

Усилитель «АРХОНТ» или МКУС в УМЗЧ (универсальная структура №2)

Здесь продолжается тема, о МногоКанальных Усилительных Структурах (МКУС) на основе критериев отрицательной обратной связи (ООС), и в целом представляет собой логическое продолжение предыдущих публикаций. В данной публикации рассмотрены два варианта УМЗЧ на основе универсальной структуры АРХОНТ. Первый - с выходом на дискретных транзисторах (IRF540/9540) в классе Н, и второй с выходом на основе микросхемы LM3886. В целом данный вариант усилителя мощности, представляет модифицированную версию предложенную ранее в трилогии [1-3].

Усилитель это устройство, которое всецело работает под контролем ООС. Соответственно качество и точность, с которой ООС может формировать сигнал, однозначно связана с критериями ООС. Как следствие, с точки зрения точности работы и максимизации качественных характеристик усилителя, Время Реакции Петли ООС (ВРП ООС) должно быть крайне малым и одновременно с этим высоко стабильным. Полоса работы ООС максимально широкая, а её глубина предельно (крайне, гипер) глубокая в [1-3]. 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 [1 - 5]. По совокупности всё это обеспечивает предельно высокую точность петли слежения ООС.

Также при очень глубокой ООС, имеется возможность для ряда каскадов усилителя работать в малосигнальном режиме. Или даже в почти статическом режиме. И критерий здесь весьма прост – нет сигнала, нет и искажений!

В целом игнорирование критериев ООС при разработке УМЗЧ – это прямой путь к профанации. Так у большинства усилителей ну типа «глубокоООСников» с глубиной скажем так не очень. При этом они хронически имеют большое ВРП ООС, что обусловлено значительным числом последовательных каскадов усиления. Также эти усилители почти тотально страдают большим делением (ослаблением) по петле ООС. Значительное деление (ослабление) сигнала по петле ООС это серьезный недостаток, граничащий с патологией. Это вовсе не значит, что подобные усилители работают очень плохо, но до предельно высоких технических и аудио характеристик им далеко.

Совокупность недостатков в подобных разработках привели к рождению движения противников ООС, точнее почти секты, «антиглубокоООСников». Нужно заметить, что сама идея борьбы с глубиной ООС есть явная глупость. Как следствие наплодилось гора полуюродивых усилителей, со специфичным «звуком». Но если откинуть явно юморные версии УМЗЧ, то в осадке останется вполне достойная структура, состоящая из высоколинейного драйвера и мощного повторителя. Следует обратить внимание на то, что повторитель это усилитель со стопроцентной ООС, при весьма малом его ВРП (при малом числе каскадов). Именно за счет стопроцентной ООС такие усилители порой работают весьма прилично. Понятно, что такой усилитель работал бы существенно лучше при большем запасе по петле этой ООС.

Получается, что попытки улучшить одни критерии ООС в ущерб другим не очень конструктивны. Соответственно следует считать более разумным и правильным подход, когда выполняются все критерии ООС. Именно МКУС позволяют объединить достоинства различных усилителей и соответственно устранить (точнее компенсировать) их недостатки, тем самым получить характеристики близкие к теоретически предельным.

Структура

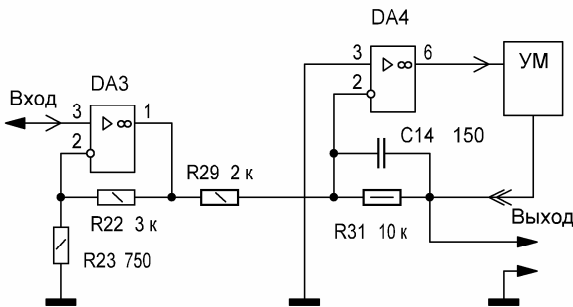


Рис. 1.1

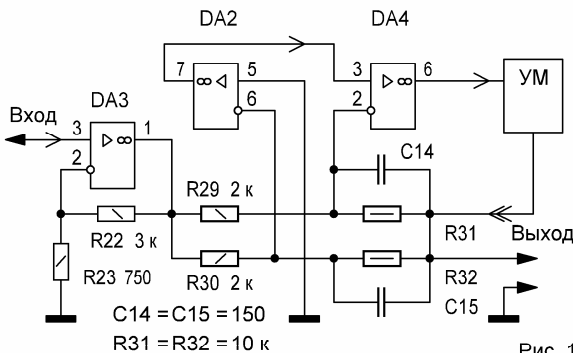


Рис. 1.2

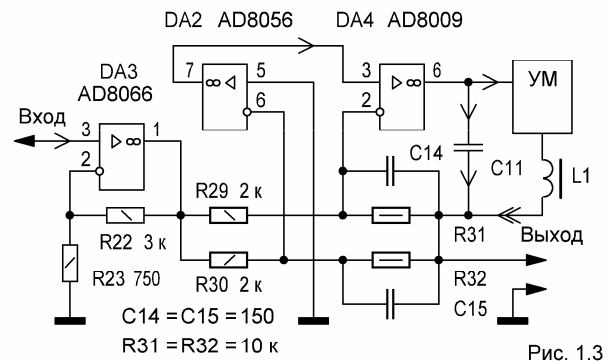


Рис. 1.3

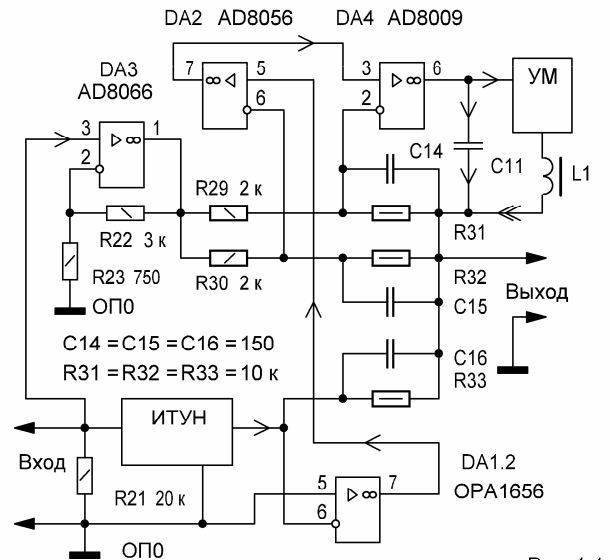


Рис. 1.4

СТРУКТУРА «АРХОНТ»

Рассмотрим структуру типового УМЗЧ рис. 1.1. Здесь ОУ DA4 управляет усилителем мощности (УМ) т.е. мощным выходным каскадом. Масштабирующий усилитель на ОУ DA3 предварительно усиливает входной сигнал. Усилитель мощности (УМ) относительно инерционен, соответственно и параметры связки ОУ DA4 + УМ, весьма скромные. Модифицируем мощный выходной каскад (связка ОУ DA4 + УМ) на основе МКУС.

Подключим дополнительный ОУ (DA2) по входу ОУ DA4, см рис. 1.2. Далее, выход ОУ DA4, при помощи C11 соединим с выходом УМЗЧ, а выход УМ соединим с выходом УМЗЧ, но через L1 (см. рис. 1.3).

Здесь ОУ DA4 главный канал (т.е. усилитель обладающий приоритетом на замыкание петли ООС), и дополнительные усилители (каналы) подключенные по входу (ОУ DA2) и по выходу (УМ), главного канала. Элементы C11 и L1 образуют сумматор для ВЧ и НЧ сигналов. По сути, приведённая здесь многоканальная структура (рис. 1.3) повторяет версию структуры предложенную ранее в [4].

Благодаря дополнительному ОУ (DA2) получаем дополнительное усиление порядка в 60 дБ, а благодаря цепи обхода по ВЧ (C11), при высоком быстродействии ОУ DA4, получаем предельно высокое быстродействие полученной структуры.

Между тем данный усилитель имеет хоть и небольшое (R31/R29) но довольно существенное деление (т.е. ослабление) сигнала по петле ООС. Соответственно и качество работы усилителя с такой ООС будет высоким, но не идеальным. Дополним

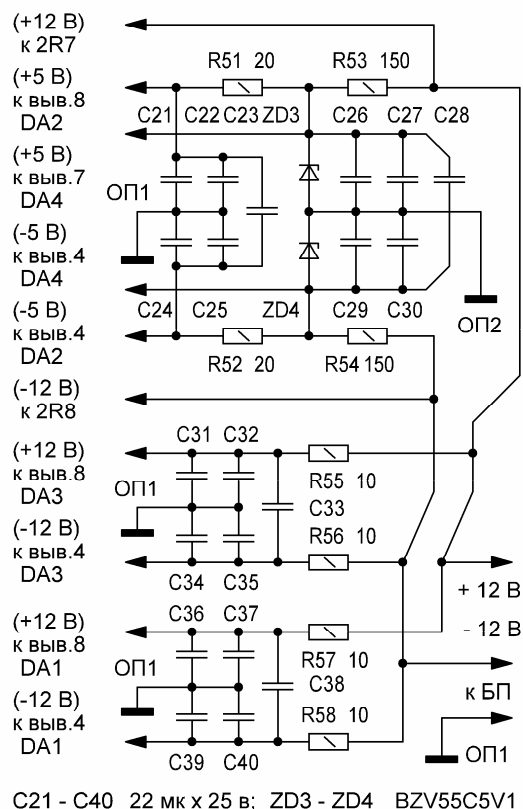


Рис. 2

Соответственно на см. рис. 1.4, приведена многоканальная усилительная структура, которая всецело соответствует критериям ООС. Здесь воедино объединены такие сильно разрозненные и очень противоречивые параметры усилителей, такие как - высококачественные технические характеристики в звуковом диапазоне (ИТУН + ОРА1656), что обусловлено стопроцентной ООС (т.е. без ослабления сигнала по петле). А также, высокое быстродействие и широкая полоса ООС (AD8009), и большая выходная мощность (УМ). По совокупности усиления (ОРА1656 + AD8055 + AD8009 + УМ) здесь обеспечена гипер глубокая стопроцентная ОООС (ГГСОООС), с усилением по петле более 200 дБ. Как само собой разумеется, УМ тоже может работать на основе своей очень глубокой ООС.

УМЗЧ «АРХОТ» (ИРФ540/9540)

В силу большой нелинейности такого выходного каскада, здесь было бы весьма разумно применить вариант МКУС на основе многоядерной усилительной структуры. Суть и логика работы такой структуры состоит в том, что мощный сигнал

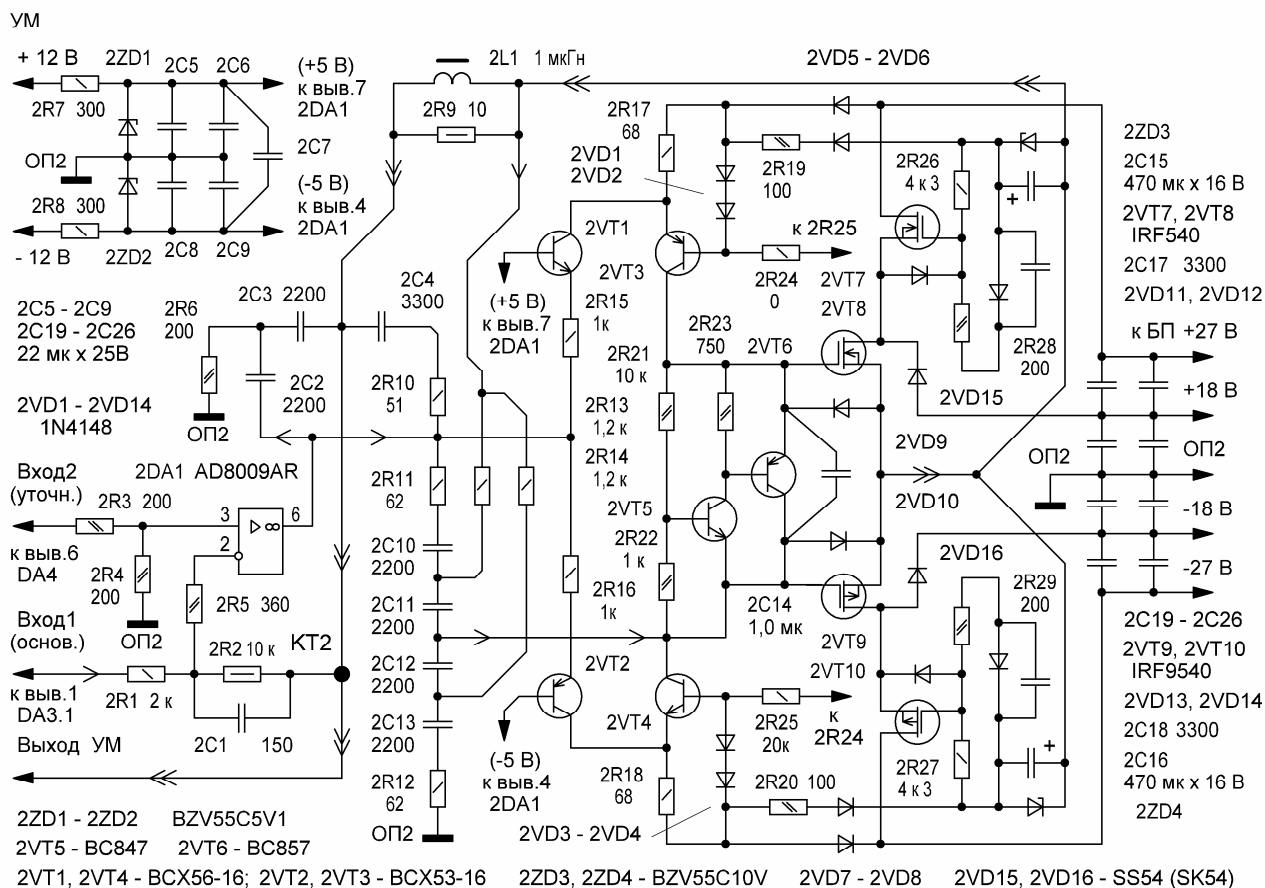


Рис. 3

последовательно переходя от одного мощного усилителя (ядра) к другому мощному усилителю (ядру), последовательно уточняется [5]. Существенным плюсом такого решения является также разделение паразитных ёмкостей – т.е. выходного каскада и элементов подключенных к выходу УМЗЧ. Высокие технические параметры такого УМЗЧ обеспечиваются за счёт четкого выполнения критериев ООС, при ГГСОООС, на основе МКУС.

Схема варианта такого УМЗЧ приведена на рис. 2, в общем, она очень похожа структуру усилителя рассмотренного ранее на рис. 1.4, но с учётом дополнительных элементов и цепей питания, а блок УМ имеет два входа. На рис. 3 приведен вариант схемы блока УМ с выходным каскадом класса Н, на мощных выходных транзисторах IRF540/9540. На рис. 4 представлена схема ИТУН, а на рис. 5 представлена обобщённая, т.е. суммированная схема (рис. 2 + рис. 3 + рис. 4) со схемой подключения.

Сам усилитель целесообразно рассмотреть в виде блочной схемы. Стрелки на рисунках указывают направление в пути следования сигнала, при чём маломощный сигнал показан одиночной стрелкой, а мощный двойной. Внутренние мощные выходы усилителя, обозначены на схеме как контрольные точки (КТ), которые выделены утолщением.

Функционально усилитель (УМЗЧ) условно состоит из двух блоков. Мощного (радиочастотного) блока и блока прецизионного усилителя сигнала. Мощный блок, в свою очередь, состоит из масштабирующего предварительного усилителя (ОУ DA3.1) и многоядерной структуры в виде двух мощных усилителей, обозначим их как ядро №1 и ядро №2 (блок УМ). Принцип работы их основан на МКУС. Блок прецизионного усилителя сигнала соответственно состоит из ИТУН и прецизионного усилителя сигнала

ИТУН

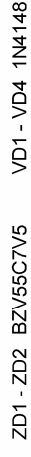


Рис. 4.3

на ОУ DA1.2. Основой качественной работы этого ОУ следует считать его работу в малосигнальном (т.е. почти статическом режиме).

В качестве главного канала (т.е. усилитель который обладает приоритетом на замыкание петли ООС) в усилительных ядрах №1 и №2, применены радиочастотные (широкополосные) операционные усилители (ОУ). Эти ОУ соответственно работают в полосе до 1 ГГц - DA4 и 2DA1 (AD8009). Этим обеспечивается крайне малое время реакции петли ООС (ВРП ООС), при стопроцентной ООС на ВЧ (C14, 2C1). Сопротивления R27 (и 2R5) разрешают данным токовым радиочастотным ОУ работать со стопроцентной ООС. В блоке прецизионного усилителя сигнала применён ОУ ОРА1656 (DA1), он обладает высокими техническими характеристиками в звуковом диапазоне.

Каждое усилительное ядро (№1 и №2) имеет два входа (основной и уточняющий), и мощный выход (контрольные точки КТ1 и КТ2). Сигнал на выход (в контрольные точки) поступает по двух канальной схеме при помощи сумматора. Сумматор C11, C12 и L1 (и 2C2, 2C3 и 2L1) объединяет сигналы от ОУ и от мощного усилителя. Роль мощного усилителя в ядре №1 выполняет ядро №2 (блок УМ). В качестве мощного усилителя ядра №2 применяется мощный усилитель на дискретных транзисторах 2VT1 - 2VT10. Структура (топология) и элементы в этих усилительных ядрах идентичны (DA4 и 2DA1, R29 = 2R1, R31 = 2R2, C14 = 2C1, R27 = 2R5, C11 = 2C2, C12 = 2C3, R28 = 2R6, C13 = 2C4, R34 = 2R10, R40 = 2R9, L1 = 2L1).

Для обеспечения приоритета на замыкание петли ООС главным каналом (в каждом ядре) необходимо, чтобы уровень ВЧ сигнала на выходе главного канала был существенно больше уровня сигнала мощного усилителя. Это достигается наличием стопроцентной ВЧ ООС (2C1, при 2C1 = C14) и делителем сигнала на уточняющем входе (2R3, 2R4). Такую же функцию (снижает уровень сигнала в два раза) выполняет делитель (R24, R25) и делитель (2R11, 2C10, 2R13, 2C11, 2C12, 2R14, 2C13, 2R12).

Входной сигнал для УМЗЧ поступает на вход ИТУН, и (аналогичный сигнал) поступает на вход предварительного масштабирующего усилителя (ОУ DA3.1). Он имеет коэффициент передачи равный 5. т.е. усиливает входной сигнал в пять раз, который далее поступает в мощные усилители ядро №1 (R29) и ядро №2 (2R1). Их коэффициенты передачи идентичны и равны $R31/R29 = 2R2/2R1 = 5$. Соответственно общий коэффициент передачи УМЗЧ получается $25 ((R22/R23 + 1) \times (R31/R29))$.

Сигнал поступивший на основной вход усилительного ядра №1 приходит на (R29) вход усилителя на ОУ DA4, с выхода которого через C11, C12 проходит на выход усилительного ядра №1 (т.е. выход УМЗЧ - точка КТ1). И далее через цепь ООС (C14, R31) возвращается на вход ОУ DA4. Этим замыкается петля ООС главного канала в усилительном ядре №1 (на ВЧ). Одновременно с этим сигнал с выхода ОУ DA4 поступает и на уточняющий вход усилительного ядра №2 (2R3).

Сигнал поступивший на основной вход усилительного ядра №2 приходит на (2R1) вход усилителя на ОУ 2DA1, с выхода которого через 2C2, 2C3 проходит на выход усилительного ядра №2 (точка КТ2). И далее через цепь ООС (2C1, 2R2) возвращается на вход ОУ 2DA1. Этим замыкается петля ООС главного канала в усилительном ядре №2 (на ВЧ). Одновременно с этим сигнал с выхода ОУ 2DA1 поступает (по двух канальной схеме) на мощный дискретный выходной каскад на транзисторах 2VT8 - 2VT9 (IRF540/9540).

На высоких частотах (выше 2 МГц) сигнал через делитель (2R11, 2C10, 2R13, 2C11, 2C12, 2R14, 2C13, 2R12) уменьшенный в два раза, напрямую поступает на затворы 2VT8 - 2VT9 т.е. на вход выходного каскада. На частотах ниже 2 МГц сигнал поступает на затворы 2VT8 - 2VT9 через драйверный усилитель (2R15, 2R16, 2VT1 - 2VT4). С выхода истокового повторителя (2VT8 – 2VT9) через 2L1 мощный усиленный сигнал приходит на выход усилительного ядра №2 (точка КТ2), и далее через L1 на выход усилительного ядра №1 (т.е. выход УМЗЧ - точка КТ1), замыкая петлю ООС на НЧ.

Делитель сигнала на 2 (2R11, 2C10, 2R13, 2C11, 2C12, 2R14, 2C13, 2R12) - назовём его квадро мост, это по сути обычный RC делитель, где в качестве конденсаторов применены Т мосты. Это хорошо видно, если временно исключить из схемы 2R13 и 2R14. На частотах выше 2 МГц, он обладает низким выходным сопротивлением, что позволяет ОУ 2DA1 эффективно управлять выходными транзисторами (2VT8 - 2VT9). На низких частотах (ниже 2 МГц) резисторы Т мостов осуществляют уравнивание потенциалов на 2C11 и 2C12, что сильно увеличивает его выходное сопротивление.

Мощный дискретный выходной каскад, реализованный на транзисторах 2VT8 - 2VT9 (IRF540/9540) - это, по сути, обычный истоковый повторитель. Транзисторы 2VT7, 2VT10 (IRF540/9540) осуществляют вольтодобавку на стоках 2VT8 - 2VT9, при большом выходном сигнале. Этим организуется режим работы класса Н.

Дополнительный ОУ DA2.2 (подключенный по входу главного канала ОУ DA4) усиливает ошибку по петле своей ООС (R32/R30 при $R32/R30 = R31/R29$). Усиленный сигнал через делитель R25, R24 поступает на ОУ DA4 (т.е. на уточняющий вход ядра №1).

Итак, мы получили мощный быстродействующий усилитель на основе многоядерной (двухъядерной) структуры, который обладает совокупностью достаточно высоких параметров ООС. А именно, имеет крайне малое ВРП ООС и работает под управлением стопроцентной ООС на ВЧ. В такой структуре мощный (т.е. выходной) сигнал переходя от одного усилительного ядра к другому усилительному ядру последовательно уточняется.

Как сказано выше усилитель обладает и некоторыми недостатками. А именно, отсутствует стопроцентная ООС на НЧ (т.е. на звуковых частотах). Как следствие прецизионность (точность) выходного сигнала далека от предельно возможной. Между тем полученный усилитель имеет дополнительный уточняющий (прецизионный) вход (R37).

Прецизионный усилитель сигнала ОУ DA1.2 усиливает ошибку, которая выделяется в результате сравнения (т.е. вычитания) выходного тока ИТУН и тока поступающего на вход ОУ через цепь ООС C16, R33. В силу весьма высокого выходного сопротивления ИТУН сигнал ошибки в этой точке не ослабляется, а усиливается ОУ DA1.2 и далее поступает на вход ОУ DA2.2 (R37). Соответственно ОУ DA1.2 управляет (окончательно уточняет выходной сигнал) ОУ DA2.2 (через R37), исходя из критерия именно своей прецизионной ГГСООС, причем стопроцентной как на ВЧ, так и на НЧ. Сам блок прецизионного усилителя сигнала можно рассматривать как дополнительный селектор сигнала искажений.

На входе прецизионного ОУ DA1.2 имеется входной фильтр (R35, R36, C17, C18). Он подавляет ВЧ сигналы (выше 10 МГц) на его входе. Сам фильтр можно рассматривать как опцию (т.е. его, возможно, исключить как на рис. 1.4). При этом резистор R35 целесообразно оставить, уменьшив в 2-3 раза (300 Ом). Однако наличие данного фильтра положительно сказывается на работе ОУ DA1.2, с учётом засилья разного рода СВЧ «мусора», - типа микроволновок, сотовых телефонов, Wi - Fi и т.д.

Соответственно обобщив сказанное можно дополнительно конкретизировать следующее: что каждый ОУ т.е. 2DA1, DA4, DA2.2 и DA1.2, формирует сигнал в точке подключения своей ООС и обладает усилением в ≈ 60 dB, на частоте 20 кГц. И одновременно с этим, ОУ DA1.2 управляет (т.е. дополнительно уточняя выходной сигнал) ОУ DA2.2, ОУ DA2.2 управляет ОУ DA4, ОУ DA4 управляет ОУ 2DA1, который управляет УМ. Соответственно общий коэффициент усиления в петле ООС, с учетом четырёх ОУ и мощного УМ, составит порядка $4 \times 60 + 20 = \approx 260$ dB.

Общий коэффициент передачи всего УМЗЧ $K_p = 25 = R_{33} / R_1$. При этом, следует выполнить условие $K_p = R_{33} / R_1 = (R_{22} / R_{23} + 1) \times (R_{32} / R_{30}) = (R_{22} / R_{23} + 1) \times (R_{31} / R_{29}) = (R_{22} / R_{23} + 1) \times (2R_2 / 2R_1)$. Как показано выше, частоты среза ООС должны быть идентичны, то есть $C_{16} * R_{33} = C_{15} * R_{32} = C_{14} * R_{31} = 2C_1 * 2R_2$. Частота среза самого УМЗЧ $f_{\text{среза}} = 1 / (2 * \pi * R_{33} * C_{16}) \approx 100$ кГц.

ИТУН

Рассмотрим вариант ИТУН схема которого показана на рис. 5.1. ИТУН реализован на ОУ DA1.1 и выходном транзисторном усилителе, выход которого и является источником высокого выходного сопротивления. Сам выход как бы состоит из двух идентичных пар транзисторов VT3, VT6 и VT4, VT7, они включены с ОБ и работают в классе А в режиме управляемых источников тока. При чём VT3, VT6 нагружены на R1, этим ИТУН охвачен глубокой стопроцентной ООС. Сами выходные транзисторы ИТУН VT4, VT7 подключены как бы параллельно.

Для подавления искажений на выходе DA1.1 дополним эту схему еще одним ОУ рис. 5.2. На ВЧ (выше 2 МГц), в силу стопроцентной ООС (C1, C2) ОУ DA2.1 работает как повторитель, а на НЧ (т.е. звуковых частотах) как устройство, которое обеспечивает идентичность сигналов на входе и выходе ОУ DA1.1. Однако следует отметить, что входной ток радиочастотного ОУ DA2.1 довольно значительный и он, как и любой ток базы транзистора обладает некоторой компонентой нелинейности, да она весьма мала, но она есть. На рис. 5.3 приведена основная версия ИТУН.

Разделим петлю ООС для DA1.1 и DA2.1 для этого выходной каскад дополним VT2 и VT5. Итак, выходной ток VT3, VT6 это сигнал ООС для DA1.1, выходной ток VT2, VT5 это сигнал ООС для DA2.1, а выходной ток VT4, VT7 это выходной ток самого ИТУН. Соответственно выходной ток ИТУН явно общей ООС не охвачен, но благодаря охвату глубокой внутренней ООС и в силу высокой идентичности режимов работы VT2 - VT7 - линейность самого ИТУН весьма высокая.

Для полной идентичности режимов работы транзисторов (VT2 – VT7) по напряжению служит дополнительный резистор R19 ($R_{19} = R_1 = R_2$), на котором создаётся напряжение, которое идентично напряжению на R1 и на R2. Так как выходной ток ИТУН идентичен току протекающего через R1, соответственно общий коэффициент передачи всего УМЗЧ $K_p = 25 = R_{33} / R_1$.

Здесь следует отметить важную особенность подачи сигнала на вход ОУ DA3.1. Как показано на структуре УМЗЧ см. рис. 1, сигнал на вход ОУ DA3.1 поступает как входной для УМЗЧ. Однако как показано на рис. 2, рис. 4, рис. 5 сигнал на вход ОУ DA3.1 поступает с выхода ОУ DA1.1 ИТУН. Как уже сказано выше, ОУ DA2.1 обеспечивает высокую идентичность сигнала на выходе ОУ DA1.1, по отношению к входному, но с некоторой задержкой. Эта задержка и обеспечивает более точное (оптимальное) время прихода сигнала по петле ООС (C16, R33) и тока ИТУН (R19) на вход прецизионного усилителя сигнала ОУ DA1.2.

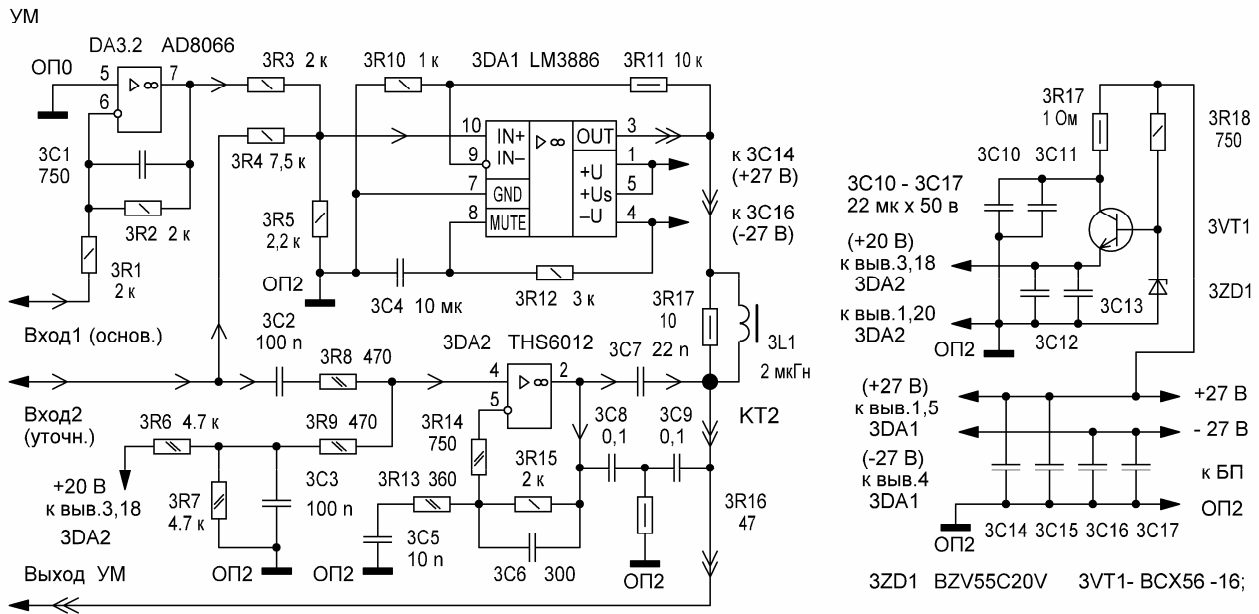


Рис. 6

УМЗЧ «АРХОНТ» (LM3886)

На рис. 6 приведена схема второго варианта блока УМ, с выходным каскадом на основе мощной микросхемы LM3886. На рис. 7 представлена обобщённая, т.е. суммированная схема (рис. 2 + рис. 4 + рис. 6), со схемой подключения. Работа УМЗЧ в целом аналогична ранее рассмотренной версии, за исключением работы УМ.

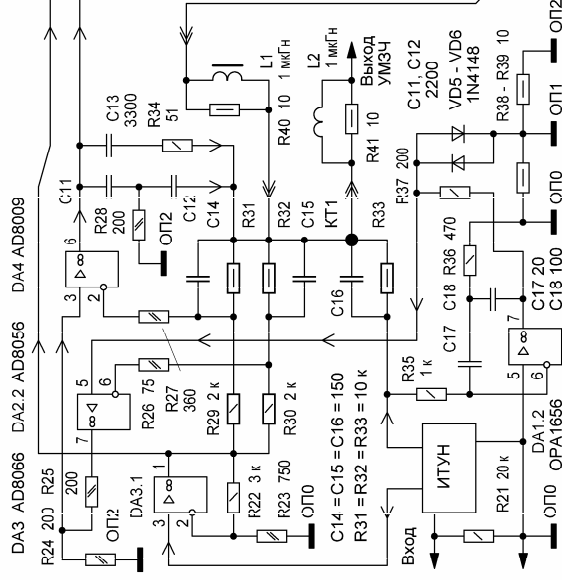
Данная версия УМЗЧ имеет один главный канал (т.е. усилитель который обладает приоритетом на замыкание петли ООС) DA4 (AD8009). Сигнал на выход (в контрольную точку КТ1) поступает по двух канальной схеме при помощи сумматора. Сумматор С11, С12 и L1 объединяет сигналы от ОУ и от мощного усилителя (УМ). Блок УМ состоит из двух ОУ мощного LM3886 (3DA1) и радиочастотного THS6012 (3DA2).

Для обеспечения приоритета на замыкание петли ООС главным каналом необходимо, чтобы уровень ВЧ сигнала на выходе главного канала был существенно больше уровня сигнала мощного усилителя. Это достигается наличием стопроцентной ВЧ ООС (3C6) и делителем сигнала (в два раза) на входе 3DA2 (3R8, 3R9). Такую же функцию (многократно снижает уровень сигнала с выхода DA4) выполняет делитель 3R4, 3R3, 3R5. Сопротивления на входах ОУ R27 и 3R14 разрешают данным токовым радиочастотным ОУ работать со стопроцентной ООС.

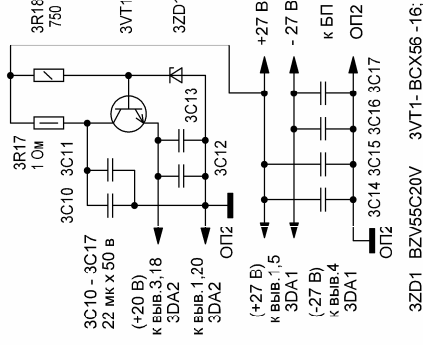
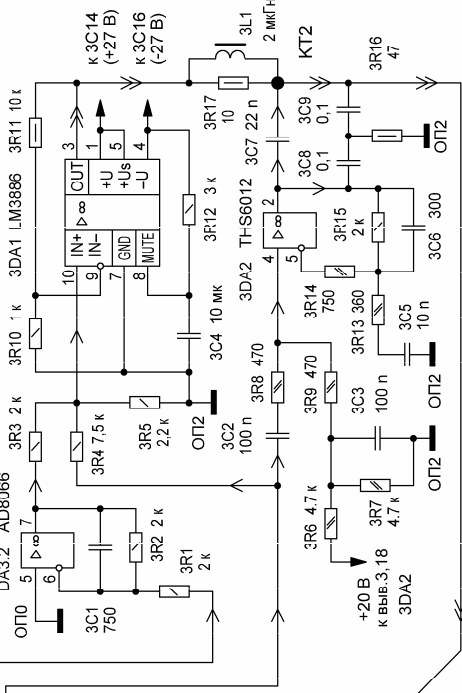
Сигнал поступивший на основной вход приходит на (R29) вход усилителя на ОУ DA4, с выхода которого через C11, C12 проходит на выход УМЗЧ (точка КТ1). И далее через цепь ООС (C14, R31) возвращается на вход ОУ DA4. Этим замыкается петля ООС главного канала (на ВЧ). Одновременно с этим сигнал с выхода ОУ DA4 поступает и на уточняющий вход УМ (3R4). С выхода которого (КТ2) сигнал через L1 поступает на выход УМЗЧ (точка КТ1), замыкая петлю ООС на НЧ.

Сигнал поступивший на основной вход УМ приходит на (3R1) вход усилителя на ОУ DA3.2. Он имеет $K_p = -1$, и формирует АФЧХ идентичное с ОУ DA4 ($C14 * R31 = 3C1 * 3R2$). С выхода, которого через делитель-сумматор 3R3, 3R4, 3R5 проходит на вход 3DA1. Общий коэффициент передачи (на НЧ) усилителя на ОУ 3DA1, для этого сигнала, и с учетом входного делителя равен 5.

УМЗЧ



УМ



ИТУН

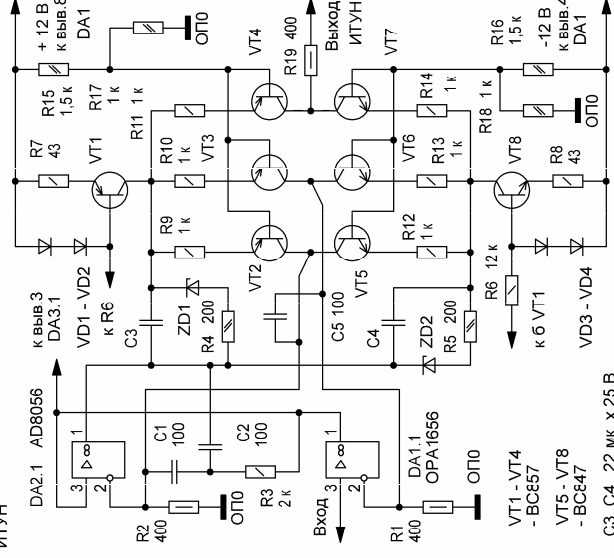
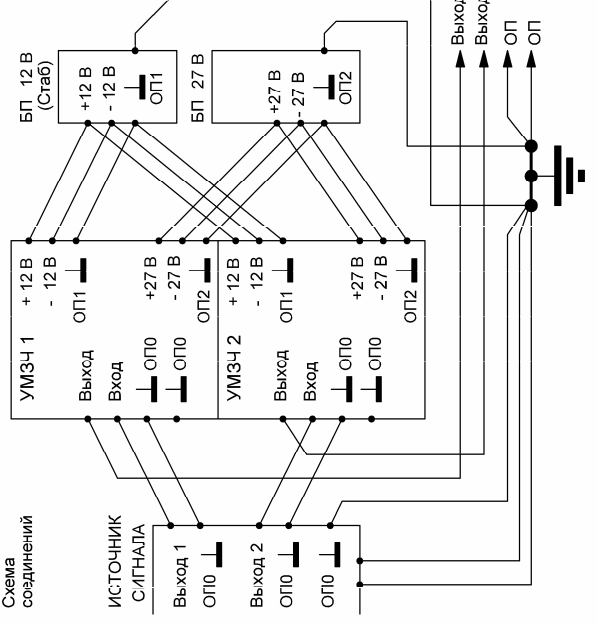
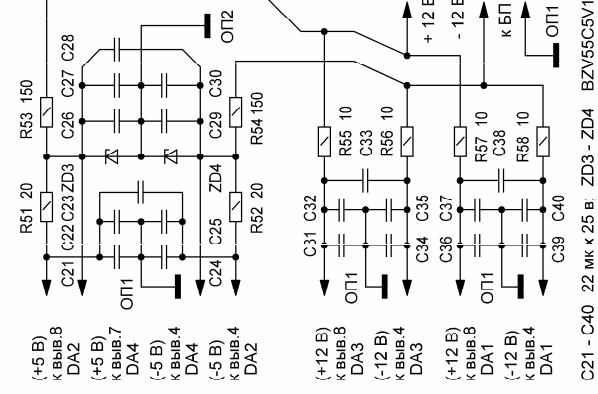


Схема соединений



ЗД1 - ЗД2 ВЗУ55С7У5 ВД1 - ВД4 1Н4148

Сигнал поступивший с выхода ОУ DA4 на уточняющий вход УМ – это корректирующий уточняющий сигнал. Он приходит на делитель-сумматор 3R4, 3R3, 3R5, а далее на вход 3DA1, и одновременно поступает на вход корректирующего усилителя на быстродействующем ОУ 3DA2 через делитель сигнала 3R8, 3R9. С учетом (3R4, 3R3, 3R5) входного делителя коэффициент передачи усилителя на ОУ 3DA1 равен $\approx 1,2$. С учетом (3R8, 3R9) входного делителя коэффициент передачи усилителя на ОУ 3DA2 равен $\approx 2,5$.

Соответственно сигнал (на ВЧ) который приходит в точку КТ2 с выхода 3DA2 (3C7, 3C8, 3C9) существенно больше чем сигнал который приходит с выхода 3DA1 (3L1). Это позволяет главному каналу на ОУ DA4 уточнять сигнал в точке КТ2 при помощи ОУ 3DA2, то есть исправлять (корректировать) как линейные, так и фазо-временные искажения LM3886.

Сравнения, вариации и детали

Как сказано в начале статьи, данный вариант усилителя мощности, в целом, представляет модифицированную версию, предложенную ранее в трилогии [1-3]. Отличия касаются в применении здесь в качестве главного канала, более быстродействующего и более мощного ОУ с токовой ООС. Соответственно DA4 и 2DA1 (AD8009 с полосой до 1 ГГц), и связки AD8056 + AD8009 (300МГц + 1 ГГц). Также применён более качественный вариант ИТУН.

В качестве индуктивностей в сумматорах применены заводские (т.е. не самодельные) индуктивности. В место одиночных конденсаторов массово применены Т образные фильтры, т.е. С-R-С цепи, например в сумматорах сигнала. Суть работы такой С-R-С цепи состоит в том, что на ВЧ сигнале она работает как одиночный конденсатор, а на низких (звуковых) частотах её влияние работу существенно снижено. В качестве мощных выходных транзисторов используются широко распространённые IRF540/9540.

Важным достоинством данного УМЗЧ является работа выходного каскада в режиме класса Н. Значительные искажения самого выходного каскада класса Н при усилении по петле 250 dB существенного значения не имеют. Проведём грубую оценку работы выходного каскада в режиме класса Н, и обычного В - С, при питании $\pm 16 / 24$ В. Так при выходном напряжении 8 В (при $R_n = 4$ Ом), выходной ток будет 2А , а (мгновенная) мощность отдаваемая в нагрузку $8 \times 2 = 16$ Вт. При этом мощность рассеиваемая в выходном каскаде составит, (при классе В - С) $P_{вс} = (24 - 8) \times 2 = 32$ Вт, а при классе Н $P_n = (16 - 8) \times 2 = 16$ Вт, то есть в два раза меньше.

Это существенно улучшает ОРБ выходных транзисторов, понижает мощность БП и снижает требования к площади радиаторов. Соответственно версию УМЗЧ на IRF540/9540 будем считать как бы основной, так как она более привлекательна в плане экономичности. Особенно по отношению к версии на LM3886, где для исправления (выкривления), применяется дорогая (и дефицитная) THS6012.

Как само собой разумеется УМЗЧ (на IRF540/9540) может работать и в обычном классе В – С (без вольтодобавки). Возможна также его работа и с другими выходными транзисторами, или другими выходными каскадами например аналогичными приведённым в [1].

Усилитель, как правило, в настройке не нуждается, однако для транзисторов VT2 – VT7 очень близкие параметры рекомендуются. С учётом разброса параметров мощных выходных транзисторов требуется подбор 2R21/2R22, для уточнения напряжения смещения и соответственно тока покоя (50-100 мА). Это удобно делать при помощи

дополнительных резисторов (существенно большего номинала) подключаемых параллельно 2R21 и 2R22.

Данный источник напряжения смещения в выходном каскаде (на транзисторах 2VT5, 2VT6) обладает избыточным отрицательным ТКЕ, и предназначен для размещения на плате. Однако конечно, более эффективно и правильно (хоть и более сложно), использовать выносной термодатчик. Например, на основе LM431с терморезисторами или диодами [5]. Конечно не исключено применение и других решений улучшающих термостабильность выходного каскада, например истоковых резисторов, которые можно зашунтировать диодами шоттки.

Применительно к применённым ОУ, варианты их замены сильно ограничены. Это связано с их уникальными характеристиками (см. выше). За исключением ОУ DA3.1 в варианте УМЗЧ на IRF540/9540. Его можно заменить на одиночный ОУ AD8065, или на любой другой радиочастотный ОУ с полосой 150 МГц, при $U_{пит}$ +/- 12В.

В качестве индуктивностей L1, 2L1 (1 мкГн) и 3L1 (2 мкГн) в сумматорах сигнала, применены ферритовые индуктивности МНС106030-1R0М-R8 размером 7 x 8 x 3 мм. Индуктивность 3L1 состоит из двух таких индуктивностей. Они соответственно зашунтированы низкоомными резисторами. По своей природе сами ферритовые индуктивности относительно нелинейные, что конкретно связано с перемагничиванием самого феррита. Однако в данном случае, это несущественно, так как они находятся внутри самой петли ООС.

Индуктивность L2 изготовлена вручную (т.е. без феррита). Её основное назначение это отсечение паразитных ёмкостей кабеля и нагрузки. Ферритовую индуктивность здесь ставить нельзя, так как она находится вне петли ООС. Она имеет порядка 10 витков (в навал) проводом 0,7 мм при диаметре намотки 7 мм, точность не критична. Возможно применение индуктивности и как в [1-3]. Жгутом, порядка 10 витков при диаметре намотки 7 мм. Одна жила подключается к остальному жгуту в противофазе (конец с началом и начало с концом) через резистор 51 Ом.

Напряжение питания выходного каскада +/- 18 / 27 В, при этом выходная мощность составит 75 Вт. Возможно снижение напряжения питания (до +/- 14 / 21 В), при условии увеличения тока для стабилитронов (2ZD3, 2ZD4), например при помощи дополнительных резисторов (10 к) с шин питания +/- 21 В (на схеме отсутствуют).

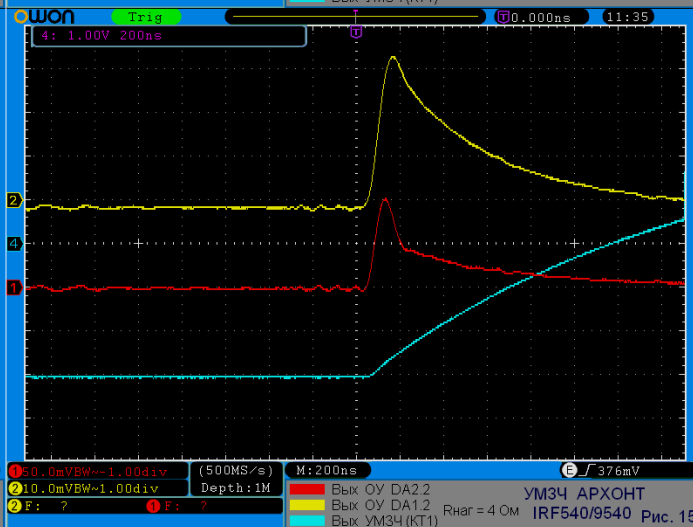
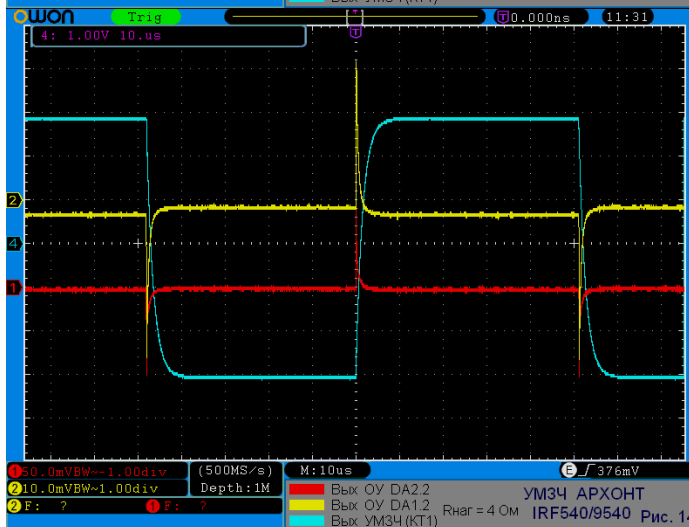
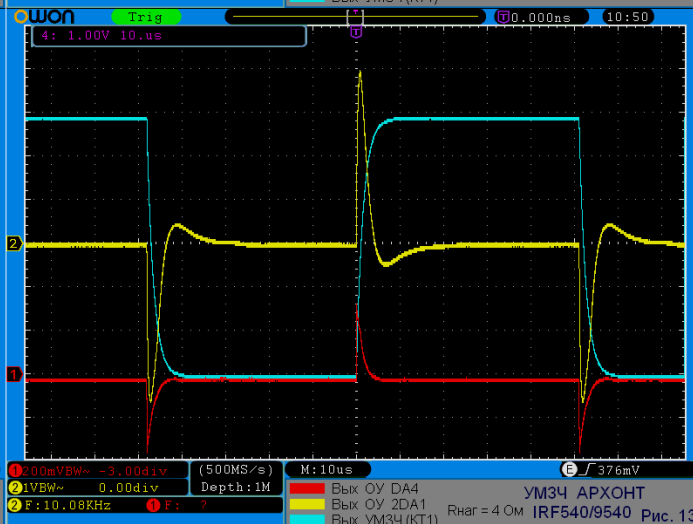
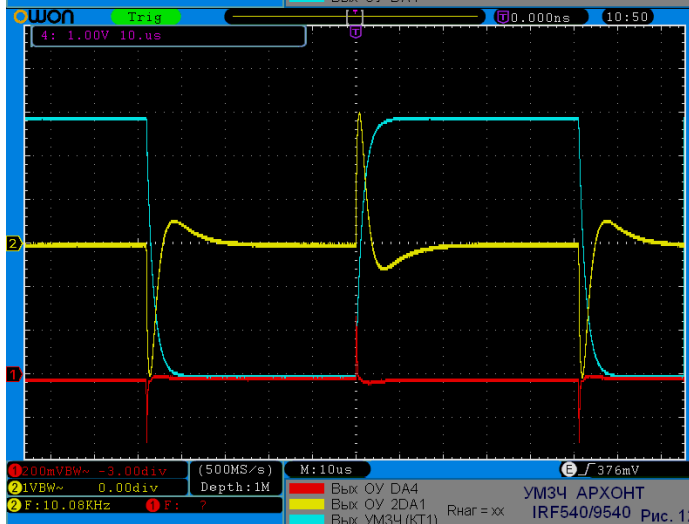
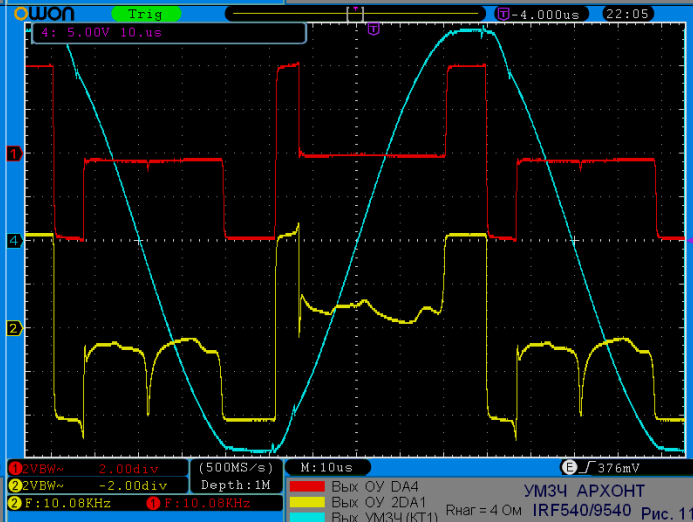
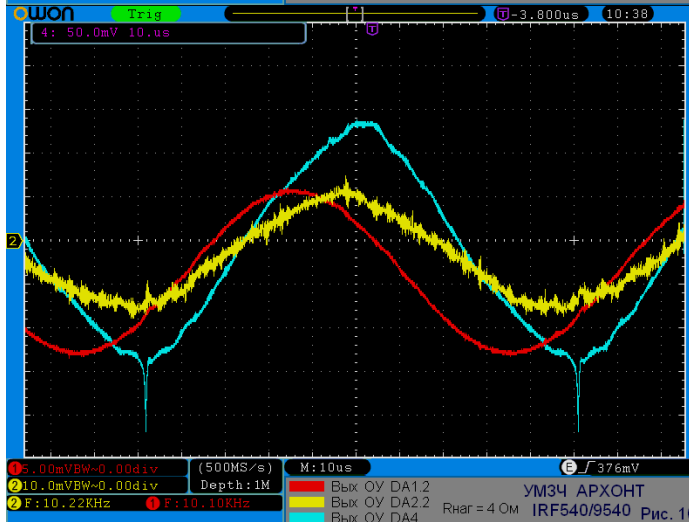
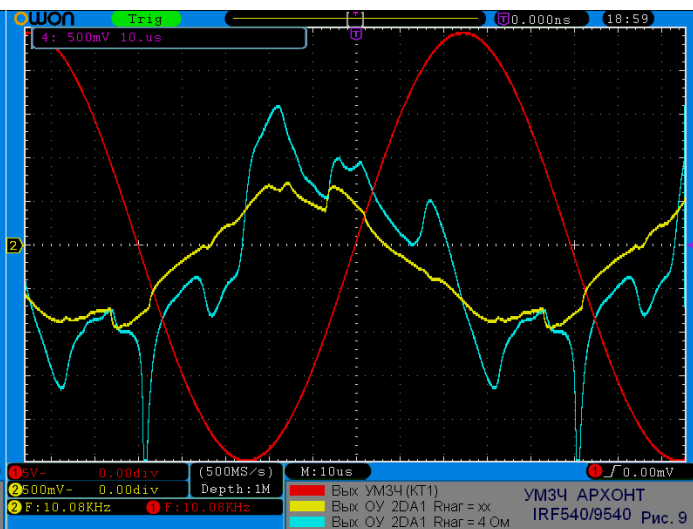
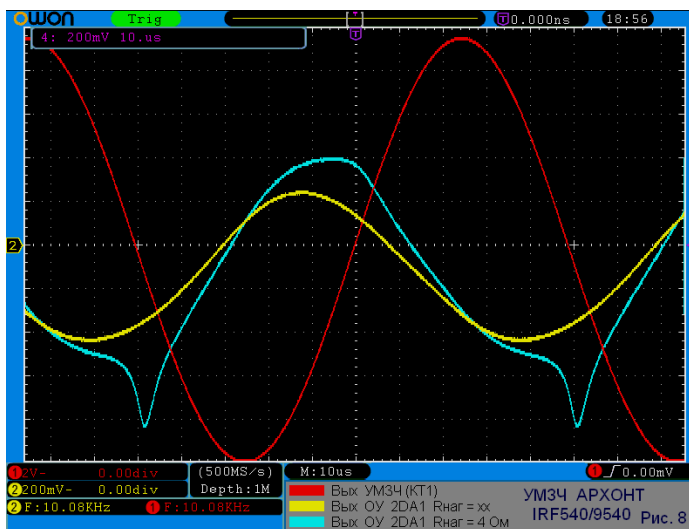
Следует обратить внимание на существенный недостаток данного УМЗЧ. Он связан со значительным временем (1 с) зарядки конденсаторов в параметрических стабилизаторах (+/- 5 В), т.е. блокировкой (выключением) ООС на это время. Соответственно подключать нагрузку следует только с определённой задержкой (1 с).

Как сказано выше усилитель состоит из мощного (радиочастотного) блока и блока прецизионного усилителя сигнала. Функционально (технически) эти блоки могут функционировать раздельно. Также взятый, в отдельности, может работать и блок УМ. Это может быть полезно при анализе неисправностей и т.д.

Подключение УМЗЧ к БП и к АС показано на рис. 5 и рис. 7 в низу справа. Общие провода подключены по схеме (топологии) двойная звезда. Также возможен вариант когда, ОТДЕЛЬНЫЙ общий провод для АС, сначала приходит на плату УМЗЧ, а с УМЗЧ уже к клеммам нагрузки.

Измерения

На рис. 8 – 11 представлены измерения усилителя «АРХОНТ» (IRF540/9540) при синусоидальном сигнале (10 кГц) и выходном амплитудном уровне 10 В, 25В, 25 В и



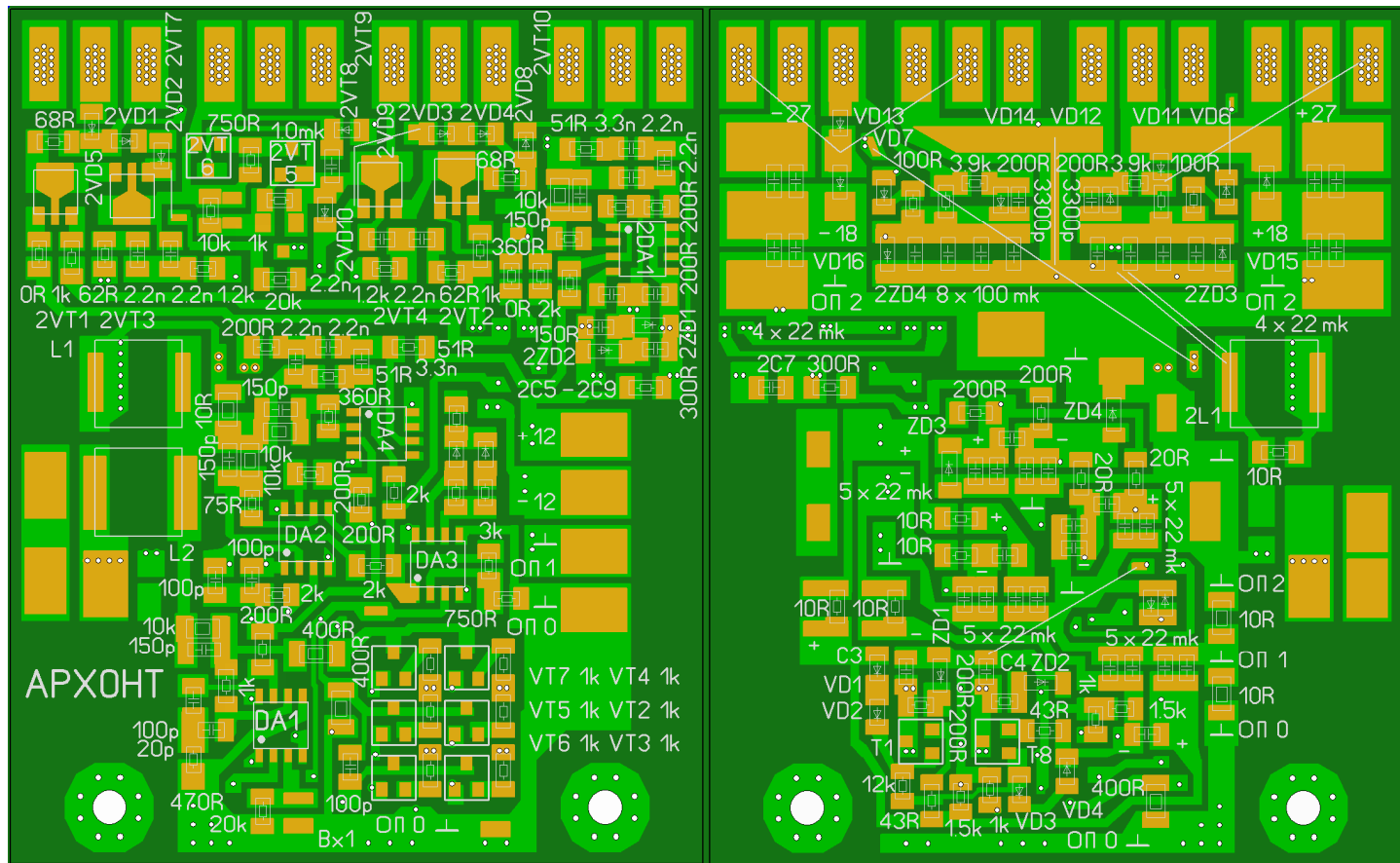
лее 25 В (т.е. режим ограничения). При нагрузке (4 Ом) и без неё (режим хх). На рис. 12 – 15 представлены измерения переходной характеристики УМЗЧ при работе с сигналом типа меандр (10 кГц) и амплитудой 3 В. На рис. 12 режим хх, а на рис. 13 при нагрузке 4 Ом. На рис. 14 режим идентичный режиму на рис. 13, на рис. 15 он же, но с растяжкой по времени в 50 раз.

Таблица элементов
УМЗЧ «АРХОНТ» (IRF540/9540)

| | | | | | | | | |
|-----|------|---------|------|------|--------|---------------|--------|---------------|
| R1 | 1210 | 400 !!! | R51 | 1206 | 20 | C3 | 0805 | 22 мкФ х 25В |
| R2 | 1210 | 400 !!! | R52 | 1206 | 20 | C4 | 0805 | 22 мкФ х 25В |
| R3 | 1206 | 2 к | R53 | 1206 | 150 | C5 | 0805 | 100 |
| R4 | 0805 | 200 | R54 | 1206 | 150 | - | - | - |
| R5 | 0805 | 200 | R55 | 1206 | 10 | C11 | 0805 | 2200 |
| R6 | 1206 | 12 к | R56 | 1206 | 10 | C12 | 0805 | 2200 |
| R7 | 1206 | 43 | R57 | 1206 | 10 | C13 | 0805 | 3300 |
| R8 | 1206 | 43 | R58 | 1206 | 10 | C14 | 0805 | 150 ! |
| R9 | 1206 | 1 к ! | - | - | - | C15 | 0805 | 150 ! |
| R10 | 1206 | 1 к ! | 2R1 | 1206 | 2 к ! | C16 | 0805 | 150 ! |
| R11 | 1206 | 1 к ! | 2R2 | 1210 | 10 к ! | C17 | 0805 | 20 |
| R12 | 1206 | 1 к ! | 2R3 | 0805 | 200 | C18 | 0805 | 100 |
| R13 | 1206 | 1 к ! | 2R4 | 0805 | 200 | C21 - C40 | 0805 | 22 мкФ х 25В |
| R14 | 1206 | 1 к ! | 2R5 | 0805 | 360 | 2C1 | 0805 | 150 ! |
| R15 | 1206 | 1,5 к | 2R6 | 0805 | 200 | 2C2, 2C3 | 0805 | 2200 |
| R16 | 1206 | 1,5 к | 2R7 | 1206 | 10 | 2C4 | 0805 | 3300 |
| R17 | 1210 | 1 к | 2R8 | 1206 | 10 | 2C5 - 2C9 | 0805 | 22 мкФ х 25В |
| R18 | 1206 | 1 к | 2R9 | 1210 | 10 | 2C10 - 2C13 | 0805 | 2200 |
| R19 | 1210 | 400 !!! | 2R10 | 1206 | 51 | 2C14 | 0805 | 1,0 мкФ х 25В |
| - | - | - | 2R11 | 1206 | 62 | 2C15, 2C16 | 0805 | 470 мкФ х 16В |
| R21 | 1206 | 20 к | 2R12 | 1206 | 62 | 2C17, 2C18 | 0805 | 3300 |
| R22 | 1206 | 3 к | 2R13 | 1206 | 1,2 к | ZD1, ZD2 | | BZV55C7V5 |
| R23 | 0805 | 750 | 2R14 | 1206 | 1,2 к | ZD3, ZD4 | | BZV55C5V1 |
| R24 | 0805 | 200 | 2R15 | 1206 | 1 к | VD1 – VD6 | | 1N4148 |
| R25 | 0805 | 200 | 2R16 | 1206 | 1 к | 2ZD1, 2ZD2 | | BZV55C5V1 |
| R26 | 0805 | 75 | 2R17 | 1206 | 68 | 2ZD3, 2ZD4 | | BZV55C10V |
| R27 | 0805 | 360 | 2R18 | 1206 | 68 | 2VD1 - 2VD14 | | 1N4148 |
| R28 | 0805 | 200 | 2R19 | 0805 | 100 | 2VD15 - 2VD16 | | SS54 (SK54) |
| R29 | 1206 | 2 к ! | 2R20 | 0805 | 100 | VT1 - VT4 | SOT23 | BC857 |
| R30 | 1206 | 2 к ! | 2R21 | 0805 | 10 к | VT5 - VT8 | SOT23 | BC847 |
| R31 | 1210 | 10 к ! | 2R22 | 0805 | 1 к | 2VT1, 2VT4 | SOT89 | BCX56-16 |
| R32 | 1210 | 10 к ! | 2R23 | 0805 | 750 | 2VT2, 2VT3 | SOT89 | BCX53-16 |
| R33 | 1210 | 10 к ! | 2R24 | 1206 | 0 | 2VT5 | SOT23 | BC847 |
| R34 | 1206 | 51 | 2R25 | 1206 | 20 к | 2VT6 | SOT23 | BC857 |
| R35 | 1206 | 1 к | 2R26 | 1206 | 3,9 к | 2VT7, 2VT8 | TO-220 | IRF540 |
| R36 | 1206 | 470 | 2R27 | 1206 | 3,9 к | 2VT9, 2VT10 | TO-220 | IRF9540 |
| R37 | 1206 | 200 | 2R28 | 0805 | 200 | DA1 | soic | OPA1656 |
| R38 | 1210 | 10 | 2R29 | 0805 | 200 | DA2 | soic | AD8056 |
| R39 | 1210 | 10 | | | | DA3 | soic | AD8066 |
| R40 | 1210 | 10 | C1 | 0805 | 100 | DA4 | soic | AD8009 |
| R41 | 1210 | 10 | C2 | 0805 | 100 | 2DA1 | soic | AD8009 |

! - Высокая точность. !!! – три резистора (1.2 к) в параллель, при высокой точности.

Печатная плата (Demo board)
УМЗЧ «АРХОНТ» (IRF540/9540)



Литаврин А. В. 2022 г.

1. **Литаврин А.** МКУС в УМЗЧ с дискретным выходом. (универсальная структура). — Радио, 2015, № 10, с. 12—16; № 11, с. 7—9.
2. **Литаврин А.** МКУС в УМЗЧ с интегральным выходом. (универсальная структура). — Радио, 2016, № 4, с. 13—18.
3. **Литаврин А.** МКУС в УМЗЧ с выходом класса D. (универсальная структура). — Радио, 2017, № 6, с. 8—10; № 7, с. 7—11.
4. **Литаврин А.** Многоканальное усиление в УМЗЧ с крайне глубокой ООС. — Радио, 2004, № 3, с. 18—20; № 4, с. 19—21.
5. **Литаврин А.** МКУС в УМЗЧ с гиперглубокой ООС. — Радио, 2013, № 9, с. 8—12; № 10, с. 15—19; № 11, с. 8—10.
6. **AD8009.** — < **AD8009.pdf** >.
7. **AD8056.** — < **AD8056.pdf** >.
8. **AD8065.** — < **AD8065.pdf** >.
9. **OP1656.** — < **OP1656.pdf** >.
10. **THS6012.** — < **THS6012.pdf** >.
11. **LM3886.** — < **LM3886.pdf** >.