

## МКУС в УМЗЧ с токовым управлением или крайне глубокая стопроцентная ООС на ВЧ и НЧ.

... Но можно этого и не делать,  
если вас не интересует результат.

М. Жванецкий

В целом эта статья продолжает тему МногоКанальных Усилительных Структур (МКУС) в звуковых усилителях мощности, поднятую в публикациях [1-4]. Там же даны теоретические аспекты и обоснованы минимальные требования, предъявляемые к УМЗЧ.

Данный УМЗЧ представляет собой конструкцию, которая обладает стопроцентной глубокой (или крайне глубокой) ООС и на ВЧ и на НЧ. То есть стопроцентная ООС реализована во всей полосе рабочих частот, что обусловлено отсутствием ослабления (деления) сигнала обратной связи элементами ООС. Это позволяет получить максимально высокую (предельно возможную) эффективность и качество работы ООС, в том числе и для сигналов с малой амплитудой (т.е. маломощных). При этом усилитель не является схемотехнически сложным устройством, то есть данный усилитель относится 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. Цикл публикаций [1-4], а также данная статья и призваны устранить это упущение. Ведь именно МКУС позволяют резко улучшить ряд основных (ключевых) параметров УМЗЧ. А именно обеспечить, крайне малое время реакции петли ООС (ВРП ООС) и соответственно широкую полосу работы ООС, большой запас усиления внутри петли ООС, высокие перегрузочные характеристики каскадов.

### Критерии и принципы ООС:

В некоторых кругах (адепты Hi-Fi/High End), сформировалось диковатое (и это как минимум) мнение о том, что типа "ООС портит звук". Тем самым готовы и ошеломляюще сногшибательные "рекомендации", в виде вердикта, о неприемлемости применения ООС в усилительных устройствах. О глубокой, а тем более о крайне глубокой ООС, даже и речи не идёт. Конечно, от всего этого можно было бы отшутиться (в стиле М. Жванецкого), что мол "...полторы тысячи тупых сговорились...", однако более правильно всё-таки разобраться в причинах подобного отношения к ООС, резонно полагая что "дыма без огня не бывает".

Главной причиной подобных заблуждений, следует считать технический нигилизм, который выражается в том, что подавляющее большинство разработок звукоусилительной техники (как любительской так и профессиональной), по сути, не соответствуют критериям качества ООС. Это ведёт к массовым ошибкам и просчётам в схемотехнике и тем самым к неадекватной (экзотической) работе ООС. Как результат, наблюдается рост атипичных искажений [2, 4]. Вследствие такой работы ООС, некоторые разработчики вообще отказываются от применения ООС, получается как в народной поговорке "из огня да в полымя".

Итак, основным критерием оценки качества работы ООС следует считать параметр Время Реакции Петли ООС (ВРП ООС), которое должно быть крайне малым [1-4]. Далее, полоса пропускания (т.е. частота среза петли ООС) УМЗЧ должна быть достаточно узкой (50кГц-100кГц), а частота единичного усиления  $F_1$  УМЗЧ низкой. Также весьма низкой должна быть и скорость нарастания выходного напряжения, на выходе усилителя [2]. Это реализуется введением глубокой (крайне глубокой), стопроцентной ООС на ВЧ [2, 3, 4]. Соответственно, этим достигается большое отношение  $F_{зам}/F_{среза}$  и тем самым высокое качество работы ООС. Основным критерием эффективности работы ООС следует считать

охват усилителя (или каскадов) достаточно глубокой (крайне глубокой) широкополосной ООС. 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. Можно сказать и более жестко, линейность усилительных каскадов в основном обусловлена запасом усиления в этих каскадах. Вследствие этого в наиболее качественных УМЗЧ, весьма целесообразно применять именно крайне глубокую ООС [1, 4]. Именно ООС и есть тот важнейший инструмент грамотное применение которого, в свою очередь, и позволяет получить высочайшие технические характеристики усилительных устройств.

Между тем, существует ещё один очень серьёзный аспект качества работы ООС, которому в предыдущих публикациях [1-4] уделялось мало внимания, так как в прямую (явно), он не связан с МКУС. Речь идёт об усилении УМЗЧ, или (что более правильно) о коэффициенте деления (ослабления) в петле ООС. Итак...

## Мотивация:

Как сказано в [1]: «Коэффициент усиления с включенной ООС должен быть минимальным. Иначе говоря, чем меньше коэффициент усиления, тем соответственно пропорционально больше отношение сигнал/шум+помеха и пропорционально меньше частота единичного усиления УМЗЧ при фиксированной частоте среза петлевого усиления». То есть, чувствительность УМЗЧ должна быть минимальной (т.е. низкой). Собственно коэффициент усиления (т.е. коэффициент передачи или чувствительность), это коэффициент деления в петле ООС, т.е. делитель сигнала, который и составляет основу (принцип и сущность) работы ООС. Чем меньше коэффициент деления внутри петли ООС, тем пропорционально меньше коэффициент усиления, т.е. меньше (ниже) чувствительность.

Следует обратить внимание, что деление (ослабление) полезного сигнала внутри петли ООС одновременно означает и деление (ослабление) сигнала помех и искажений, чем существенно снижается эффективность ООС. По этому, чем меньше коэффициент деления внутри петли ООС, тем меньше искажения усилителя. При чём сами искажения, снижаются как бы дважды. С одной стороны за счёт меньшего ослабления искажений петлёй ООС, а с другой стороны за счёт соответствующего роста усиления внутри петли ООС. Весьма большое ослабление (т.е. уменьшение или деление), сигнала и помех и искажений петлёй ООС, ведёт к тому, что петля ООС и усилитель в целом, «мелкие» сигналы, а так же помехи и искажения попросту не замечает. Можно сказать, что ООС обладает низкой разрешающей способностью. Если коэффициент деления внутри петли ООС небольшой (3-5 раз) то и качество работы ООС достаточно высокое. Если же коэффициент деления внутри петли ООС весьма большой (30 и более раз), то о высоком качестве работы ООС говорить, к сожалению не приходится. Что выражается в неспособности ООС выполнять свои функции при маломощных сигналах. Итак, можно обобщить и выразиться конкретно. Весьма большой коэффициент деления (ослабления) сигналов внутри петли ООС, которая соответственно охватывает наиболее нелинейные каскады – это патология на грани маразма. Однако, увы, такова общепринятая (т.е. устоявшаяся, укоренившаяся) практика.

А собственно, какие могут быть варианты? Ведь, в общем то считается, что эти параметры связаны, и снижение коэффициента деления в петле ООС, автоматически, причем пропорционально, снижает и коэффициент усиления (чувствительность) УМЗЧ.

Сделаем лирическое отступление, обратившись к истории. Когда в 70х годах в СССР появился «первый» ОУ 140УД1, многими это было встречено на ура, хотя своими характеристиками он явно не блистал. Однако этот ОУ обладал достаточно низким уровнем шума  $4 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  и выходным каскадом, работающим в классе А. Было так же подмечено, в целом, что и другие маломощные ОУ AD797  $U_{ш}=1 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , OP27, OP37, 140УД22, 140УД23  $U_{ш}=3 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , NE5532  $U_{ш}=5 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , и др. зарекомендовали себя достаточно хорошо. В тоже время усилители, собранные на основе условно широкополосных ОУ типа

140УД11, 574УД1, 544УД2, но с относительно большим уровнем шума (порядка 20 нВ/√Гц), показывали неплохие технические параметры (по результатам измерений узкополосных, т.е. мощных сигналов), однако звуковые оценки оказались неоднозначными.

Получается, что зачастую качество работы ОУ (то есть ООС), и самого усилителя, каким-то загадочным образом связано с уровнем шума, точнее с отношением сигнал/шум. Если рассмотреть работу выходного каскада в ламповом УМЗЧ, с местными ООС то, как правило, качество работы в нём ООС весьма высокое. Далеко не в последнюю очередь это связано с высоким уровнем сигнала, достигающим сотен вольт или что более правильно, с большим отношением сигнал/шум. Можно предположить, что уровень шума в каскадах относительно низкий, но это далеко, не так. Если оценить влияние и уровень шума в каскадах усилителя (не вдаваясь в тонкости), то окажется что уровень шума (по мощности) пропорционален полосе пропускания усилителя. Соответственно, отсутствие, каких либо технических мер направленных на сужение полосы пропускания усилителя или каскадов (т.е. отсутствие ООС на ВЧ), резко увеличивает уровень шума (и ВЧ помех) на 20-30дБ [2]. И на оборот, применение, каких либо, технических мер направленных на расширение полосы пропускания усилителя или каскадов (коррекция фазы на опережение), в дополнение к 20-30дБ прибавляет ещё 10-20дБ. Использование типовых ОУ ( $U_{ш}=20$  нВ/√Гц и более) против лучших малошумящих ОУ ( $U_{ш}=1 - 2$  нВ/√Гц), увеличивает уровень шума ещё на 20дБ. Если к этому прибавить, усиление усилителя (ещё 20-30дБ) и большой пик фактор (амплитуду) шумовых компонент (ещё 20дБ) то получится весьма неприглядная картина. Положение ещё более ухудшается при большом ВРП ООС [1]. В совокупности это ведёт к существенному увеличению искажений, и в особенности атипичных [4]. Если учесть что у реального звукового сигнала, спектральные составляющие могут быть ниже максимального уровня на 40-80дБ, то можно констатировать, что диапазон ухудшения реальных звуковых характеристик усилителей (УМЗЧ) весьма широк.

Соответственно глубокая стопроцентная ООС на ВЧ, есть наиболее эффективная методика по снижению уровня высокочастотных компонент. Тем самым резко снижается (предотвращается) появление низкочастотных интермодуляционных помех. Собственно сам термин стопроцентная ООС как раз и означает отсутствие деления (ослабления) в петле ОС (ООС). Само собой разумеется, что крайне глубокая ООС [4], т.е. ООС с запасом усиления в 120 дБ и более, компенсирует любые искажения. Безусловно, так оно и есть, но и в этом случае, коэффициент деления внутри петли ООС (как на ВЧ так и на НЧ) должен быть небольшим или вообще отсутствовать. Именно из-за данного обстоятельства все усилители с типовой ООС [1-4], ранее опубликованные автором, обладают весьма (относительно) низким коэффициентом деления внутри петли ООС (10), то есть имеют невысокое усиление  $K_{ус}=10$  (20дБ), на звуковых частотах. Таким образом, стопроцентная ООС, по существу, предстаёт перед нами в ранге абсолюта. Именно стопроцентная ООС, в которой отсутствует ослабление (уменьшение-деление) во всей полосе частот, и есть тот ключевой компонент позволяющий получить максимально эффективную (предельно возможную по качеству) работу ООС.

Становится понятным негативное влияние ООС и во многих других усилителях, где коэффициент деления внутри петли ООС весьма большой. Например, в устройствах именуемых сумматорами сигнала которые применяются в разного рода микшерах рис.1, и в том числе студийных. Даже если коэффициент усиления (коэффициент передачи) равен 1 (т.е.  $R_{вх}=R_{оос}$ ), а число источников сигнала равно 10, то

коэффициент деления внутри петли ООС будет равен 10. А если же, коэффициент усиления равен 3-4 (при том же числе источников сигнала), то и коэффициент деления внутри петли ООС увеличится и будет равен 30-40. Как результат, относительно низкое качество работы

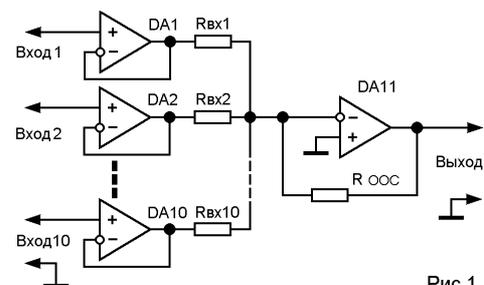


Рис 1

данного усилителя (сумматора), что обусловлено неспособностью ООС эффективно подавлять искажения ОУ. Аналогичные недостатки, в работе ООС с большим коэффициентом деления по петле, присутствуют и в прочих усилителях, микрофонных, предварительных, корректирующих и т.д. Конечно «звучок» перепёртый через подобную усилительную аппаратуру чудовищно угроблен не будет, но уж то что «чутьочку» исковеркан, это точно.

Сложив вместе выше перечисленное, можно сделать общий вывод о том что, при разработке УМЗЧ (и прочих усилителей), крайне желательно иметь низкий коэффициент деления внутри петли ООС, которая охватывает наиболее нелинейные каскады. Наиболее просто низкий коэффициент деления внутри петли ООС реализуется в местных ООС.

Например, в неинвертирующих (для ООС) усилителях, целесообразно применять структуру на основе двух усилителей рис.2. Здесь первый усилитель (маломощный и высоколинейный) усиливает сигнал по напряжению, а второй усилитель (мощный и нелинейный), охвачен стопроцентной (или близкой к стопроцентной) ООС, т.е. работает как повторитель. Следует заметить, что именно подобная структура, правда чисто формально, применяется в многочисленных УМЗЧ, в том числе и как бы причисляемых к классу Hi-Fi/High End рис.3.

Соответственно в инвертирующих (для ООС) схемах, целесообразно применять аналогичную структуру также на основе двух усилителей рис.4. Здесь первый усилитель (маломощный и высоколинейный) усиливает сигнал по напряжению, а второй усилитель (мощный и нелинейный), охвачен ООС, которая близка к стопроцентной, то есть номиналы  $R_{вх}$  и  $R_{оос}$  приблизительно равны.

Итак, мы получили схемы (рис.2 и рис.4) где деление

(ослабление) сигнала петлёй ООС минимально, то есть выходные каскады усилителей охвачены ООС, которая близка к стопроцентной. Однако у подобных схем (структур) имеется общий недостаток, это большое напряжение на выходе входных усилителей. Это напряжение (сигнал) должно быть высококачественным, что также требует определённых усилий.

### Токовое управление:

В инвертирующих (для ООС) усилителях, возможен ещё один вариант, у которого подобный недостаток отсутствует рис.5. Здесь первый усилитель выполнен в виде источника тока управляемого напряжением (ИТУН), а второй усилитель (мощный и нелинейный), охвачен стопроцентной ООС на ВЧ. При этом, какое либо ослабление (деление) сигнала в петле ООС отсутствует, что обусловлено высоким выходным сопротивлением источника (генератора) тока. То есть, сигнал искажений приходящий по цепи ООС на вход ОУ не ослаблен (не уменьшен), соответственно и ООС может максимально эффективно его подавить (компенсировать). По сути, применение источника (генератора) тока рис.5 эквивалентно улучшению шумовых характеристик ОУ, по сравнению с типовой структурой ООС. Причём, шумовые характеристики ОУ

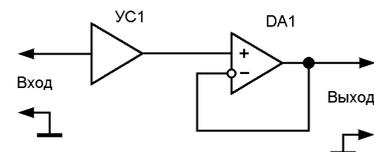


Рис 2

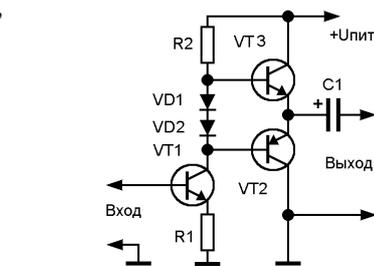


Рис 3

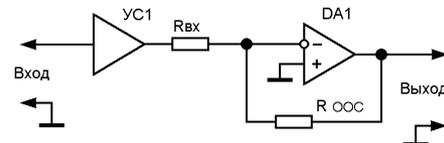


Рис 4

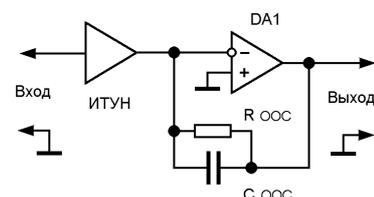


Рис 5

"улучшаются" пропорционально коэффициенту усиления УМЗЧ. То есть в 10-30 раз. Во столько же раз расширяется, и динамический диапазон и увеличивается запас усиления внутри петли ООС. Если посмотреть на это с другой стороны, то можно сказать что у самой ООС повышается разрешающая способность или, говоря "цифровым" языком, как бы увеличивается битрейт.

Само собой разумеется, подобные источники тока (т.е. ИТУН) можно применять и в прочих устройствах, например сумматорах сигнала для микшеров рис.6, которые были рассмотрены ранее (см. рис.1). При чём, не смотря на то, что самих источников сигнала весьма много (10), какое либо шунтирующее (ослабляющее) действие на сигнал ООС, это не оказывает, чем и достигается весьма высококачественная работа ООС.

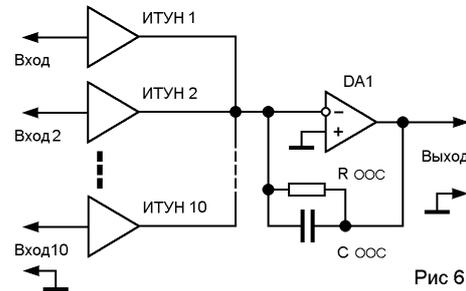


Рис 6

Итак, можно сделать обобщающий вывод о том что, сам источник сигнала, в усилителе охваченном ООС, весьма целесообразно исполнять на основе источника (генератора) тока. Альтернативное название источника (генератора) тока - усилитель с токовым выходом, т.е. усилитель с высоким выходным сопротивлением. В этом случае, ООС максимально эффективна, и в сущности, превращается в стопроцентную, во всём диапазоне частот. При чём, уровни сигналов должны быть максимально возможные, а шумовые характеристики предельно низкими. Само собой разумеется, должны соблюдаться и прочие критерии качества работы ООС. Что весьма важно для корректной и качественной работы ООС.

Качественные усилители с токовым выходом, по определению, имеют более сложную схемотехнику по отношению к обычным усилителям. Между тем, возможно использование упрощённых версий усилителей с токовым выходом. Однако, как правило, у подобных усилителей имеются те или иные недостатки. Общий анализ данной темы достаточно объёмный и выходит за рамки данной статьи. Кратко с этим вопросом, например, можно ознакомиться в [5].

Один из вариантов усилителя с токовым выходом на основе ОУ, показан на рис.7. Для работы этой схемы в качестве источника тока, следует выполнить условие  $R1=R2$ ,  $R3=R4+R5$ . Данная схема усилителя с токовым выходом достаточно хорошо известна, но несмотря на определённые достоинства, у неё имеются и некоторые недостатки. Первый недостаток, это относительно низкое (при чём нестабильное) входное сопротивление. Второй недостаток связан с тем, что данный усилитель по существу не обладает высоким выходным сопротивлением, а всего лишь эмулирует его. Другими словами, его высокое выходное сопротивление есть результат, обусловленный применением местной обратной связи (ОС). Эту ОС следует рассматривать как положительную обратную связь (ПОС). Эта ПОС относительно низкоомна и ослабляет (т.е. делит сигнал), тем самым усилитель фактически обладает недостатками, о которых шла речь выше. Введение ПОС весьма негативно сказывается и на линейности усилителя. Поэтому для высококачественной работы данной схемы очень желательно применять такие ОУ выходной каскад которых, и при отсутствии ООС, обладает высокой линейностью. Как вариант, можно рекомендовать дополнительный (буферный) эмиттерный повторитель, работающий в классе А.

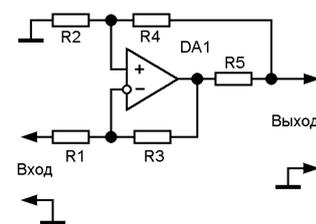


Рис 7

На рис.8 приведена схема (структура) усилителя (УМЗЧ) с токовым управлением, которая по логике работы аналогична схеме на

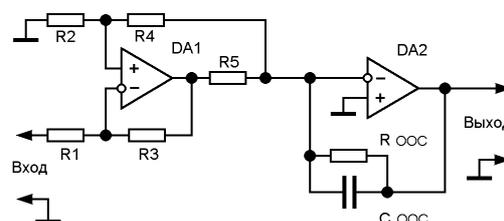


Рис 8

рис.5. Схема усилителя с токовым выходом реализована на ОУ DA1 и идентична усилителю на рис.7, соответственно DA2 это мощный усилитель (УМЗЧ) охваченный глубокой стопроцентной ООС на ВЧ. В общем случае, качество работы УМЗЧ, во многом определяется качеством работы источника тока на ОУ DA1. Соответственно, исходя из этого, в качестве ОУ DA1 целесообразно применять наиболее высококачественные ОУ (AD743).

### УМЗЧ с глубокой ООС:

Принципиальная схема УМЗЧ приведена на рис.9. Структура УМЗЧ повторяет структуру рассмотренных ранее усилителей на рис.5 и рис.8. Фактически данный УМЗЧ представляет собой модификацию многоканального усилителя опубликованного в [2], где в качестве резистора R1 применён усилитель с токовым выходом. Схема усилителя с токовым выходом реализована на ОУ DA1.1 и аналогична усилителю на рис.7. Элементы усилителя с токовым выходом имеют отдельную нумерацию, которая начинается с дополнительного префикса (индекса) цифры 1. В результате замены резистора R1, на источник тока, ООС становится стопроцентной, во всём диапазоне частот. В том случае, если в место усилителя на ОУ DA1.1 установить резистор R1, то соответственно получится УМЗЧ аналогичный [2].

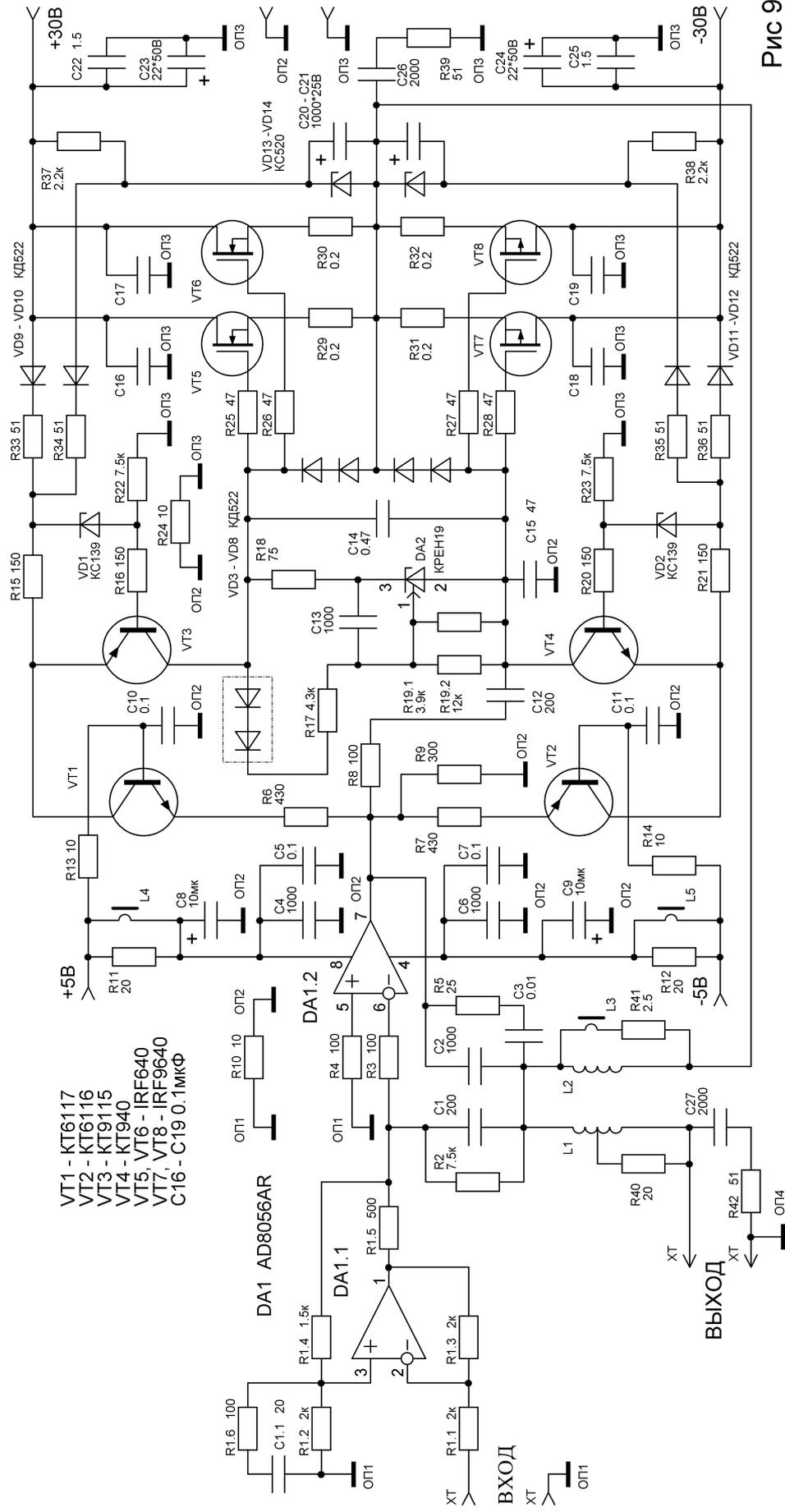
По существу УМЗЧ, структурно, состоит из двух частей. Из входного усилителя с токовым выходом и выходного мощного усилителя, на основе МКУС, который охвачен глубокой стопроцентной ООС на ВЧ. Само собой в качестве этих составных частей возможно применение других усилителей.

Например, на рис.10 приведена схема входного усилителя с токовым выходом, реализованного на дискретных полевых транзисторах. Не смотря на простоту схемы, данный усилитель, свободен от недостатков усилителя на рис.7. Однако имеются другие недостатки переходной конденсатор, более низкое выходное сопротивление, разброс параметров транзисторов. Достоинством данной схемы, можно считать очень высокое входное сопротивление. В силу отсутствия выходного напряжения отсутствует и умножение входной (т.е. нелинейной) ёмкости. Относительно высокая линейность схемы достигается при токе покоя транзисторов, который в 10 (или более) раз больше выходного тока. Тем не менее, как правило, искажения такого каскада (усилителя) будут больше искажений выходного усилителя мощности. Однако следует подчеркнуть, что спектр таких искажений будет другой, так как это будут искажения полевого транзистора работающего в глубоком классе А. При уменьшении номинала сопротивлений R2, R3 увеличивается усиление (крутизна) и ток покоя VT1. При чём резистор R2 в основном увеличивает усиление, а R3 в основном ток покоя VT1. На рис.11 показано подключение этой схемы к усилителю мощности, структура усилителя аналогична схеме на рис.5

Соответственно на рис.12 приведена схема, реализованная на транзисторах КП903. Скажем так, схема работает весьма симпатично, т.е. её можно рекомендовать для наиболее качественных УМЗЧ. Есть мнение, что данная схема весьма понравится разного рода адептам Hi-Fi/High End. На рис.13 та же схема, но реализованная на транзисторах КП1501. На основе логики работы схемы на рис.10, разработан и вариант усилителя тока на рис.14. В данном варианте переходной конденсатор в схеме отсутствует, с целью повышения линейности маломощных каскадов, их токи повышены при помощи дополнительных (параллельных) транзисторов.

В свою очередь, в качестве выходного усилителя мощности, может быть применён любой другой усилитель (УМЗЧ), но допускающий работу со стопроцентной ООС на ВЧ. Однако рекомендуемые автором УМЗЧ, это многоканальные усилители [2, 3]. Помимо прочего, эти УМЗЧ обладают крайне малым ВРП ООС (2нс) и широкой полосой работы ООС (200МГц). Входные каскады этих УМЗЧ идентичны, там же подробно пояснена и работа их выходных каскадов.

# МКУС в УМЗЧ с токовым управлением или крайне глубокая стопроцентная ООС на ВЧ и НЧ



Кратко принцип работы данного (рис.9) многоканального усилителя мощности состоит в том что, сигналы (ВЧ и НЧ) объединяются на выходе сумматора

(т.е. в точке соединения элементов L2, C2, C3 согласующего устройства). Результирующий сигнал приходит на выход УМЗЧ (верхний вывод L1). Соответственно к этой точке и подключена цепь ООС (R2, C1).

По сравнению с прототипом [2], в данной версии усилителя, имеются некоторые изменения. А именно, повышено сопротивление цепи ООС, а также повышен ток покоя предвыходного каскада каждого транзистора до 10мА. Для улучшения термостабильности, выходного каскада, введены диоды VD3-VD4. А в самом выходном каскаде, применена вольтодобавка (VD9-VD14, C20-C21, R33-R38), что соответственно позволило исключить дополнительный (высоковольтный) источник питания. Снижено напряжение питания выходного каскада и соответственно уменьшено (до двух в плече) количество выходных транзисторов. Выходная мощность УМЗЧ 50Вт. Усиление усилителя (К<sub>ус</sub>) равно 15.

Как отмечалось в [2-4] индуктивность, соединяющая выход мощного усилительного канала должна быть низкодобротной. В данном УМЗЧ, для снижения добротности индуктивности L2 используется низкодобротная ферритовая индуктивность L3, с очень малым числом витков. Конструктивно L3 представляет собой ферритовую "бусинку" с одним витком. В качестве феррита используется половина длинны трубки от заводской индуктивности Д0,25 200мкГн.

В место спаренного ОУ AD8056, в схеме УМЗЧ на рис.9, можно применить его одиночный аналог AD8055 (ОУ DA1.2). В этом случае, в качестве усилителя с токовым выходом (ОУ DA1.1) можно применить другие ОУ, например NE5534/NE5532 (U<sub>ш</sub>= 5 нВ/√Гц) при напряжении питания +/-12В. Применять в качестве DA1.1 такие ОУ как 140УД11, 574УД1, 544УД2, не рекомендуется в силу того что они обладают повышенным уровнем шума (порядка 20 нВ/√Гц), и значительно меньшим выходным током.

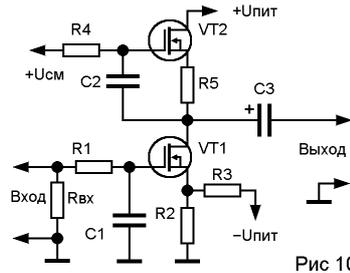


Рис 10

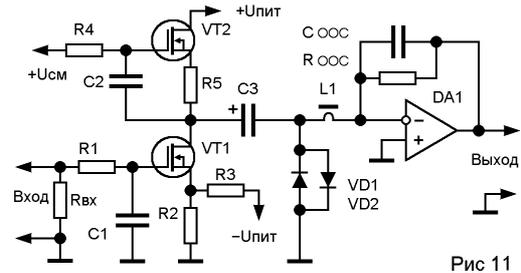


Рис 11

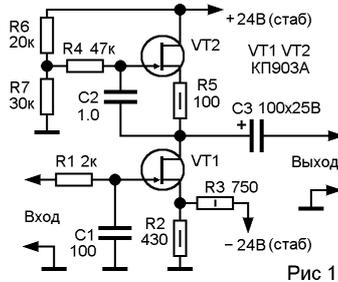


Рис 12

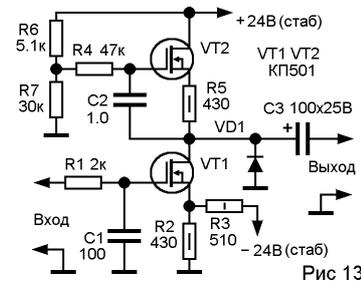


Рис 13

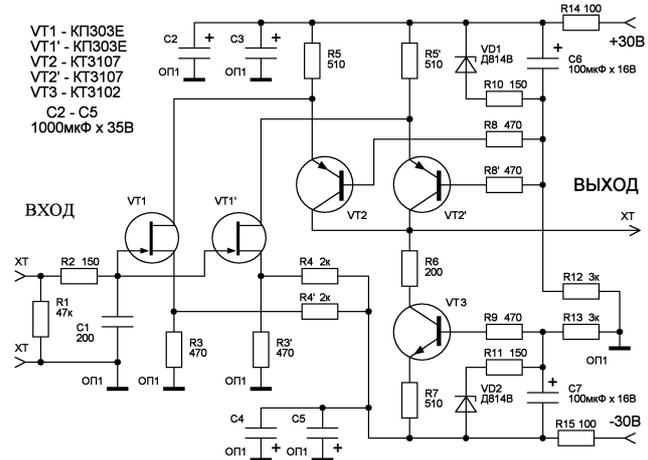


Рис 14

## УМЗЧ с крайне глубокой ООС:

Проанализировав вариант УМЗЧ [4] и версию усилителя (рис.9) приведённую чуть выше, у уважаемого читателя может возникнуть вопрос что же предпочесть: усилитель с крайне глубокой ООС или усилитель с токовым управлением. Собственно ответ автора может быть только один, это усилитель с токовым управлением при крайне глубокой ООС.

Как уже говорилось, чуть выше, применение источника (генератора) тока рис.5 эквивалентно улучшению шумовых характеристик ОУ, по сравнению с типовой структурой ООС. Однако отсутствие деления (ослабления) сигнала ведёт к увеличению выходного сопротивления ООС. Само собой разумеется, увеличение выходного сопротивления ООС, является негативным моментом [1] применения токового управления. Соответственно (при прочих равных), на передний план, выходят два недостатка связанных с входным током усилителя. Первый недостаток, это относительно нелинейный входной ток, а второй недостаток это входной шумовой ток. Эти токи создают паразитный сигнал (напряжение), внутри петли ООС. Собственно, сами эти недостатки достаточно легко устранимы. Для устранения первого недостатка необходимо применить крайне глубокую ООС, которая сделает крайне малым входное напряжение и тем самым очень малым входной ток. Для устранения второго недостатка следует применять электронные приборы (транзисторы и ОУ) с весьма небольшим входным шумовым током. Наиболее радикально проблема входного тока устраняется применением полевых транзисторов (или ОУ), у которых входной (и шумовой) ток отсутствует по определению.

Для начала уточним некоторые особенности в работе усилителя, с токовым выходом, показанным на рис.7. Если замкнуть на общий провод "плюсовой" вход ОУ, то данный усилитель фактически превратится в типовой инвертирующий усилитель. Таковым он, по сути, и является. Однако в том случае, если на правом выводе резистора R5 появляется какой либо сигнал (например сигнал ООС), то он пройдя R4 и ОУ DA1 появляется и на левом выводе резистора R5. При чём, уровень этого сигнала на выходе ОУ DA1 такой, что шунтирование сигнала ООС на правом выводе резистора R5 отсутствует. То есть, выходное сопротивление на выходе ОУ DA1 весьма низкое.

В силу этого, появляется возможность включить на входе многоканального усилителя, с многопетлевой (многоканальной) ООС, рис.15 (см. рис.1.5 [4]), усилитель с токовым выходом рис.16. Здесь соответственно ОУ DA1 - это главный канал, осуществляющий замыкание петли ООС на ВЧ, ОУ DA2 - это предварительный (мало шумящий и прецизионный) усилитель, дополнительно усиливающий сигнал петли ООС, а ОУ DA3 - это входной усилитель, аналогичный рис.7. Усилитель с токовым выходом включен в цепь прецизионной ООС вместо (в замен) R1.2.

Как отмечено в [4] следует обязательно обеспечить точность (идентичность) коэффициентов передачи этих двух ООС. Для рис.15 это выполняется при условии пропорциональности (равенства отношений номиналов) элементов ООС  $R1.1/R1.2 = R2.1/R2.2 = C1.1/C1.2$ . Для усилителя с токовым управлением на рис.16 это условие соответственно реализуется при  $R1.1/R5 = R2.1/R2.2 = C1.1/C1.2$ .

На рис.17 приведена схема УМЗЧ разработанная на основе данной структуры. Элементы прецизионного усилителя имеют отдельную нумерацию, которая начинается с дополнительного префикса (индекса) цифры 5 [4].

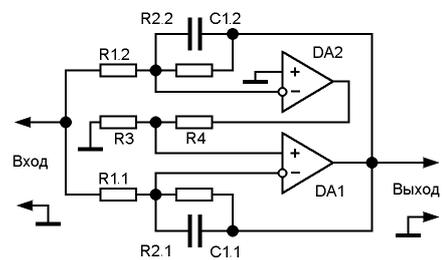


Рис 15

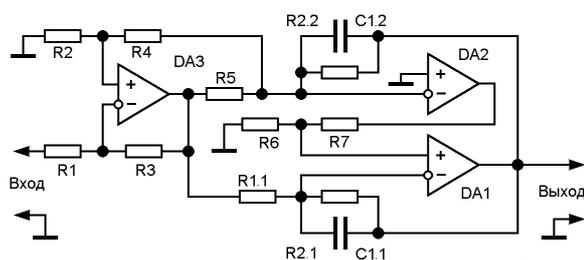
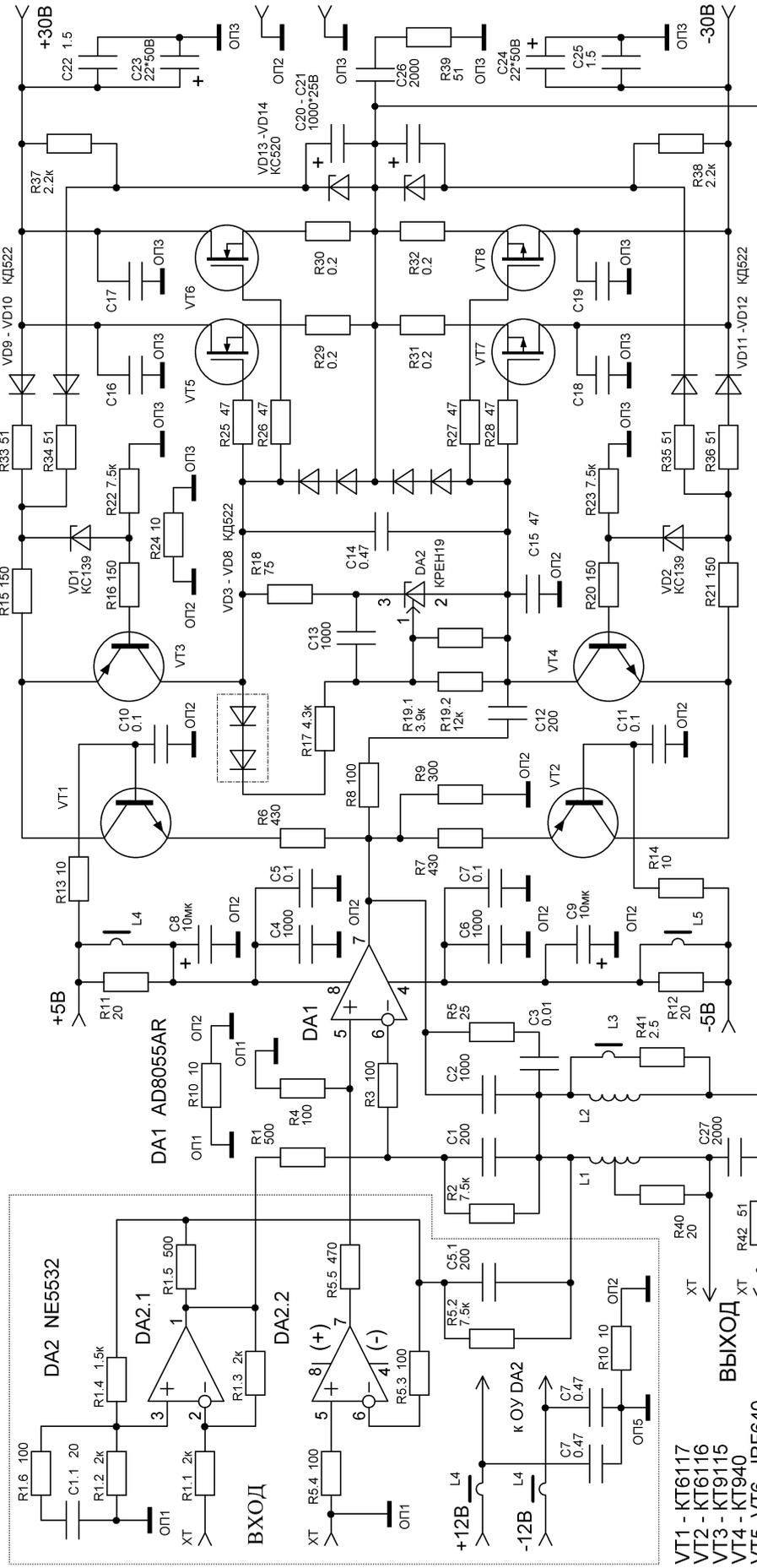


Рис 16

# МКУС в УМЗЧ с токовым управлением или крайне глубокая стопроцентная ООС на ВЧ и НЧ



- VT1 - KT6117
- VT2 - KT6116
- VT3 - KT9115
- VT4 - KT940
- VT5, VT6 - IRF640
- VT7, VT8 - IRF9640
- C16 - C19 0.1мкФ

РИС 17

Собственно данный УМЗЧ можно рассматривать как, рассмотренный выше на рис.9, модифицированный вариант усилителя [2], с дополнительным предварительным прецизионным усилителем DA2.2 [4], где соответственно в качестве входного резистора R5.1 цепи прецизионной ООС, применён усилитель с токовым выходом на ОУ DA2.1. В результате замены резистора R5.1 на источник тока, ООС становится стопроцентной, во всём диапазоне частот. Тем самым приобретаются все те качества, о которых говорилось ранее.

Кратко принцип работы данного (рис.17) многоканального усилителя мощности состоит в том что, сигналы (ВЧ и НЧ) объединяются на выходе сумматора (т.е. в точке соединения элементов L2, C2, C3 согласующего устройства). Результирующий сигнал приходит на выход УМЗЧ (верхний вывод L1). Соответственно к этой точке и подключены обе цепи ООС. Соответственно здесь, R2 и C1 это ООС главного канала, а цепь R5.2 и C5.1 это прецизионная ООС.

Как и в рассмотренном выше варианте усилителя, в качестве выходного усилителя мощности на рис.17, также может быть применён любой другой усилитель (УМЗЧ), допускающий работу со стопроцентной ООС на ВЧ, в том числе и усилители [2, 3]. Соответственно, подобный усилитель дополняется вспомогательной схемой, которая обведена пунктиром. При замене ОУ DA2 другими ОУ, следует ориентироваться на то, что усилитель на ОУ DA2.1 является основным (доминирующим) источником искажений УМЗЧ. Соответственно в качестве этого ОУ весьма желательно применять наиболее высококачественные (т.е. малошумящие и высоколинейные) ОУ (AD797, AD743). Что касается ОУ DA2.2 то здесь весьма разумно применить ОУ с полевыми транзисторами на входе или ОУ с малым входным шумовым током (AD743), что связано (см. выше) с высоким выходным сопротивлением цепи прецизионной ООС.

Октябрь 2005г. А. Литаврин.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. MKYC-V1.PDF // Литаврин А. Многоканальное усиление в УМЗЧ с крайне глубокой ООС. - Радио, 2004, № 3, с. 18-20; № 4, с. 19-21.
2. MKYC-V2.PDF // Литаврин А. Простой усилитель или МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС. - Радио дело, 2006, № 9, с. 34-41.
3. MKYC-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. MKYC-V4.PDF // Литаврин А. МКУС в УМЗЧ с крайне глубокой стопроцентной ООС. - Радио дело, 2007, № 3, с. 19-23. // Литаврин А. Многоканальные усилительные структуры в усилителях мощности звуковой частоты. - Схемотехника, 2007, № 8, с. 9-11; № 9, с. 3-6.
5. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - М.: Энергоатомиздат, 1988.