-VT10

Очень простой усилитель или МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС на ВЧ.

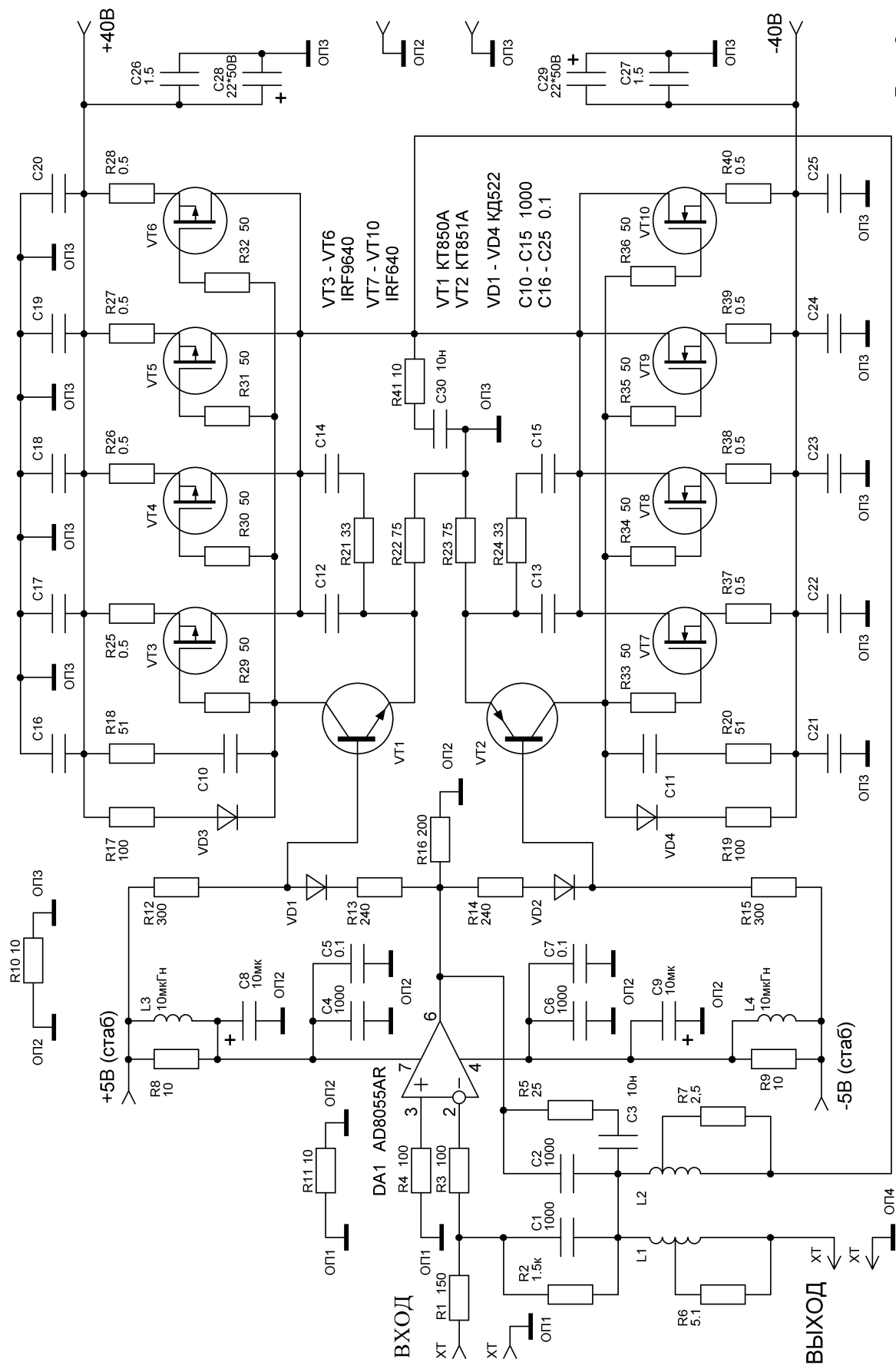


Рис. 2

включенных по схеме с ОИ. RC цепи R18; C10, R20; C11 дополнительно уменьшают уровень ВЧ сигнала на входе мощных выходных транзисторов (VT3-VT10), что улучшает приоритет главного канала.

Выход мощного усилительного каскада (точка соединения стоков VT3-VT10), на ВЧ, относительно высокоомный, что связано небольшим запасом усиления внутри петли местной ООС. Это приводит к тому что конденсаторы C12, C13 фактически становятся частью колебательного контура, образованного L2 и C2, C3, R5, согласующего устройства. Для подавления колебательных процессов добротность C12, C13 снижена RC цепями R21;C14, R24;C15.

Индуктивность L1 отсекает паразитные ёмкости, препятствует проникновению ВЧ помех в выходные каскады УМЗЧ и элементы ООС. Индуктивность L1 обладает низкой добротностью.

Резистивные делители напряжения R12-R15 ослабляют (уменьшают) сигнал на входе выходного каскада, чем увеличивается приоритет главного канала, а также создаётся необходимое напряжение смещения на базах транзисторов VT1-VT2. Для обеспечения стабильного смещения и соответственно тока покоя выходных транзисторов, качество стабилизации напряжения питания ОУ DA1 (+/- 5В) должно быть высоким. Сопротивления в эмиттерах транзисторов VT1-VT2 приблизительно равны и создают токи коллекторов порядка 25-30мА. Этим обеспечиваются напряжения смещения затвор-исток транзисторов VT3-VT10 порядка 3,4В и соответственно ток покоя выходного каскада 100мА. Диоды VD1-VD4 выполняют функции терморезисторов, чем улучшают термостабильность тока покоя выходного каскада.

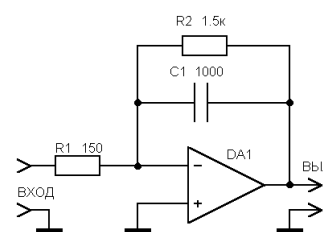


Рис 3

Измерения:

Как сказано выше, структура, тип и номиналы элементов цепи ООС данного УМЗЧ соответствуют усилителю на рис. 3. Соответственно УМЗЧ обладает аналогичными 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 4Ом и соответственно выходной мощности 100Вт. При цене деления соответственно 1В/дел, 10В/дел. Из фотографий видно, что без нагрузки (рис 5.1) усилитель обладает низкими искажениями, но при подключении нагрузки сигнал ошибки (выход DA1) становится существенно нелинейным (рис 5.2). Это означает что, на высоких частотах, транзисторы, применённые в верхнем плече (с каналом р-типа), несколько уступают по параметрам, транзисторам применённых в нижнем плече (с каналом п-типа). Другими словами, можно сказать, что комплементарность выходных транзисторов VT3-VT10 весьма низкая.

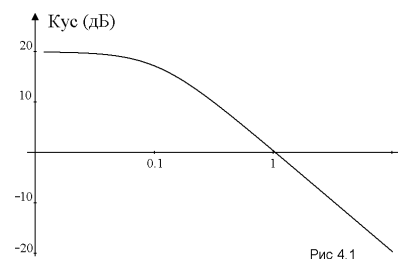


Рис 4.1

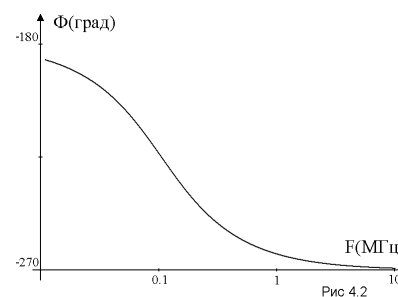
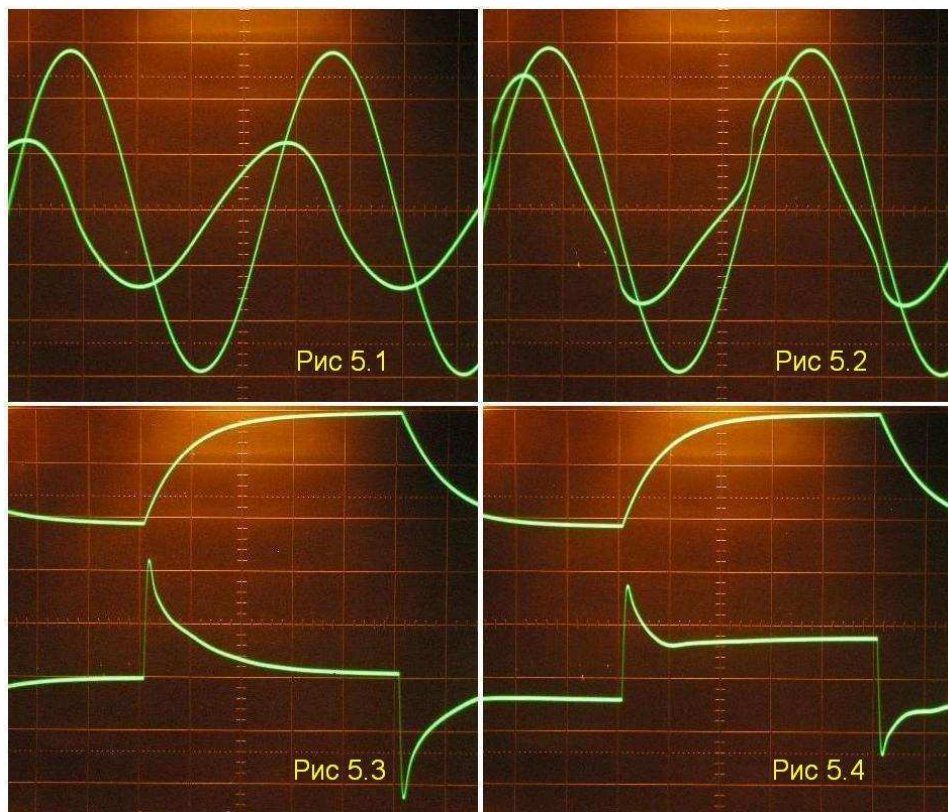


Рис 4.2

При снижении выходной мощности или при уменьшении частоты сигнала, уровень сигнала ошибки (выход DA1) несколько уменьшается и становится более линейным (плавным).

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 40Ома, при такой же цене деления.



Входной импульсный сигнал (меандр) должен быть качественным, с высокой скоростью переключения. Достаточно высокое качество меандра обеспечивает выходной формирователь на основе быстродействующей КМОП логики К1554ЛА3 (74АС00), входной формирователь (преобразователь аналогового сигнала в цифровой) здесь целесообразно выполнить на микросхеме К1554ТЛ2 (74АС14).

Анализ работы широкополосных усилителей (УМЗЧ) на частотах выше 5МГц целесообразно осуществлять при помощи измерителей АЧХ или характериографов. Из распространенных приборов рекомендуется Х1-50, Х1-7Б.

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, C1-C7, DA1. Все эти элементы должны быть расположены очень близко с DA1. Причём для увеличения габаритной мощности в позициях R1, R2, R5 следует применить несколько резисторов (типоразмера 1206) включенных в параллель R1=2x300, R2=10x15к, R5=4x100. В позиции C1, C2 и C4, C6 следует применить конденсаторы типа МП0, также низким ТКЕ должен обладать и C3. Конденсатор C1 осуществляет стопроцентную ООС и соответственно должен быть очень высокого качества, из SMD рекомендуется конденсатор типа МП0 и номинальным напряжением 500В, однако они достаточно дефицитны. По этому лучше выполнить C1 в виде двух конденсаторов одного SMD ёмкостью 20 - 50 пФ, и второго (выносного) типа КСО, СГМ напряжением 250-500В и ёмкостью 1000пФ.

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 и L4 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 (VT5-VT12). 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 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.

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 [8]. 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. Гумеля Е. Простой высококачественный УМЗЧ. - Радио, 1989, № 1, с. 44-48.
4. Дмитриев Н., Феофилакто Н. ОУ в усилителях мощности. - Радио, 1986, № 8, с. 42-46.
5. Агеев С. Сверхлинейный УМЗЧ с глубокой ООС. - Радио, 1999, № 10, с. 15-17; № 11, с. 13-16.
6. Сухов Н. УМЗЧ высокой верности. - Радио, 1989, № 6, с. 55-57; № 7, с. 57-61.
7. <http://www.analog.com> (<<search>>AD8055)
8. <http://www.cqham.ru>