

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС

Литаврин А. В. г. Березовский Кемеровской обл.

*...Когда в товарищах согласья нет,
на лад их дело не пойдёт...*

И. Крылов

Критерии обратной связи

Общеизвестно, что отрицательная обратная связь (ООС) существенно улучшает характеристики звукоусилительных устройств и конкретно УМЗЧ. Так или иначе, ООС, явно или не явно, присутствует во всех усилительных устройствах. В соответствии с этим, существуют критерии, на основе которых и работают эти самые ООС. Эти критерии (т.е. параметры работы ООС), оказывают основополагающее, ключевое влияние на качество и эффективность её работы [1—5] и тем самым определяют, в конечном счёте, качество работы самих усилителей.

Перечислим их:

- Быстродействие в петле ООС. — Время реакции петли ООС ($ВРП\ ООС = T_{зад}$).
- Широкополосность ООС. — Ширина полосы работы ООС.
- Глубина ООС. — Запас усиления внутри петли ООС.
- Стопроцентность ООС. — Деление (ослабление) сигнала в петле ООС.

Зачастую более наглядно и удобно взамен ВРП ООС применить аналогичный параметр — частота замыкания петли ООС ($ЧЗП\ ООС = F_{зам}$, где $F_{зам} = 1 / T_{зад}$).

Однако разработчики звукоусилительной техники, как правило, уделяют мало внимания критериям ООС. Одна из причин — это их противоречивость по отношению друг к другу. И здесь особо важное значение имеет тот факт, что именно многоканальные усилительные структуры (МКУС) и позволяют объединить критерии ООС, максимизировав их достоинства [1].

Точность, с которой ООС может стабилизировать сигнал, однозначно связана с приведёнными выше критериями. Соответственно, с точки зрения точности работы и максимизации качественных характеристик усилителя, ВРП ООС должно быть крайне малым и одновременно с этим высоко стабильным. Полоса работы ООС максимально широкая, а её глубина предельно (крайне, гипер-) глубокая [1—4]. Сама ООС должна быть стопроцентной, т.е. деление (ослабление) сигнала по петле ООС, как на ВЧ, так и на НЧ, должно отсутствовать или быть весьма малым [2, 5].

Прочие частотные параметры усилителя, F_1 (частота единичного усиления как ОУ, так и УМЗЧ), $F_{среза}$ (частота среза петли ООС), полоса пропускания, и т.д. должны быть как можно ниже (меньше) по отношению к частоте $F_{зам}$. Как следствие, усиление и коэффициент передачи самого усилителя, на частотах, близких $F_{зам}$, должны быть очень малыми (т.е. мизерными).

Параметр ВРП ООС означает, что при сравнении исходного и выходного сигнала всегда присутствует некоторая ошибка, которая обусловлена задержкой отклика сигнала по петле ООС даже при очень большом усилении внутри петли ООС. Можно сказать и по-другому: частота сравнения (т.е. $F_{зам}$) отклика сигнала по петле ООС с входным должна быть предельно высокой для уменьшения этой ошибки. То есть должно быть создано высокое быстродействие внутри самой петли ООС.

Параметр, частота замыкания петли ООС ($F_{зам}$), т.е. частота сравнения исходного и выходного сигнала, фактически указывает на прерывистый характер работы самой ООС и, по сути, означает её дискретность. Дискретность свидетельствует о том, что при сравнении этих дискретных отсчётов петлёй ООС сигналы, близкие к $F_{зам}$ (и выше), преобразуются по частоте и переносятся в область звука. Фактор дискретности существенно возрастает при росте усиления на частотах, близких к $F_{зам}$, и существенно снижается при уменьшении усиления на этих частотах.

Динамические изменения режимов работы усилительных каскадов, обусловленные наличием самого сигнала в этих каскадах, влияют на время задержки в каскадах и тем самым на ВРП ООС. Изменение ВРП ООС эквивалентно джиттеру частоты $F_{\text{зам}}$, и в свою очередь ведёт к появлению джиттероподобных искажений сигнала.

Сама ООС — это инструмент, который по сути не устраняет саму причину искажений (или отклонений), а лишь пытается компенсировать уже возникшие искажения (или отклонения). В соответствии с этим, ООС должна создать сигнал для компенсации этих самых искажений. Чем выше изначальная линейность усилителя (т.е. при отключённой ООС), тем меньше уровень этого компенсационно-искажённого сигнала и тем качественнее работает сама ООС. Уровень данного компенсационного сигнала весьма слабо зависит от глубины ООС, однако с её увеличением этот сигнал становится более точным.

В общем случае ВРП ООС в усилителях может значительно изменяться. Так, например, в зависимости от классов усиления А, В, С, D, ВРП ООС сильно изменяется от малого и весьма стабильного (для класса А), и большого и нестабильного (для класса D). Классы усиления В, С характеризуются относительно небольшим, но при этом достаточно нестабильным ВРП ООС. В свою очередь, нестабильное ВРП ООС здесь говорит о наличии джиттероподобных искажений сигнала. Весьма интересна работа усилителя в классе D, качество работы которого напрямую связано с тактовой частотой усилителя. Здесь примечательно то, что фактически тактовая частота в подобных усилителях — это, по сути, частота замыкания петли ООС. Соответственно, низкое качество работы усилителя в классе D, связано именно с низкой частотой замыкания петли ООС. Можно сделать обобщающий вывод, что одним из основных факторов, влияющих на качество работы разных классов усиления, следует считать именно ВРП ООС.

Критерий стопроцентной ООС (как на ВЧ, так и на НЧ), характеризует разрешающую способность ООС или, скажем бытовым языком, её «зоркость». Это соответственно обусловлено высоким отношением сигнал/шум+помеха. Стопроцентная ООС на ВЧ, как правило, создаёт спад АЧХ на ВЧ. В соответствии с этим мы получим относительно низкую частоту единичного усиления усилителя (F_1), низкую частоту среза петли ООС ($F_{\text{среза}}$) и соответственно, узкую полосу работы усилителя. Этим реализуется их большое количественное отношение к частоте $F_{\text{зам}}$, что означает высокое качество работы ООС. Спад АЧХ на ВЧ создаёт низкую скорость нарастания сигнала на выходе усилителя, и тем самым реализует высокие перегрузочные характеристики выходного каскада на ВЧ [2—4].

Стопроцентная ООС на ВЧ позволяет (разрешает) получить стопроцентную ООС и на НЧ (т.е. на звуковых частотах). Если ООС на НЧ не будет стопроцентной (т.е. будет с большим коэффициентом деления по петле), то отношение сигнал/шум+помеха внутри петли ООС получается низким, а качество и точность работы ООС существенно снижается, она становится «мутной», особенно для низкоуровневых сигналов. Это создает проблему «первого Ватта», и ведёт к снижению точности стабилизации выходного напряжения каскадов и усилителя в целом. Такому недостатку наиболее подвержена именно ООС (ОООС) в выходном каскаде УМЗЧ, ведь здесь ей приходится одновременно бороться как с внутренними искажениями выходного каскада, так и с отражённым (отклик, отдача) мощным сигналом от АС [5]. Именно большой коэффициент деления по петле ООС является ключевым недостатком очень многих УМЗЧ с глубокой ООС.

Усилительные элементы сами по своей природе весьма нелинейны, соответственно для компенсации этой нелинейности до исчезающе малых величин необходимо применять весьма глубокие ООС. Причём других вариантов нет и не предвидится. Однако, так или иначе, существует мнение, что «глубокая ООС портит звук». Какие же технические решения при этом предлагают или используют противники глубокой ООС? По существу это — массовое применение местной, т.е. не глубокой ООС. То есть формально декларируется отход от глубокой ООС, а по сути, предлагается массовое применение местных ООС, для которых характерно крайне малое ВРП ООС и которые при этом, что весьма важно, широкополосные и стопроцентные. С другой стороны сторонники глубокой ООС, которые как бы ратуют за глубокую ООС, однако, по сути, фактически предлагают применение общей ООС. Но конкретная реализация общей ООС в основной массе УМЗЧ, как правило, характеризуется

большим групповым временем задержки, т.е. большим ВРП ООС. Причём, и это очень важно, сама ООС здесь не стопроцентная, а с большим делением (ослаблением) сигнала по петле, а полоса её работы весьма узкая.

Получается очень странный парадокс, говорится как бы одно, а делается, по сути, совсем другое. Другими словами, сторонники глубокой ООС, улучшая критерий глубины ООС, но по факту ухудшают критерии стопроцентности, быстродействия и широкополосности ООС. И наоборот, противники глубокой ООС ухудшают критерий глубины ООС, но по существу одновременно с этим улучшают критерии стопроцентности, быстродействия и широкополосности ООС. Следует отметить, что зачастую в отношении качества звука выигрывают именно «противники» глубокой ООС, которых, однако, правильней было бы назвать «сторонниками» прочих критериев ООС, таких, как стопроцентность, быстродействие и широкополосность. Однако в целом, по мнению автора, и тот и другой подход следует считать половинчатым и в определённом смысле ущербным. Качественная ООС — это ООС, где выполняются именно все критерии качества работы ООС.

Ценность технологии МКУС и состоит в том, что она может обеспечить как широкую полосу и большую глубину ООС, так и крайне малое, причём стабильное ВРП ООС, характерное для класса А, и в том числе для усилителей, работающих в классе В, С, D. Заметим что, многообразие многоканальных усилительных структур весьма велико. При этом следует отметить, что наиболее эффективна многоканальная структура, где управление прочими (и, как правило, низкочастотными) каналами, осуществляет главный канал, т. е. усилитель, обладающий приоритетом на замыкание петли ООС. Приоритет главного канала выражен в том, что его выходной сигнал и сигнал, возвращающийся назад по петле ООС, на частотах близких к частоте $F_{зам}$, доминирует над прочими сигналами как на выходе усилителя, так и в петле ООС.

Здесь уместно рассмотреть вопрос об операционных усилителях (ОУ) с учётом их частотной коррекции и конкретно ОУ, допускающих стопроцентную ООС. По сути, частотная коррекция ОУ — это типичная ВЧ ООС. В соответствии с этим правилом (см. выше), чем сильнее скорректирован ОУ и соответственно чем ниже его F_1 (по отношению к $F_{зам}$ и при прочих равных условиях), тем качественней работает ООС. Одновременно с этим, и обоснованно, считается, что чем выше F_1 ОУ, тем он качественней, современней, совершенней, и технологичней. Причина разночтений (противоречий) здесь состоит в том, что, как уже говорилось ранее, главным параметром, характеризующим быстродействие усилителей и конкретно ОУ, следует считать ВРП ООС. Собственно крайне малое ВРП ООС (очень высокая $F_{зам}$), и позволяет в свою очередь получить очень высокую частоту F_1 ОУ. Однако на практике измерить ВРП ООС относительно сложно, в то же время измерить значение F_1 весьма легко. Именно доступность, простота измерения частоты F_1 в ОУ и стала основной для того, чтобы частота F_1 стала как бы ключевым параметром, характеризующим быстродействие ОУ, т.е. стандартом. Подобная подмена понятий привела к некоторой деградации качества ОУ с фиксированной коррекцией, что связано с недостаточной частотной коррекцией многих современных ОУ и особенно широкополосных. Причина, по которой это происходит, в общем понятна, это желание разработчиков получить максимально высокую (т.е. паспортную) частоту F_1 в ОУ. Весьма значимую роль здесь играет влияние имиджа и маркетинга. Соответственно те ОУ, которые с скорректированы до $K_{ус}=1$ и одновременно при этом допускают дополнительную частотную коррекцию, качество работы самой ООС при этой дополнительной частотной коррекции (т.е. при еще более низкой F_1 ОУ) будет существенно более высоким. Говоря другими словами, сам ОУ должен быть очень быстродействующим, т.е. по сути радиочастотным, но при этом сильно скорректированным (до $K_{ус}=0,7$; $K_{ус}=0,5$ и т.д.). Это снижает значение F_1 ОУ по отношению к его $F_{зам}$ и тем самым уменьшает усиление данного ОУ на частотах, близких к $F_{зам}$, что существенно повышает качество работы ООС и ОУ в целом. На современном этапе подобную дополнительную частотную коррекцию можно было бы осуществить при помощи электронной коммутации дополнительных корректирующих цепей.

Рассмотрим приведённые выше критерии качества работы ООС применительно к различным схемотехническим решениям применяемых в некоторых усилителях с разной

топологией рис. 1—8. На рис. 1 мы видим типичную классическую схему — структуру операционного усилителя (ОУ) с общей ООС, а на рис. 2 по сути тот же усилитель, но с учётом мощного выходного каскада, т.е. мощный ОУ.

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС

V10 - структуры

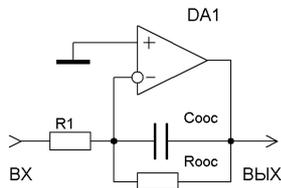


Рис. 1

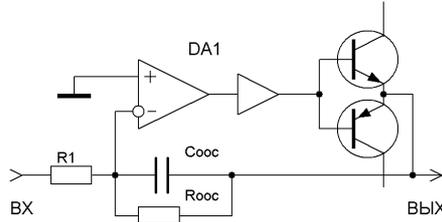


Рис. 2

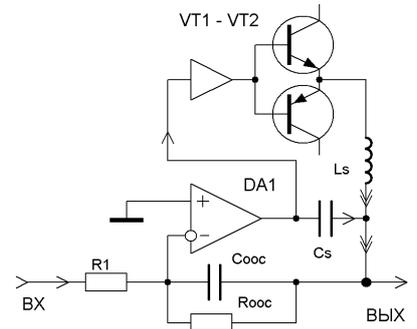


Рис. 3

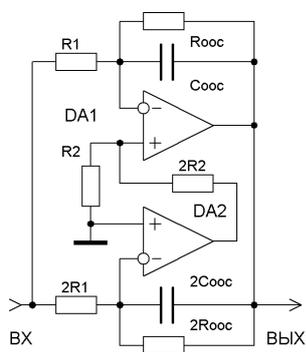


Рис. 4

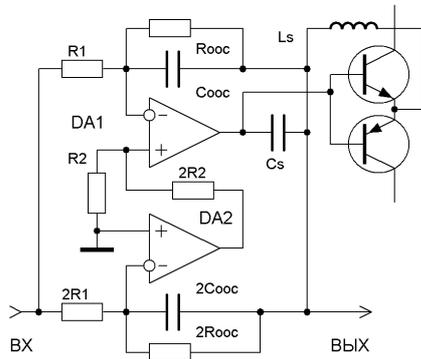


Рис. 5

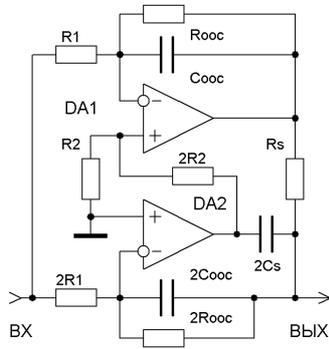


Рис. 6

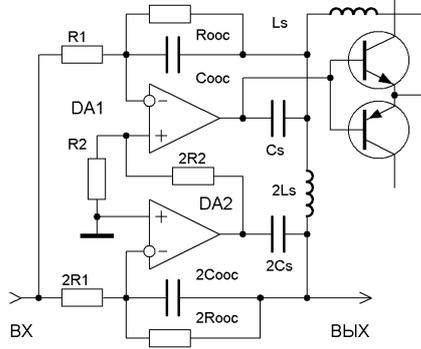


Рис. 7

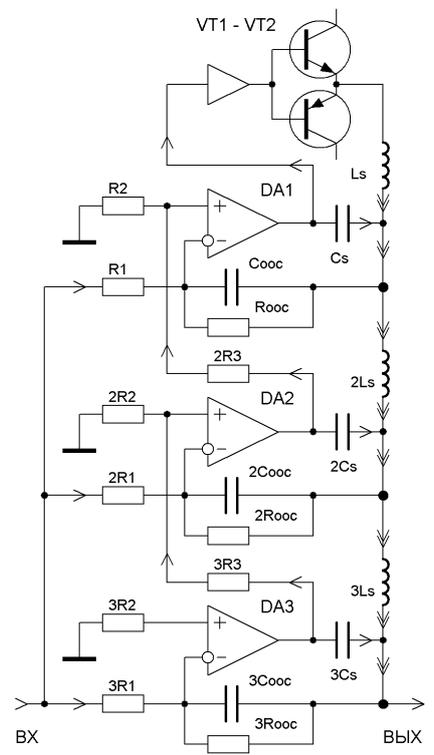


Рис. 8

Качественные характеристики работы ООС, к примеру, радиочастотного усилителя на рис. 1, достаточно высокие, что есть прямое следствие малого ВРП ООС и стопроцентной ООС на ВЧ. Это в свою очередь связано с применением быстродействующих транзисторов КВЧ диапазона. Для рис. 2 ситуация совершенно противоположная, что обусловлено применением мощного низкочастотного, сильно инерционного и нелинейного выходного каскада с большим групповым временем задержки и соответственно большим ВРП ООС. Большое ВРП ООС не позволяет получить широкую полосу ООС и высокую линейность и тем самым вынуждает разработчиков не применять стопроцентную ООС. Это означает, что усилители с топологией, подобной на рис. 2, нарушают (плохо выполняют) все критерии качества работы ООС. Соответственно и качество работы самого УМЗЧ не может быть очень высоким.

Далее, для многоканального усилителя по схеме на рис. 3 мы получим ситуацию по ВРП ООС, схожую с усилителем на рис. 1, что обусловлено цепью обхода по ВЧ через Cs. Здесь ОУ DA1 — это главный канал, т.е. усилитель, обладающий приоритетом на замыкание петли ООС. Качество работы ООС и усилителя в целом здесь будет заметно выше по отношению к

усилителю на рис. 2, однако радикального улучшения линейности усилителя мы не получим (при прочих равных).

Рассмотрим усилитель на рис. 4, по сути — это маломощный усилитель, ранее представленный на рис. 1, но дополненный уточняющим усилителем DA2. Аналогично дополним мощный усилитель на рис. 3 уточняющим усилителем DA2, см. рис. 5. Итак, мы получили усилитель, где основная петля ООС (т.е. ООС главного канала Roos, Coos) характеризуется весьма малым ВРП ООС при стопроцентной ООС на ВЧ. Уточняющий прецизионный усилитель DA2 дополнительно увеличивает запас усиления по петле ООС до 150 дБ, т.е. мы здесь получим крайне глубокую ООС, что позволяет получить весьма высокие технические характеристики усилителя.

Практические варианты УМЗЧ, реализованные по структуре рис. 3, рассмотрены в [2, 3], по структуре на рис. 5 — в [4], а эти же структуры, но с учетом стопроцентной ООС на НЧ, — в [5].

Рассмотрим пристально и критично схемы на рис. 4, 5 на предмет ВРП ООС. Да, по отношению к ООС главного канала (Roos, Coos) ВРП ООС весьма малое, что обусловлено малым временем задержки ОУ DA1. Однако для прецизионной ООС (2Roos, 2Coos), ВРП ООС будет в два раза больше, так как сигнал этой прецизионной ООС последовательно усиливается двумя ОУ — DA2 и DA1. Соответственно получается, что прецизионная ООС обладает в два раза большим ВРП ООС и более низким качеством работы по отношению к ООС главного канала. Применение очень быстродействующих (т.е. радиочастотных) ОУ весьма существенно уменьшает этот недостаток, но, увы, не искореняет.

На рис. 6, 7 представлены модифицированные схемы (структуры), аналогичные по логике работы многоканальным усилителям на рис. 4 – 5, но свободные от этого недостатка. В этих структурах сигнал с выхода ОУ DA2 проходит напрямую через конденсатор 2Cs на выход усилителя. Соответственно ВРП ООС каждого из усилительных каналов и усилителя в целом будет равно времени задержки одним ОУ. При этом сигнал ошибки в петле прецизионной ООС последовательно усиливается двумя ОУ, создавая этим крайне глубокую ООС. Тем самым полностью выполняются все те критерии качества работы ООС, о которых говорилось в начале статьи.

Одновременно, и это принципиально важно, структуры на рис. 6, 7 приобретают ещё одно качество. Дело в том, что усилители на рис. 6, 7 следует рассматривать как структуры, которые состоят из двух независимых, включённых последовательно усилителей. Разумеется, таких усилителей может быть очень много, и этим создаются условия для безграничного последовательного наращивания совокупного усиления внутри петли ООС. Тем самым мы переходим от понятия сосредоточенного петлевого усиления к понятию распределённого (рассредоточенного) петлевого усиления и параллельной ООС.

Структура усилителя

Примером такого усилителя может служить многоканальная параллельно-последовательная структура, показанная на рис. 8. Стрелки на рисунках указывают направление в пути следования сигнала, причём маломощный сигнал показан одиночной стрелкой, а мощный — двойной. С точки зрения МКУС усилитель следует рассматривать как три многоканальных усилителя, включённых последовательно. В соответствии с этим, каждый усилитель состоит из главного канала со своей ООС и дополнительного мощного канала (т.е. усилителя), который контролируется главным каналом. Как следствие, данный усилитель (рис. 8), состоит из главного канала на ОУ DA3 и дополнительного усилителя (DA2, DA1 и VT1, VT2). Далее, этот дополнительный усилитель (DA2, DA1 и VT1-VT2) состоит из главного канала на ОУ DA2 и дополнительного усилителя (DA1 и VT1-VT2). И наконец, дополнительный усилитель (DA1 и VT1, VT2), состоит из главного канала на ОУ DA1 и дополнительного усилителя (VT1, VT2).

Сигнал, который приходит на вход усилителя, приходит одновременно на все ОУ. Как следствие, и на выходах этих ОУ (при их идентичности) он появляется синхронно и весьма быстро. Тем самым и на выходах многоканальных усилителей (точки, к которым подключены

цепи ООС) сигнал поступает синхронно и достаточно быстро. Отсюда следует, что на частотах, близких к $F_{\text{зам}}$, ОУ включены параллельно, а на частотах, где начинает работать ООС, такая структура усиления приобретает последовательный характер. Этим обеспечивается крайне малое время задержки для каждой из этих структур и всего усилителя в целом. При параллельной работе ВЧ сигнал с выходов ОУ напрямую проходит на выходы усилителей. В свою очередь, сигнал ошибки по петле ООС последовательно усиливается тремя ОУ (DA3, DA2, DA1), что и создаёт очень глубокую ООС.

Верхняя часть этого усилителя идентична усилителю на рис. 3. Его выходной сигнал уточняется усилителем с главным каналом на ОУ DA2 и далее уточняется усилителем с главным каналом на ОУ DA3. Причём каждый из уточняющих усилителей имеет структуру, аналогичную усилителю на рис. 3. Понятно, что число подобных уточняющих усилителей (ядер) может быть относительно большим. Подобная многоядерная структура эффективно подавляет не только низкочастотные искажения, например тепловые, но и весьма высокочастотные, в том числе и коммутационные. Количественной оценкой качества и эффективности подобных структур служит суммарный запас усиления по петле ООС в соответствующей области частот.

В подобной структуре легко ввести и стопроцентную ООС на НЧ, т.е. ООС без ослабления сигнала в петле. Соответственно на рис. 8 резистор $3R1$ заменяется ИТУНом. Тем самым последний уточняющий усилитель, где главный канал реализован на ОУ DA3, будет обладать стопроцентной ООС на НЧ.

Существует известное мнение, что усилитель ещё до охвата ООС должен иметь относительно малый уровень искажений. Как отмечено чуть выше, это необходимо для уменьшения уровня компенсационного сигнала и качественной работы самого усилителя и его ООС. Данная структура как нельзя лучше подходит под это определение, так как мощный и весьма нелинейный выходной сигнал, многократно уточняемый при переходе от усилителя к усилителю, идеально приближается к входному. Соответственно и уровень дифференциальной нелинейной составляющей (т.е. ошибки в петле ООС) на входе и выходе каждого следующего ОУ становится все меньше и меньше.

Однако вместе с этим следует отметить и недостаток подобной топологии усилителя. Дело в том, что сами уровни сигналов на выходах DA3 и DA2 будут относительно большие. Это связано с потерями и фазовой задержкой в сумматорах сигнала (в RCL-цепях) и обусловлено необходимостью соответствующей компенсации этих потерь (т.е. фазолинейных искажений) соответствующими ОУ.

Прежде чем приступить к практическим схемам, целесообразно рассмотреть устройства, выполняющие функции сумматоров сигналов в УМЗЧ (см. рис. 3, 5, 7, 8), элементы которых обозначены как Cs и Ls. Эти сумматоры (суммирующие фильтры) служат для объединения сигналов от главного канала (ВЧ) и дополнительного (мощного НЧ) канала, как на рис. 9.1.

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС

V10 - сумматоры

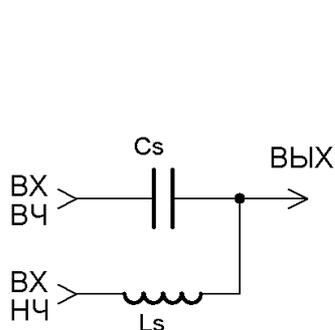


Рис 9.1

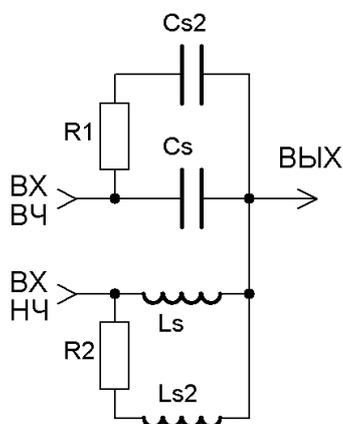


Рис 9.2

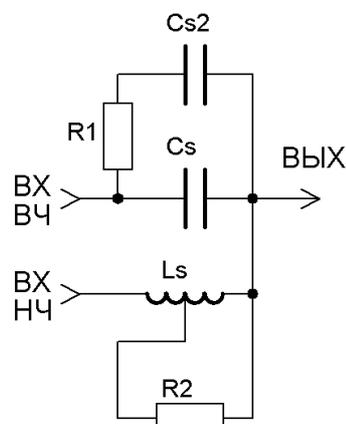


Рис 9.3

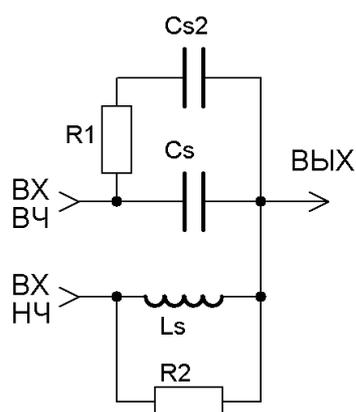


Рис 9.4

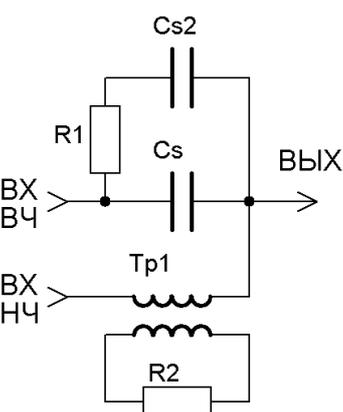


Рис 9.5

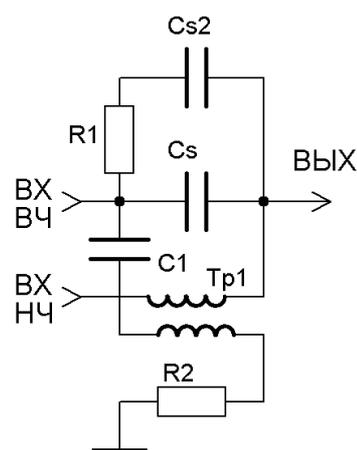


Рис 9.6

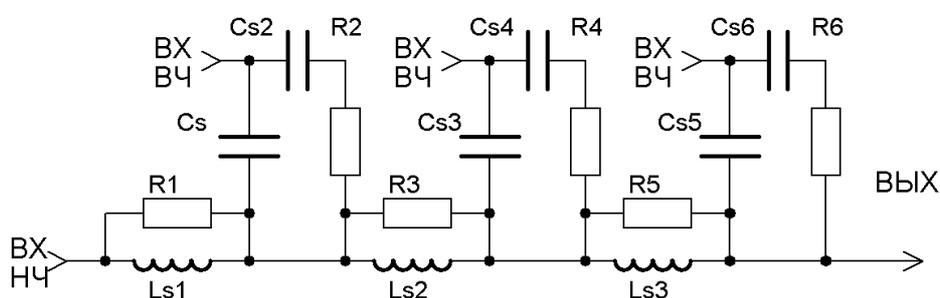


Рис 9.7

Критерием качества и эффективности сумматоров следует считать пропускание на его выход только ВЧ сигналов от ВЧ каналов и только НЧ сигналов от НЧ каналов. Следует отметить, что сумматоры, приведённые на рис. 3, 5, 7, 8, 9.1, показаны лишь функционально и на практике «вменяемо» работать не будут. Причина состоит в том, что элементы сумматора C_s и L_s на частоте раздела образуют резонансный контур, причём внутри петли ООС. Соответственно, подавление этого внутреннего резонанса в сумматоре — это одна из главных задач при проектировании многоканальных УМЗЧ.

Основной методикой для подавления резонанса в сумматоре на LC элементах следует считать снижение добротности этого контура, т. е. увеличение потерь в элементах Cs и Ls (рис. 9.2). Здесь мы имеем помимо основных элементов Cs и Ls и дополнительные R1; Cs2 и R2; Ls2. Применение этих вспомогательных элементов приводит к тому, что помимо основного резонанса, образованного Cs и Ls, контур пытается резонировать и на других частотах, где сопротивления R1 и R2 резко увеличивают потери в контуре. В общем случае число подобных вспомогательных RCL-цепей может быть несколько.

На рис. 9.3 показан вариант, где резистор R2 замыкает только часть витков катушки индуктивности. В свою очередь на рис. 9.4 представлен вариант сумматора, где индуктивность Ls2 отсутствует. Однако в этом случае эффективность сумматора будет низкой, так как высокочастотные продукты искажений легко пройдут на выход УМЗЧ через резистор R2. Ещё один вариант показан на рис. 9.5; здесь снижение добротности происходит за счёт трансформации ВЧ сигналов. Далее на рис. 9.6 — вариант активного сумматора. Это наиболее эффективный сумматор из рассмотренных ранее, что обусловлено прямым влиянием главного канала на индуктивность трансформатора и его выходной сигнал. Но понятен и недостаток такого решения — это повышенная нагрузка на главный (ВЧ) канал.

Ну и наконец, вариант многозвенного сумматора-фильтра, показанного на рис. 9.7, который применён в рассмотренном ранее многоканальном усилителе на рис. 8. Фактически данный вариант — это трёхзвенная версия сумматора, представленная на рис. 9.4. В силу многозвенности получена достаточно высокая эффективность такого сумматора. У подобной версии есть и ещё одно достоинство: номинал применённых индуктивностей, например, может отличаться по отношению друг к другу на 20...40 %. Это ведёт к тому, что частота резонанса в этих контурах будет разной, что эквивалентно снижению добротности системы в целом.

В общем случае, применительно к УМЗЧ, характеристические сопротивления Cs и Ls на частоте разделения (т.е. резонанса), должны быть сравнимы (сопоставимы) с сопротивлением нагрузки, т.е. должны быть относительно низкоомными. Частота разделения может быть достаточно высокой, если и линейность, и быстродействие дополнительного усилителя (т.е. мощного усилителя), также высоки.

Это предполагает и высокую частоту Fзам. И наоборот, в случае, если линейность и быстродействие дополнительного усилителя относительно низкие, частота разделения также должна быть достаточно низкой. Но одновременно, чем ниже частота раздела, тем большим запасом по мощности должен обладать главный (т.е. ВЧ) канал (зависимость квадратичная).

Схема УМЗЧ

На основании сказанного выше была разработана версия УМЗЧ, где в качестве основы реализован по максимуму ряд критериев. Это четыре фундаментальных критерия работы ООС (см. начало статьи), которые имеют основополагающее влияние на качество, эффективность и точность её работы, и как следствие, на качество работы УМЗЧ в целом. Достаточно высокое быстродействие и гиперглубокая широкополосная ООС (общая ООС), реализованы на основе специальной многоядерной (многоканальной) структуры последовательного приближения, аналогичной рассмотренной ранее (на рис 8). Стопроцентная (как на ВЧ, так и на НЧ) общая ООС реализована применением входного ИТУНа [5]. Входные каскады УМЗЧ работают в режиме класса А.

По совокупности параметров данный усилитель обладает весьма высоким, мониторным качеством работы. В нём реализован принцип выносных оконечных усилителей мощности, причём минимизирована физическая длина общих проводников в прецизионном канале усиления.

Целесообразность в применении именно выносных оконечных усилителей мощности обусловлена достаточно серьезной причиной. Она состоит в том, что выходные каскады усилителей и в том числе УМЗЧ, работают в классе, близком к В или С. Если рассмотреть данный выходной каскад с позиции МКУС, то фактически мы получим устройство, состоящее из двух токовых генераторов гармоник, которыми и являются плечи выходного каскада. Да, на

выходе УМЗЧ сигналы от этих токовых генераторов гармоник складываются и в теории гармоники должны компенсироваться. В сущности, так и есть, но есть одно «но». В зависимости от трассировки платы и расположения силовых элементов, происходит наведение ЭДС гармоник от этих «генераторов» на её проводящие элементы. Попадание подобной ЭДС во внутрь входной части петли ООС недопустимо, так как она (ЭДС помехи) в этом случае не компенсируется ООС. Экранировка и тщательная трассировка несколько уменьшают остроту проблемы, но полностью не устраняет её. Наиболее результативный способ, минимизирующий этот эффект, — это максимальное удаление входной части петли ООС от источника этих и прочих (например, от БП) помех [1].

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС

V10 - структура УМЗЧ

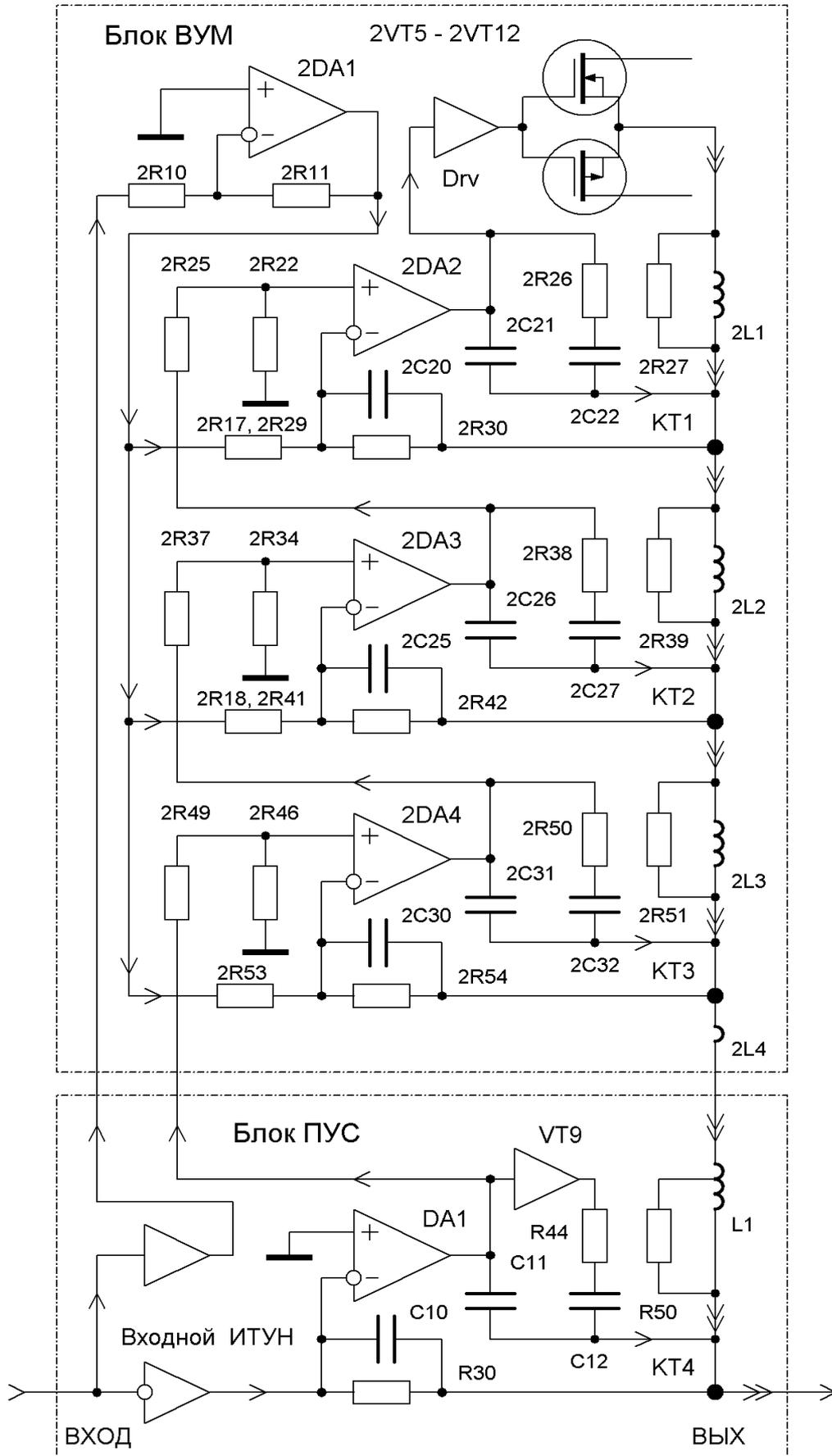


Рис 10

Этот УМЗЧ реализован на основе пятиканальной усилительной структуры последовательного приближения, и состоит из четырёх последовательно включённых многоканальных усилителей. Каждый из этих усилителей обладает своей стопроцентной на ВЧ ООС, которая контролирует его выход и состоит из главного канала и дополнительного мощного канала (усилителя), контролируемого главным каналом. Применение стопроцентной ООС на ВЧ обеспечивает приоритет этих главных каналов по петле ООС по отношению к прочим сигналам, которые на ВЧ принудительно ослаблены. В качестве главных каналов в данных усилителях применены радиочастотные ОУ [6, 7]. Это обеспечивает крайне малое время задержки и широкополосность ООС в каждой из этих структур, и как следствие, всего усилителя в целом. В качестве мощного (т.е. низкочастотного) канала, в первом (по ходу распространения мощного сигнала) многоканальном усилителе, используется усилитель на транзисторах VT1—VT12. В последующих многоканальных усилителях (втором, третьем и четвёртом прецизионном), в качестве мощного канала используется предыдущий многоканальный усилитель.

Соответственно, сам УМЗЧ состоит из двух устройств — прецизионного усилителя сигналов (ПУС), где находится прецизионная стопроцентная на НЧ и ВЧ ООС, и выносного усилителя мощности (ВУМ), где имеются свои отдельные ООС. На рис. 10 показана общая структура УМЗЧ, на рис. 11 — схема блока ПУС, а на рис. 12 — схема блока ВУМ. Стрелки на рисунках указывают направление следования сигнала, причём маломощный сигнал показан одиночной стрелкой, а мощный — двойной. Внутренний выход каждого из четырёх многоканальных усилителей (т.е. точка, к которой подключена их ООС или общая ООС) обозначен на схеме как контрольная точка (КТ1—КТ4), выделенная утолщением.

Следует особо обратить внимание на то, что в блоке ПУС сигнальные ОУ (DA1) и транзисторы работают в классе А, а местные ООС и общая ООС — стопроцентные на НЧ и на ВЧ, чем достигается высокое качество работы этих ООС и общей ООС. Одновременно с этим, в блоке ВУМ все ОУ (2DA1, 2DA2, 2DA3, 2DA4) и выходные транзисторы работают в классе усиления **В-С**, а сами ООС со значительным коэффициентом деления по петле.

Резистивные делители, включённые по входу главных каналов (соответственно R25/R22 — 2DA2; R37/R34 — 2DA3; R49/R46 — 2DA4), создают ослабление (деление) дополнительного сигнала, который поступает от предыдущих усилителей и этим осуществляют приоритет главных каналов на замыкание именно своей петли ООС. Здесь нужно обратить внимание читателя на то, что эти усилители по неинвертирующему входу обладают единичным коэффициентом передачи в широкой полосе частот (200 МГц), вследствие этого корректирующий ВЧ сигнал, приходящий от предыдущих усилителей, следует уменьшить.

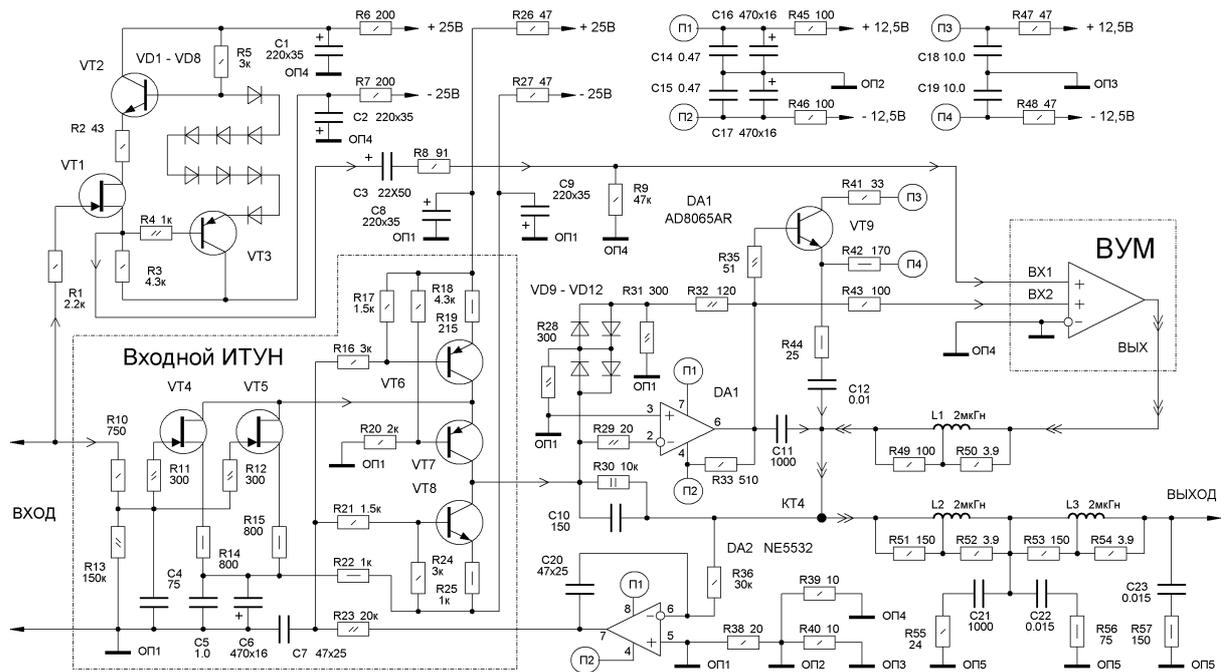
Входной ИТУН преобразует входное напряжение в выходной ток. Это преобразование выполняют транзисторы VT4 и VT5, транзистор VT7 в свою очередь отправляет этот ток на выход ИТУНа. Особо следует отметить режимы работы транзисторов VT4 и VT5. Напряжение сток-исток VT4 (VT5) и напряжение падения на резисторе R14 (R15) должны быть равны. Это обеспечивает высокую стабильность мгновенной рассеиваемой мощности этими транзисторами и тем самым минимизирует модуляцию параметров этих транзисторов входным сигналом. Транзисторы VT6, VT8 работают как внутренние источники тока и задают рабочие режимы транзисторов VT4, VT5, VT7. В силу весьма высоких параметров внутренних петель ООС качество работы самого УМЗЧ во многом обусловлено качеством работы входного ИТУНа. Другими словами, именно ИТУН является доминирующим источником искажений УМЗЧ.

Входной фильтр (ФНЧ) на входе ИТУНа (R10, C4) создаёт фазо-временную задержку. Это улучшает одновременность прихода сигнала в точку КТ4 от ОУ DA1 и от блока ВУМ, что снижает уровень ВЧ сигнала на выходе ОУ DA1.

Прецизионный усилитель на ОУ DA1 работает в классе А и соответственно обладает большой рассеиваемой мощностью. Для уменьшения его выходного тока и облегчения режима его работы применён дополнительный эмиттерный повторитель на VT9, к его выходу и подключена цепь R44C12, уменьшающая добротность контура в сумматоре. Аналогичные RC-цепи в других усилителях, в блоке ВУМ подключены непосредственно к выходам самих ОУ.

V10 - блок ПУС

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС



VT1, VT4, VT5 - КП307Г (SST310) VT2, VT8 - КТ3102Е VT3 - КТ3107Б VT6 - VT7 - КТ644А VT9 - КТ646А VD1 - VD12 - BAV99 (1N4148WS)

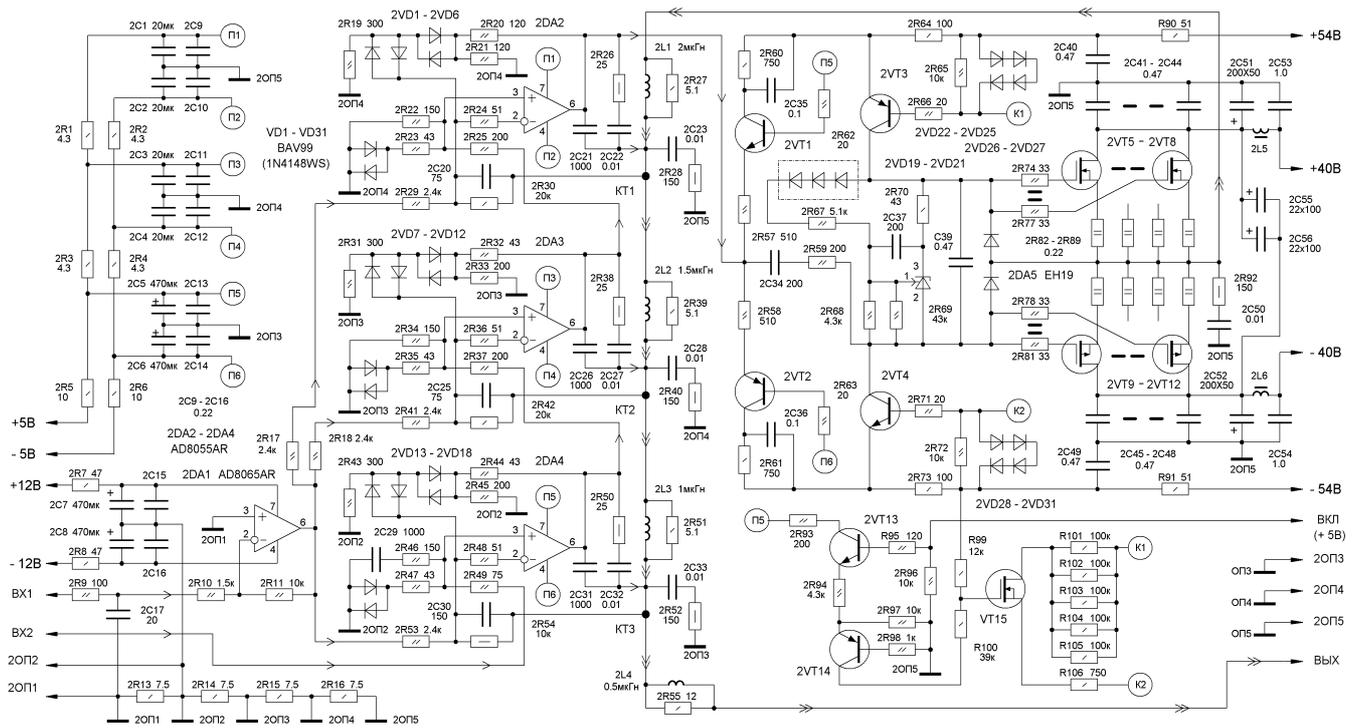
Рис 11

Повторитель на транзисторе VT1 построен по схеме «следящий каскод». Относительно сложная схема применена для уменьшения влияния входной нелинейной ёмкости, тем самым уменьшается риск прохода этих искажений сигнала с затвора VT1 на общий вход УМЗЧ.

Входной сигнал УМЗЧ приходит в блок ПУС, здесь он одновременно поступает на входной

V10 - блок ВУМ

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС



2VT1 - КТ6117А, 2VT2 - КТ6116А, 2VT3 - КТ9115А, 2VT4 - КТ940А, 2VT5-2VT8 - ИРФ640, 2VT9 - 2VT12 - ИРФ9640, 2VT13 - КТ3102А, 2VT14 - КТ6116А, 2VT15 - КП1501А 2R82 - 2R89 = 0.22 Ом = 15x3.3 Ом

Рис 12

ИТУН и на повторитель на полевом транзисторе VT1. С этого повторителя VT1 сигнал

поступает на первый вход усилителя ВУМ. С выхода ВУМ мощный сигнал возвращается в блок ПУС. В блоке ПУС ОУ DA1 усиливает разностный сигнал (т.е. сигнал ошибки в петле ООС) от входного ИТУНа и цепи прецизионной ООС, подключённой к точке, в которую приходит мощный сигнал с выхода блока ВУМ. С выхода ОУ DA1 этот усиленный разностный сигнал поступает на второй (уточняющий) вход ВУМ, этим и замыкается петля ООС.

Таким образом, прецизионный усилитель на ОУ DA1 (блок ПУС) — главный канал всего УМЗЧ и именно он окончательно формирует (уточняет) выходной сигнал УМЗЧ (в точке КТ4), исходя из критерия своей прецизионной, стопроцентной и на ВЧ и на НЧ, общей ООС.

Усилитель ВУМ состоит из входного усилителя на ОУ 2DA1 и мощного многоканального усилителя на радиочастотных ОУ 2DA2, 2DA3, 2DA4 с выходным каскадом на транзисторах 2VT1—2VT12. Усилитель на ОУ 2DA1 усиливает входной сигнал и подаёт его на входы главных каналов на ОУ 2DA2, 2DA3, 2DA4. Этим соответственно достигаются уменьшение коэффициентов деления (ослабления) по петле ООС в усилителях с этими главными каналами и относительно низкая частота единичного усиления этих многоканальных усилителей (≈ 400 кГц). Структура и логика работы мощного многоканального усилителя идентична усилителю, ранее показанному на рис. 8, где подробно рассмотрен и его принцип работы. Мощный выходной каскад состоит из драйвера на транзисторах 2VT1—2VT4, и мощного истокового повторителя на транзисторах 2VT5—2VT12. Первый мощный многоканальный усилитель (ОУ 2DA2 и 2VT1—2VT12) аналогичен версии усилителя, приведённого в [2].

Каждый главный канал на ОУ 2DA2, 2DA3, 2DA4 в блоке ВУМ стабилизирует сигнал в точке подключения своей ООС в полосе 200 МГц и обладает усилением в 70 дБ на частоте 20 кГц. Соответственно, общий коэффициент усиления в петлях ООС ВУМ, с учётом усиления трёх радиочастотных ОУ и мощного дискретного выходного каскада, составит $3 \times 70 + 20 = 230$ дБ. Общий коэффициент усиления по всем петлям обратных связей всего УМЗЧ (на частоте 20 кГц и с учётом прецизионного ОУ DA1 в блоке ПУС), составит $4 \times 70 + 20 = 300$ дБ.

Коэффициент передачи усилителя на ОУ 2DA1 будет равен 6, $K_{ус} = 2R_{11} / (2R_{10} + 2R_9 + R_8)$. Коэффициент передачи мощного усилителя на ОУ 2DA2, 2DA3, 2DA4 и 2VT1- 2VT12, равен 4,2 ($K_{ус} = 2R_{54} / 2R_{53} = 2R_{42} / (2R_{18} + 2R_{41}) = 2R_{30} / (2R_{17} + 2R_{29})$). Соответственно, с учётом этих двух ООС общий коэффициент передачи ВУМа (по отношению к первому входу) составит $K_{ус} = (2R_{11} / (2R_{10} + 2R_9 + R_8)) \times (2R_{54} / 2R_{53}) = 25$.

Коэффициент передачи ПУСа определён крутизной входного ИТУНа и сопротивлением прецизионной ООС, т.е. равенству их токов. При идеальной работе транзисторов ИТУНа коэффициент передачи ПУС равен $K_{ус} = R_{30} / (R_{14} \parallel R_{15}) = R_{30} / ((R_{14} \times R_{15}) / (R_{14} + R_{15})) = 25$. В общем случае, коэффициент передачи ВУМа должен быть равен коэффициенту передачи прецизионной ООС блока ПУС. Соответственно, с учётом выше сказанного получаем $R_{30} / ((R_{14} \times R_{15}) / (R_{14} + R_{15})) = (2R_{11} / (2R_{10} + 2R_9 + R_8)) \times (2R_{54} / 2R_{53})$. Частоты среза петли ООС (блок ВУМ) и общей ООС (блок ПУС) должны быть равны, т.е. $R_{30} * C_{10} = 2R_{54} * 2C_{30} = 2R_{42} * 2C_{25} = 2R_{30} * 2C_{20}$. Соответственно частота среза УМЗЧ $f_{среза} = 1 / (2 * \pi * R_{30} * C_{10}) = 100$ кГц.

Диоды 2VD1—2VD18 выполняют функцию ограничения сигнала при перегрузке усилителя, как по входу, так и по выходу ОУ. В нормальном состоянии диоды закрыты и в работе усилителя участия не принимают. При перегрузке УМЗЧ диоды VD1—VD4, 2VD1—2VD4, 2VD7—2VD10, 2VD13—2VD16 открываются и тем самым создают местный канал ООС, а сами ОУ (DA1, 2DA2, 2DA3, 2DA4) при этом не входят в режим перегрузки, т.е. работают в линейном режиме.

Диоды 2VD19—2VD21 служат датчиком для термостабилизации выходного каскада. Диоды 2VD22—2VD25 (2VD28—2VD31) представляют собой источник опорного напряжения для предвыходного каскада. И наконец, диоды 2VD26, 2VD27 выполняют функцию ограничения входного напряжения выходного каскада при входном уровне более 8 В.

Интегратор на ОУ DA2 осуществляет подавление постоянной составляющей на выходе УМЗЧ по принципу регулировки напряжения смещения на конденсаторе C7. Это напряжение изменяет начальные токи верхнего и нижнего плеча входного ИТУНа, устраняя его выходной постоянный ток.

V10 - стаб

МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС

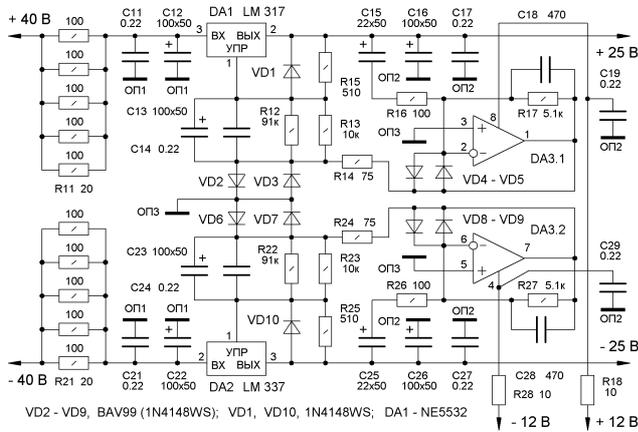


РИС 13

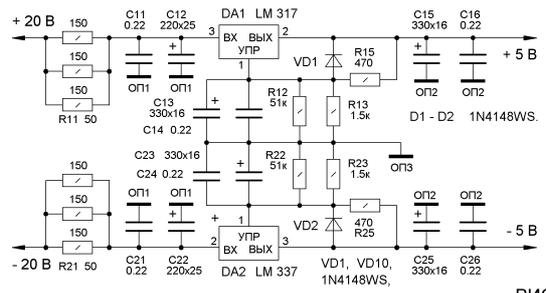


РИС 15

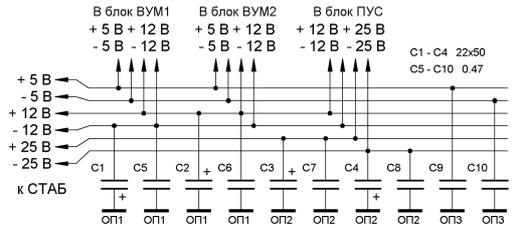


РИС 16

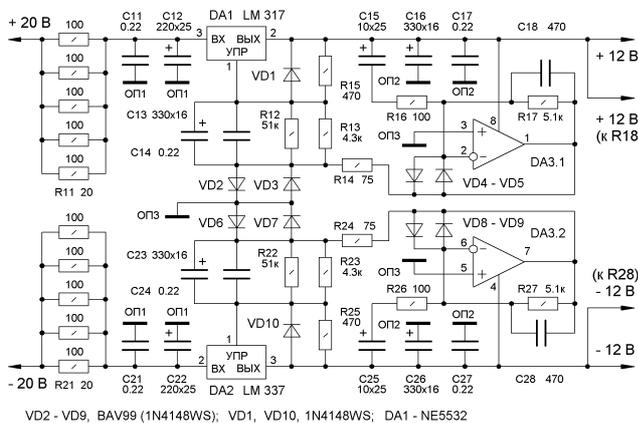


РИС 14

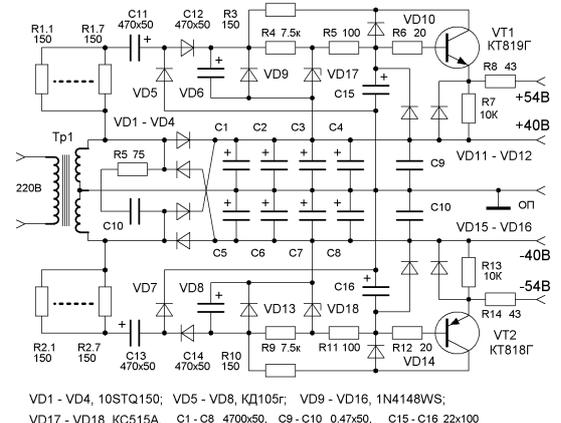


РИС 17

На рис. 13—15 приведены схемы стабилизаторов напряжения $\pm 5\text{В}$; $\pm 12\text{В}$; $\pm 25\text{В}$. Эти стабилизаторы являются общими для всех УМЗЧ. На рис. 16 показана схема кросс-фильтра для напряжений $\pm 5\text{В}$; $\pm 12\text{В}$; $\pm 25\text{В}$. Плата кросс-фильтра находится в непосредственной близости с общей точкой заземления. Прецизионные стабилизаторы напряжения $\pm 12\text{В}$; $\pm 25\text{В}$ собраны на интегральных стабилизаторах и имеют дополнительные ОУ, которые включены по критерию подавления сигнала (т.е. шума и помех) на их выходе. Блоки ВУМ (выносных усилителей мощности) имеют каждый свой отдельный блок питания, схема которого показана на рис. 17.

Касательно так называемых земляных – корпусных, т.е. общих проводов, следует отметить, что устоявшееся название «общий» провод, в целом, противоречит самой концепции усилителя. Суть её заключается в последовательном уточнении сигнала функционально разными усилителями. Эти усилители обладают разным уровнем искажений и соответственно должны обладать отдельными общими проводами.

Общие провода ОП1—ОП5 от блока ПУС подсоединены к общей точке заземления, которая находится в непосредственной близости от блока ПУС. Общие провода (2ОП1—2ОП5) в блоке ВУМ можно разделить на прецизионно-сигнальные 2ОП1, 2ОП2 и силовые 2ОП3, 2ОП4, 2ОП5. Общие провода 2ОП1 и 2ОП2 служат как возвратные провода для входных сигналов Vx1, Vx2 и с обратной стороны подсоединены к ОП4 в блоке ПУС. Силовые общие провода 2ОП3, 2ОП4, 2ОП5 подсоединены к общей точке заземления.

Каждый ОУ обладает своим сигнальным общим проводом, к которому и подключены их входные цепи. Соответственно 2ОП1 — для ОУ 2DA1, 2ОП2 — для ОУ 2DA4, 2ОП3 — для ОУ 2DA3, 2ОП4 — для ОУ 2DA2. В качестве общих проводов для питания этих же ОУ используется общий провод от следующего усилителя. Соответственно 2ОП2 — для ОУ 2DA1, 2ОП3 — для ОУ 2DA4, 2ОП4 — для ОУ 2DA3, 2ОП5 — для ОУ 2DA2. Силовые общие провода 2ОП5, 2ОП4, 2ОП3 применяются и для питания соответствующих ОУ, одновременно выполняя функции силовых общих проводов в мощных многоканальных усилителях — соответственно в первом, втором, и третьем.

Аналогичная ситуация и со стабилизаторами напряжения на рис. 13—17, в которых каждый общий провод подсоединён к общей точке заземления по отдельности.

Настройка, компоненты, измерения:

Настройка УМЗЧ сводится к трём параметрам. Соответственно первое: ток покоя выходного каскада (2VT5—2VT12 в блоке ВУМ) должен находиться в пределах 150...300 мА, рекомендуется 200 мА. Ток покоя регулируют подбором 2R69, который уточняет напряжение стабилизации 2DA5 на затворах выходных транзисторов ($\approx 7,2$ В). Второе: постоянный выходной ток входного ИТУНа (блок ПУС, VT4—VT8) должен быть равен нулю, критерий — нулевое напряжение на выходе УМЗЧ и небольшое (+/-2В) на выходе интегратора ОУ DA2. Это рекомендуется сделать при помощи уточнения номинала R19. И третье: необходимо сделать идентичными усиление блока ВУМ и блока ПУС (их коэффициенты передачи). То есть должно выполняться равенство (см. выше) $R30 / ((R14 \times R15) / (R14 + R15)) = (2R11 / (2R10 + 2R9 + R8)) \times (2R54 / 2R53)$. Это рекомендуется делать путём уточнения номиналов 2R11 и 2R10 и при помощи дополнительных, параллельно подключённых к ним резисторов. Критерием настройки здесь следует считать минимальный уровень сигнала на выходе ОУ DA1 в звуковом диапазоне частот.

В отсутствие уверенности в правильности сборки усилителя рекомендуется отдельная настройка (и проверка) блоков ПУС и ВУМ (пункт один и два). Для этого следует отсоединить (исключить) соединительные провода между блоками ПУС и ВУМ, т.е. три провода — vx1, vx2, вых, и исключить элементы L1, L2, L3, R49, R51 (блок ПУС). Далее параллельно C11 (блок ПУС) подключают резистор номиналом 1 кОм, а vx2 в блоке ВУМ (правый вывод 2R49) соединяют с 2ОП2. После этого производят настройку по пунктам один и два.

Сам по себе блок ВУМ функционально работоспособен и без блока ПУС. Например, при проверке нагрузку (4 Ом) можно подключить к выходу КТ3 (правый вывод 2L4), подав сигнал на vx1, а vx2 замкнуть на 2ОП2. Возможно подключение нагрузки и к другим выходам внутри УМЗЧ, например КТ1 и КТ2. При подключении нагрузки к выходу КТ1 следует исключить из работы два последующих уточняющих усилителя на ОУ 2DA3, 2DA4. Соответственно следует исключить (изъять) следующие элементы: 2R25, 2R41, 2R39, 2L2 и 2R37, 2R53, 2R51, 2L3.

В качестве входного ИТУНа (VT4—VT8) можно применить и другие ИТУНЫ, например рис. 14 в [5]. Положительной особенностью ИТУНа данного типа можно отметить отсутствие интегратора в петле общей ООС. Данные типы ИТУНов относятся к инвертирующим ИТУНам. Однако в усилителе возможно применение и неинвертирующих типов ИТУНа. В этом случае инвертирующий усилитель на ОУ 2DA1 следует изменить на неинвертирующий.

Все резисторы в блоках ПУС и ВУМ — SMD типоразмеров 0805 и 1206 с габаритной мощностью 0.125 и 0.25Вт соответственно. Резисторы габаритной мощностью более 0.25Вт набраны (составлены) из нескольких резисторов типоразмера 1206 и с номиналом, пропорционально большим. Соответственно в блоке ПУС: R14 — 3x2.4кОм; R15 — 3x2.4кОм; R19 — 2x430; R22 — 2x2кОм; R25 — 2x2кОм; R30 — 10x100кОм; R42 — 3x510; R44 — 2x51; R56 — 2x150; R57 — 2x300. В блоке ВУМ: 2R26 — 2x51; 2R28 — 2x300; 2R38 — 2x51; 2R40 — 2x300; 2R50 — 2x51; 2R52 — 2x300; 2R54 — 2x20кОм; 2R92 — 2x300; 2R82 — 2R89 — 15x3.3 Ом.

Сопrotивления в петле прецизионной общей ООС (R30) должны быть достаточно качественные, здесь можно рекомендовать металлоплёночные резисторы или типа MELF, весьма хорошо здесь работают и углеродистые резисторы. Аналогичная рекомендация

относится и к конденсатору общей ООС (С10), здесь можно рекомендовать полипропиленовые (МКР) или слюдяные (КСО) конденсаторы, возможно применение и керамических (SMD) NPO конденсаторов на напряжение 100—500 В.

При напряжении питания мощного выходного каскада ± 35 В или менее выходные транзисторы в выходном каскаде целесообразно заменить на IRF540, IRF9540.

К индуктивностям в блоках ПУС и ВУМ (L1; L2; L3; 2L1; 2L2; 2L3; 2L4) особых требований не предъявляется, единственное требование — это диаметр обмоточного провода не менее 1 мм. При диаметре каркаса 12.8 мм обмотка для L1; L2; L3; 2L1 — 17 (4 + 13) витков, 2L2 — 14 витков, 2L3 — 10 витков, 2L4 — 6 витков.

Как вариант с целью упрощения конструктива, индуктивности в блоке ВУМ 2L1; 2L2; 2L3; 2L4 можно намотать на едином каркасе, т. е. фактически одну общую катушку индуктивности с несколькими отводами. Подобное решение несколько снижает эффективность подавления ВЧ искажений в данной структуре, но одновременно уменьшает паразитную (конструктивную) ёмкость в этих индуктивностях, что есть существенный положительный фактор для радиочастотных ОУ. В авторском варианте общая катушка (2L1; 2L2; 2L3; 2L4) при диаметре каркаса 9 мм имеет 60 витков — 24+17+12+7. Её отводы могут быть выполнены тонким (0.3...0.5 мм) проводом. Измеренная индуктивность немного меньше рекомендованных выше значений и составит для 2L1; 2L2; 2L3; 2L4 соответственно 1.7 мкГн, 1 мкГн, 0.7 мкГн, 0.4 мкГн.

Блоки ВУМ находятся на удалении от блока ПУС. Соответственно длина соединительных проводов между этими блоками составляет 30...40 см. Для уменьшения паразитной ёмкости провод с выхода блока ВУМ (т.е. между L1 — 2L4) помещён в кембрик.

На фотографиях рис. 18—22 приведена форма сигналов на выходах главных каналов. Сигнал на выходах главных каналов — это усиленный ОУ сигнал ошибки в петле ООС соответствующего многоканального усилителя. То есть:

Сигнал на выходе ОУ 2DA2 — это сигнал ошибки на выходе первого усилителя т.е. в точке КТ1.

Сигнал на выходе ОУ 2DA3 — это сигнал ошибки на выходе второго усилителя т.е. в точке КТ2.

Сигнал на выходе ОУ 2DA4 — это сигнал ошибки на выходе третьего усилителя т.е. в точке КТ3.

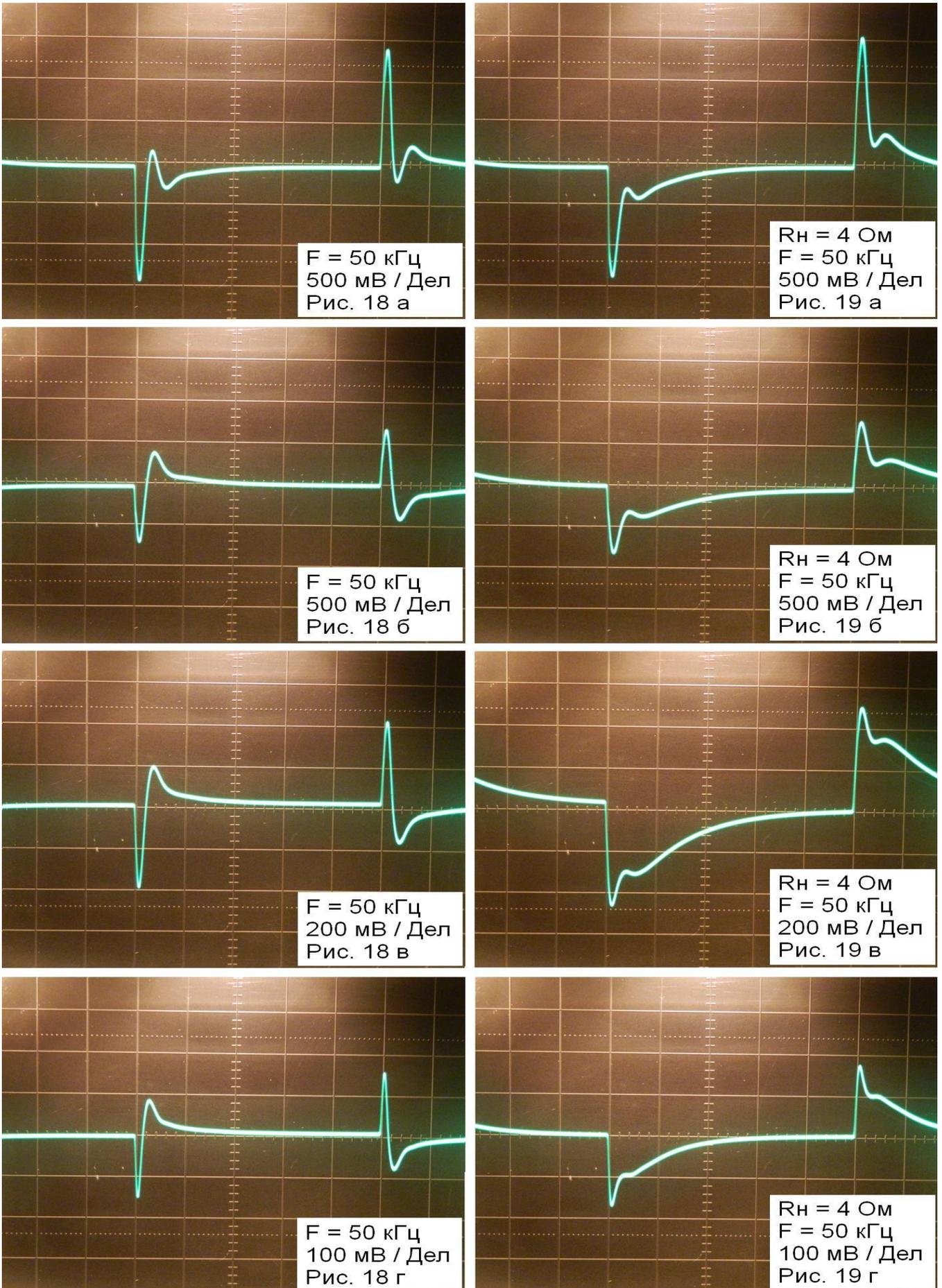
Сигнал на выходе ОУ DA1 — это сигнал ошибки на выходе четвертого усилителя т.е. в точке КТ4.

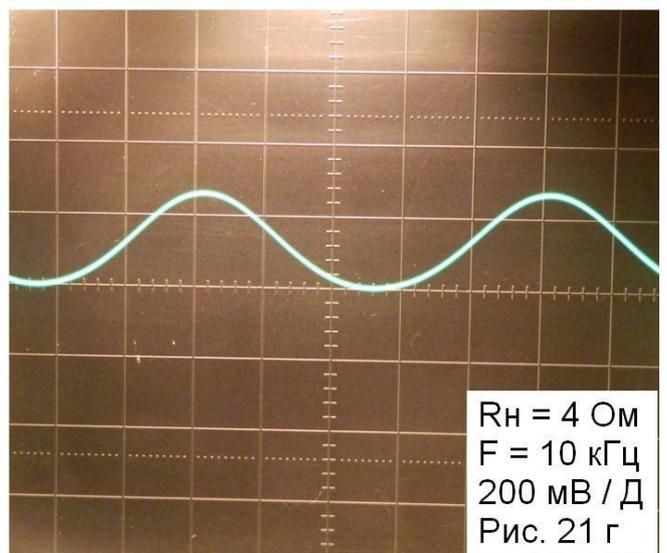
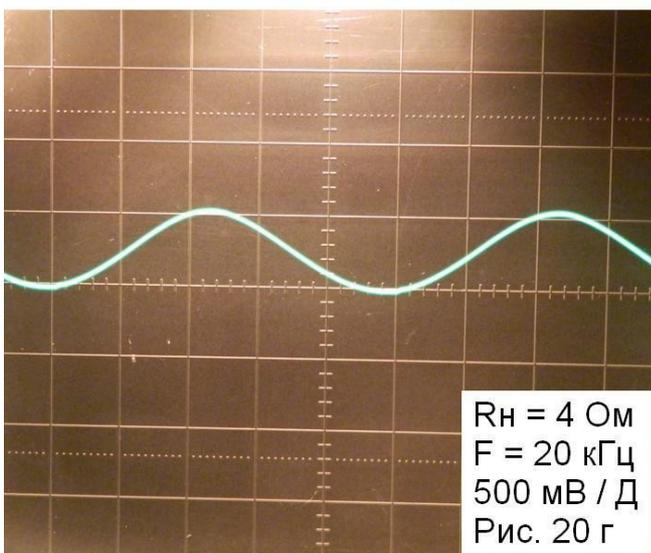
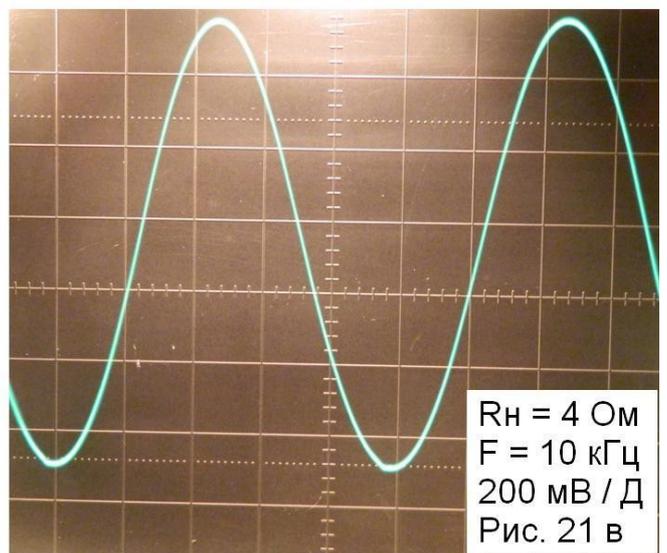
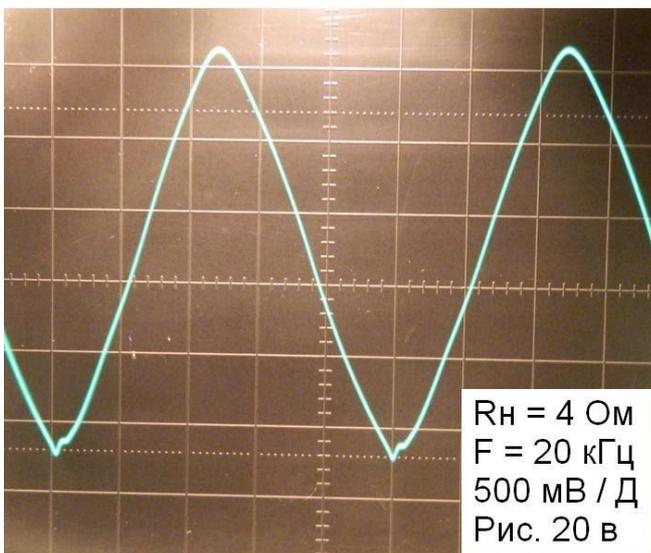
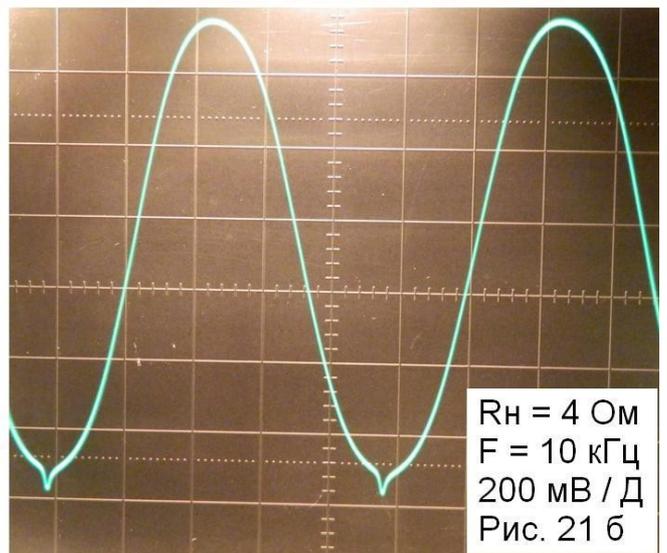
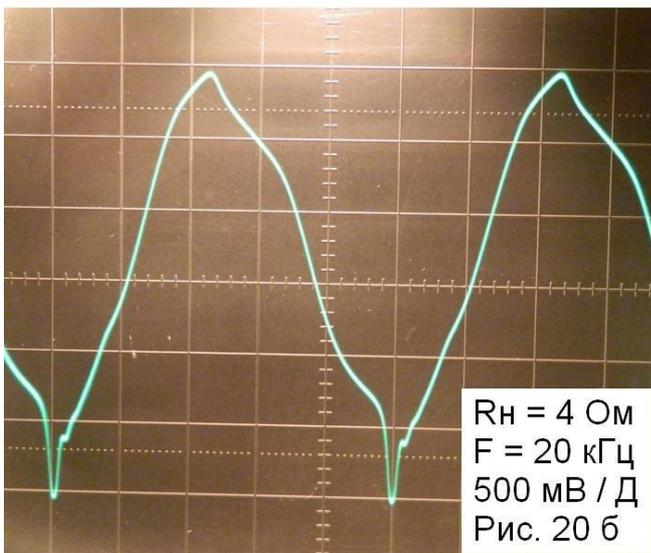
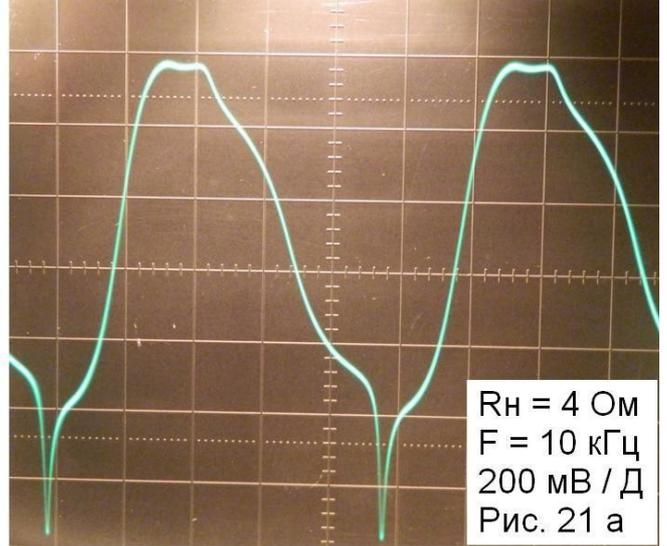
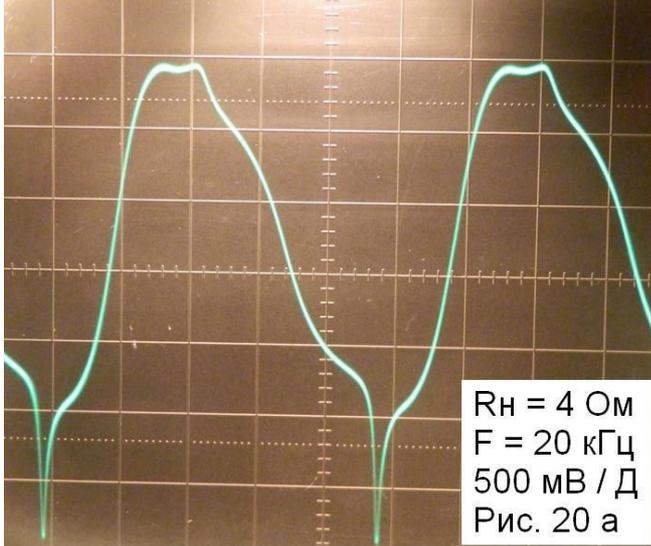
Соответственно на рис. 18—21 выход ОУ 2DA2 показан на фотографиях с буквой «а», выход ОУ 2DA3 — на фотографиях с буквой «б», выход ОУ 2DA4 — на фотографиях с буквой «в», выход ОУ DA1 — на фотографиях с буквой «г». Вследствие сказанного выше мы наблюдаем на этих фотографиях с буквами от «а» до «г» процесс изменения формы сигнала ошибки внутри петли ООС самого усилителя, при проходе мощного выходного сигнала от точки КТ1 до точки КТ4.

На фотографиях рис. 18—19 показана работа усилителя с сигналом меандр, т. е. реакция УМЗЧ на скачок входного напряжения, что характеризует устойчивость структур и системы в целом. Частота сигнала — 50 кГц, амплитуда выходного сигнала — 2 В. На рис. 18 показан режим работы УМЗЧ без нагрузки, а на рис. 19 — при работе на эквивалент нагрузки 4 Ом.

Здесь интересно обратить внимание на то, что при проходе мощного сигнала через уточняющие усилители импульсная ошибка уменьшается с 1,5 В (рис. 18.а) до 150 мВ (рис. 18.г).

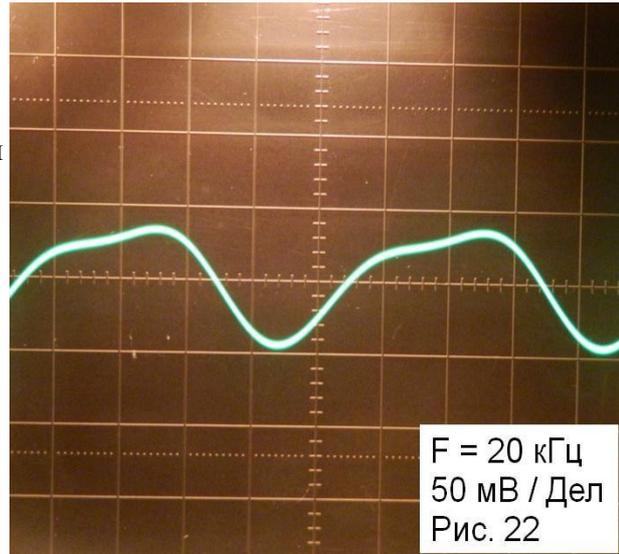
На фотографии рис. 20 показана работа усилителя при работе с синусоидальным сигналом. Частота сигнала — 20 кГц, амплитуда выходного сигнала — 29 В, при работе на эквивалент нагрузки в 4 Ом и соответственно выходной мощности 100 Вт. Как видно из фотографии на рис. 20.а, сигнал ошибки в этой петле ООС очень нелинеен, что обусловлено нелинейностью





дискретного выходного каскада. И в первую очередь это связано с нелинейностью отрицательного плеча УМЗЧ, т.е. транзистора IRF9640.

Однако и на рис. 20.б и на рис. 20.в сигнал также весьма нелинеен и имеет явно треугольную форму. Однако треугольная форма сигнала в данном случае обусловлена началом работы входных диодных ограничителей VD5, VD6 и VD11, VD12, которые начинают работать при входном напряжении более 0.7 В. Ограничение сигнала внутри петли ООС приводит к увеличению сигнала на выходах предыдущих усилителей, точнее усиливаются «верхушки» синусоиды. Но даже в этом случае сигнал на выходе прецизионного усилителя на ОУ DA1 (рис. 20.г) близок к идеальному.



При уменьшении уровня сигнала, его частоты или при увеличении сопротивления нагрузки уровни сигналов на выходах главных каналов существенно уменьшаются.

На фотографии рис. 21 показана работа усилителя при режимах, идентичных приведённым ранее для фотографий рис. 20, но при частоте сигнала 10 кГц. Можно отметить, что сигналы на рис. 20.а и на рис. 21.а весьма похожи, хотя они и отличаются по амплитуде в 2,5 раза. На фотографии рис. 21.б и рис. 21.в приведён сигнал на выходе второго и третьего главного канала. Причём если на рис. 21.б форма сигнала близка к синусоиде, но имеет заметные искажения, то на рис. 21.в форма сигнала весьма близка к идеальной. Это означает, что мощный сигнал в точке КТЗ (что, по сути, сигнал на выходе блока ВУМ) обладает низкими искажениями. Соответственно и уровень предискаженного сигнала на выходе главного канала в блоке ПУС, который как раз и компенсирует (подавляет) искажения в блоке ВУМ, будет ещё намного меньше, что собственно и отражает фото на рис. 21.г.

Но здесь целесообразно обратить внимание на один существенный нюанс. Посмотрим внимательно на рис. 21.г. Создаётся впечатление, что верхушки синусоиды немного уже по сравнению с её провалами. То есть положительная полуволна немного отличается от отрицательной. Фактически это означает явное наличие второй гармоники сигнала. Если отключить нагрузку от усилителя, то сигнал на выходе ОУ DA1 см. рис. 21.г, заметно изменится и станет как на рис. 22. Получается, что уровень основной гармоники стал намного меньше, а уровень второй гармоники при этом практически не изменился. Это означает, что данный вид искажений не связан с искажениями мощного дискретного выходного каскада, а обусловлен нелинейностью входной части усилителя.

Для начала предположим, что входной ИТУН работает идеально, т.е. не вносит искажений в сигнал. Входной сигнал УМЗЧ поступает на затвор транзистора VT1, который включён как повторитель и работает в режиме класса А. Данный истоковый повторитель вносит в сигнал, хоть и не большие, около 0,01 %, но достаточно заметные искажения, причём это именно вторая гармоника сигнала. Полученный сигнал является входным (т.е. опорным) для блока ВУМ, и усиливается блоком ВУМ вместе с этими искажениями. Далее мощный сигнал из блока ВУМ приходит в блок ПУС. Но в блоке ПУС входным (т.е. опорным) сигналом служит сигнал входного ИТУНа. В соответствии с этим прецизионный главный канал на ОУ DA1 в блоке ПУС исправляет (компенсирует) искажения как мощных каскадов в блоке ВУМ, так и искажения предыдущих каскадов, т.е. и VT1 и ОУ 2DA1, а также разного рода наведённые искажения. Это собственно и отражает фото на рис. 22.

Однако следует заметить, что реальность немного сложнее. Дело в том, что входной ИТУН в блоке ПУС по факту обладает аналогичными искажениями, так как входной каскад (транзисторы VT4, VT5) работают в сходных режимах с VT1. Исходя из этого, ОУ DA1 может

как уменьшать (вычитать), так и увеличивать (прибавлять) искажения в мощном выходном сигнале УМЗЧ. Эти искажения в целом составят около 0.01% и, по сути, являются искажениями во входном ИТУНе.

Версия от 25.05.2012 г.

Литература

1. **Литаврин А.** Многоканальное усиление в УМЗЧ с крайне глубокой ООС. — Радио, 2004, № 3, с. 18—20; № 4, с. 19—21, 32.
2. **Литаврин А.** Простой усилитель или МКУС в УМЗЧ с глубокой стопроцентной ООС. — <<ftp://ftp.radio.ru/pub/2007/06/mkus.zip>>.
3. **Литаврин А.** УМЗЧ с параллельным каналом и максимально глубокой ООС. — Радио, 2007, № 6, с. 19—22.
4. **Литаврин А.** УМЗЧ с крайне глубокой ООС. — Радио, 2011, № 4, с. 17—20; № 5, с. 17—19.
5. **Литаврин А.** МКУС в УМЗЧ с токовым управлением и крайне глубокой ООС. — Радио, 2011, № 10, с. 17—20; № 11, с. 15—18.
6. **AD8055.** — <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8055_8056.pdf>.
7. **AD8065.** — <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8065_8066.pdf>.