Транзисторный усилитель мощности низкой частоты без ООС

Алексей Зызюк, *г.Луцк*

В последнее время конструкторы усилителей мощности низкой частоты всё чаще обращаются к ламповой схемотехнике, которая позволяет при сравнительной простоте конструкции достигать хорошего звучания. Но не следует полностью "списывать" транзисторы, поскольку при определенных обстоятельствах транзисторный УМЗЧ все-таки способен работать довольно неплохо, а часто и лучше ламп... Автору этой статьи довелось перепробовать большое количество УМЗЧ. Один из таких наиболее удачных "биполярных" вариантов и предлагается на суд читателей. В основе идеи хорошей работы лежит условие симметричности обоих плеч УМЗЧ. Когда обе полуволны усиливаемого сигнала претерпевают подобные преобразовательные процессы, можно ожидать удовлетворительной работы УМЗЧ в качественном отношении.

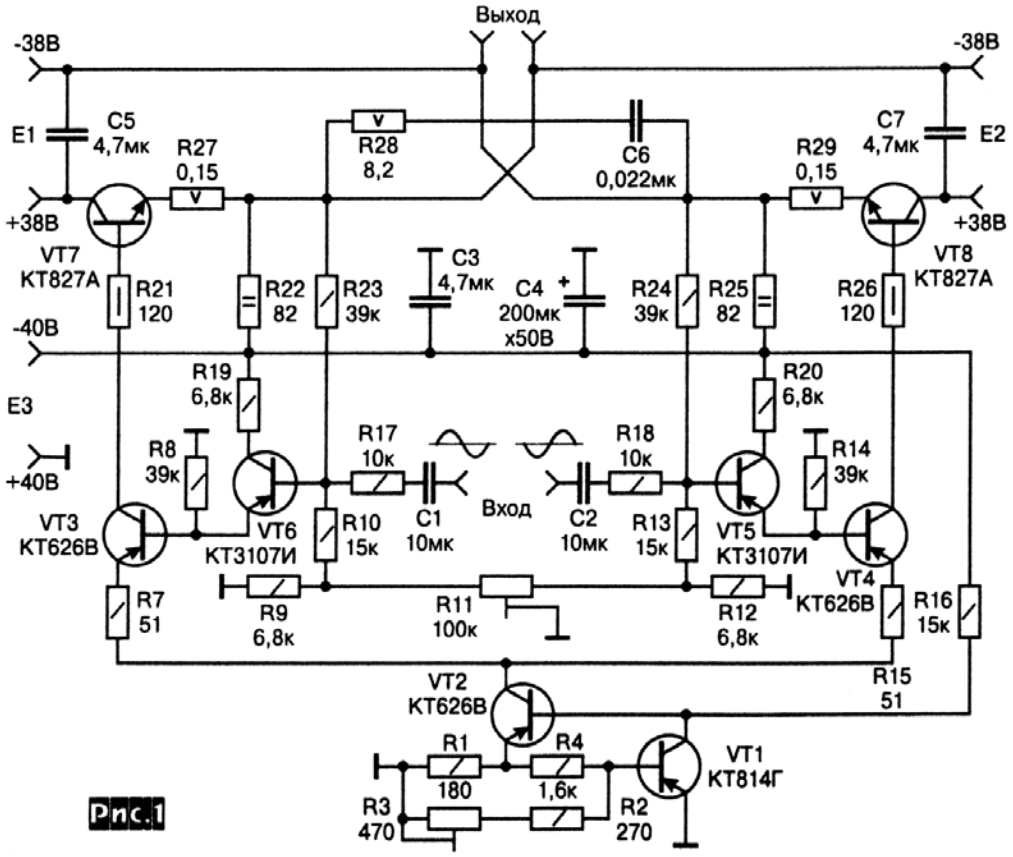
Еще в недалеком прошлом непременным и достаточным условием хорошей работы любого УМЗЧ считалось обязательным введение глубоких ООС. Бытовало мнение о невозможности создания высококачественных УМЗЧ без глубоких общих ООС. К тому же авторы конструкций убедительно уверяли, что, мол, нет необходимости в подборе транзисторов для работы их в парах (плечах), ООС все скомпенсирует и разброс транзисторов по параметрам на качество звуковоспроизведения не влияет!

Эпоха УМЗЧ, собранных на транзисторах одной проводимости, например, популярных КТ808. предполагала включение выходных транзисторов УМЗЧ уже неравноправно, когда один транзистор выходного каскада был включен по схеме с ОЭ, второй же - с ОК. Такое асимметричное включение не способствовало качественному усилению сигнала. С приходом КТ818, КТ819, КТ816. КТ817 и др., казалось бы, проблема линейности УМЗЧ решена. Но перечисленные комплементарные пары транзисторов "по жизни" слишком далеки от истинной комплементарности.

Не будем углубляться в проблемы некомплементарности вышеперечисленных транзисторов, которые весьма широко используются в различных УМЗЧ. Следует лишь подчеркнуть тот факт. что при равных условиях (режимах) этих транзисторов обеспечить их комплементарную работу в двухтактных усилительных каскадах достаточно сложно. Хорошо об этом сказано в книге Н.Е.Сухова [1].

Я вовсе не отрицаю возможность достижения хороших результатов при создании УМЗЧ на комплементарных транзисторах. Для этого нужен современный подход в схемотехнике таких УМЗЧ, с обязательным тщательным подбором транзисторов для работы в парах (ключах). Доводилось мне конструировать и такие УМЗЧ, которые являются своеобразными продолжениями высококачественного УМЗЧ Н.Е.Сухова [2], но о них - как нибудь в другой раз. Касаясь симметричности УМЗЧ, как главного условия хорошей его работы - следует сказать следующее. Оказалось, что более высокими качественными параметрами обладает УМЗЧ, собранный по *действительно симметричной* схеме и непременно *на транзисторах одинакового типа* (с *обязательной подборкой* экземпляров). Подбирать же транзисторы намного легче, если они из одной партии. Обычно экземпляры транзисторов из одной партии имеют довольно близкие параметры против "случайно" приобретенных экземпляров. Из опыта можно сказать, что из 20 шт. транзисторов (стандартное количество одной пачки) почти всегда можно отобрать две пары транзисторов для стереокомплек-

са УМЗЧ. Были случаи и более "удачного улова" - по четыре пары из 20 штук. О подборе транзисторов расскажу несколько позже.



Принципиальная схема УМЗЧ изображена на рис.1. Как видно из схемы, она довольно простая. Симметричность обоих плеч усилителя обеспечена симметричностью включений транзисторов. Известно, что дифференциальный каскад обладает многими преимуществами перед обычными двухтактными схемами. Не углубляясь в теорию, следует подчеркнуть, что в данной схеме заложено правильное "токовое" управление биполярными транзисторами. Транзисторы дифференциального каскада обладают повышенным выходным сопротивлением (намного большим традиционной "раскачки" по схеме с ОК), поэтому их можно рассматривать как генераторы тока (источники тока). Таким образом реализуется токовый принцип управления выходными транзисторами УМЗЧ. Очень точно сказано о влиянии согласования по сопротивлениям между транзисторными каскадами на уровень нелинейных искажений в [3]: "Известно, что нелинейность входной характеристики транзистора $I_б=f(U_{бэ})$ в наибольшей степени проявляется тогда, когда усилительный каскад работает от генератора напряжения, т.е. выходное сопротивление предыдущего каскада меньше входного сопротивления последующего. В этом случае выходной сигнал транзистора - ток коллектора или эмиттера - аппроксимируется экспоненциальной функцией напряжения база эмиттер $U_{бэ}$, а коэффициент гармоник порядка 1% достигается при величине этого напряжения, равном всего 1 мВ (!). Это объясняет причины возникновения искажений во многих транзисторных УМЗЧ. Очень жаль. что этому факту практически никто не уделяет должного внимания. Что уж там, транзисторы "умирают" в УМЗЧ (как динозавры?!), словно нет никакого выхода из сложившихся обстоятельств, кроме как применения ламповых схем...

Но прежде чем приступить к намотке трудоемкого выходного трансформатора, стоит все-таки повозиться и с симметричной транзисторной схемой УМЗЧ. Забегая вперед, скажу

еще о том, что по аналогичной схемотехнике были собраны и УМЗЧ на полевых транзисторах, об этом поговорим как-нибудь в другой раз.

Еще одна особенность схемы рис.1 - это повышенное (по сравнению с традиционными УМЗЧ) количество источников питания. Не следует этого бояться, поскольку емкости фильтрующих конденсаторов попросту разделяются на два канала в равной степени. А разделение источников питания в каналах УМЗЧ лишь улучшают параметры стереокомплекса в целом. Напряжения источников Е1 и Е2 не стабилизированы, а в качестве Е3 необходимо использовать стабилизатор напряжения (40 вольт).

Говоря о теоретических проблемах двухтактных схем и транзисторных УМЗЧ вообще, необходимо проанализировать еще один каскад (или несколько таковых каскадов) - фазоинвертор. Продолжительные эксперименты подтверждают факт существенного ухудшения качества звуковоспроизведения из-за этих каскадов. Собрав совершенно симметричную схему, да еще и с кропотливо подобранными деталями, приходится столкнуться с проблемой схем фазоинверторов. Было установлено, что эти каскады способны вносить очень большие искажения (различие формы синусоиды для полуволн можно было наблюдать на экране осциллографа даже без использования каких-либо дополнительных схем). Сказанное в полной мере относится и к простым схемам ламповых вариантов усилителей-фазоинверторов. Вы подбираете номиналы в схеме с тем, чтобы получить равенство амплитуд обеих полуволн (синусоиды) противофазного сигнала по высококлассному цифровому вольтметру, а субъективная экспертиза требует (на слух !) поворота движков подстроечных резисторов в сторону от этого "приборного" способа регулировки уровней.
Всматриваясь в форму синусоиды на экране осциллографа, удается увидеть "интересные" искажения - на одном выходе фазоинвертора они шире (по оси частот), на другом - "тоньше", т.е. площадь фигуры синусоид различна для прямого и фазоинверсного сигналов. Слух это четко улавливает, приходится "разрегулировать" настройку. Выравнивать же синусоиду в фазоинверсных каскадах глубокими ООС крайне нежелательно. Устранять нужно причины асимметрии в этих каскадах другими схемотехническими путями, в противном случае фазоинверсный каскад может вносить весьма заметные на слух "транзисторные" искажения, уровень которых будет сопоставим с искажениями выходного каскада УМЗЧ (!). Вот так и случается, что фазоинвертор является основным узлом асимметрии для любых двухтактных УМЗЧ (будь-то транзисторных, ламповых или комбинированных схем УМЗЧ), если, конечно же, усилительные элементы в плечах заранее отобраны с близкими параметрами, иначе нет смысла вообще ожидать от таких схем хорошего звучания.

Из самых простых в реализации фазоинверсных схем, которые хорошо работают, являются ламповые варианты. Более простыми их "аналогами" являются полевые транзисторы, которые (только !) при грамотном схемотехническом подходе вполне способны конкурировать с ламповыми усилителями. И если уж аудиофилы не боятся применения согласующих трансформаторов в выходных каскадах, где это "железо" все равно "звучит", то уж и в предыдущих каскадах можно со спокойной совестью применять трансформаторы. Я имею в виду фазоинверсные каскады, где амплитуда тока (а именно эта составляющая пагубно влияет на "железо") невелика, а амплитуда напряжения достигает значения всего лишь в несколько вольт.

Бесспорно, что любой трансформатор - это своеобразный шаг назад в схемотехническом отношении в век гигагерцовых Pentium'ов. Но есть несколько "но", о которых весьма уместно иногда вспомнить. Первое - грамотно изготовленный переходной или согласующий трансформатор никогда не внесет столько нелинейных искажений, сколько могут внести

самых разнообразных искажений несколько "неправильных" усилительных каскадов. Второе - трансформаторный фазоинвертор действительно позволяет достигнуть *реальной* симметрии противофазных сигналов, сигналы с его обмоток по-настоящему близки друг к другу как по форме, так и по амплитуде. К тому же он - *пассивный*, и его характеристики не зависят от питающих напряжений. И если ваш УМЗЧ реально симметричен (в данном случае имеются в виду его входные импедансы), то асимметрия УМЗЧ будет уже определяться более разбросом параметров радиокомпонентов в плечах УМЗЧ, чем фазоинверсным каскадом. Поэтому не рекомендуется использовать в таком УМЗЧ радиоэлементы с допусками более 5% (исключения лишь составляют цепи генератора тока, питающего дифференциальный каскад). Следует отдавать себе отчет, что при разбросах параметров транзисторов в плечах УМЗЧ более 20% точность резисторов уже теряет свою актуальность. И наоборот, когда используются хорошо подобранные транзисторы, имеет смысл применять резисторы с допуском 1%. Их конечно же, можно и подобрать с помощью хорошего цифрового омметра.

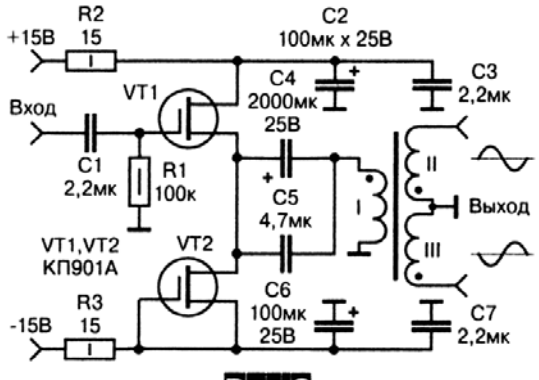
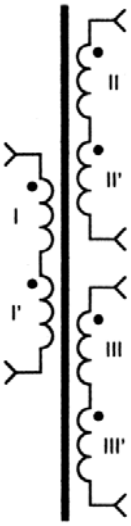


Рис.2

Одна из наиболее удачных схемотехнических разработок фазоинвертора представлена на рис.2. Кажущаяся слишком простой, она все же требует пристального внимания к себе, поскольку имеет несколько "секретов". Первый из таких - это правильный выбор транзисторов по параметрам. Транзисторы VT1 и VT2 не должны иметь значительных утечек между электродами (имеется в виду переходы затвор-исток). Кроме того, транзисторы должны иметь близкие параметры, особенно это касается начального тока стока - сюда наиболее подходят экземпляры с $I_{с.нач.}$ 30-70 мА. Напряжения питания должны быть стабилизированы, правда коэффициент стабилизации блока питания существенной роли не играет, к тому же, отрицательное напряжение можно взять и со стабилизатора УМЗЧ. Чтобы электролитические конденсаторы поменьше вносили своих искажений, они зашунтированы неэлектролитическими - типа К73-17.

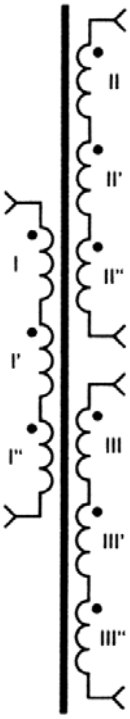
Немного подробнее рассмотрим особенности изготовления главного узла в этой схеме - фазорасщепительного (фазоинверсного) трансформатора. От аккуратности его изготовления зависит как индуктивность рассеяния, так и диапазон эффективно воспроизводимых частот, не говоря уже об уровне различных искажений. Так вот, два основных секрета технологического процесса изготовления этого трансформатора таковы. Первое - необходимость отказаться от простой намотки обмоток. Привожу два использованных мною варианта намотки этого трансформатора. Первый - изображен на рис.3, второй - на рис.4. Суть метода такой намотки заключается в следующем. Каждая из обмоток (I, II или III) состоит из нескольких обмоток, содержащих строго одинаковое количество витков. Необходимо избегать какой бы то ни было ошибки в количестве витков, т.е. разницы в витках между обмотками. Поэтому решено было производить намотку трансформатора давно проверенным способом. По рис.3 используется шесть проводов (например, ПЭЛШО-0,25). Заранее рассчитывают необходимую длину обмоточного провода (не всегда же и не у каждого радиолюбителя окажется под рукой шесть бухт провода одного диаметра), складывают шесть проводов вместе и производят намотку всех обмоток одновременно. Далее необходимо лишь найти отводы нужных обмоток и соединить их попарно-последовательно. По рис.4 использовалось девять проводников для этого варианта. И еще, мотать необходимо так, чтобы провода одного витка не расходились в разные стороны далеко-широко один от другого, а держались общего рулона вместе. Мотать же отдельными проводами недопустимо, трансформатор будет буквально "звенеть" во всем диапазоне звуковых частот, индуктивность рассеяния увеличится, возрастут и искажения УМЗЧ из-за асимметрии сигналов на выходах трансформатора.

Рис.3



Да и ошибиться очень легко можно при отдельных способах намотки симметричных обмоток. А ошибка в несколько витков дает о себе знать несимметричностью противофазных сигналов. Если уж продолжать откровенно, то был изготовлен трансформатор фазоинвертора (в единственном роде, экземпляре) в ... 15 жил. Был эксперимент, который вошел в коллекцию прекрасно звучащих конструкций УМЗЧ. Еще раз хочется сказать о том, что *не трансформаторы* виноваты в плохой работе некоторых схем, а *их конструкторы*. Во всем мире весьма расширилось производство ламповых УМЗЧ, их подавляющее большинство содержит разделительные трансформаторы (вернее, согласующие), без которых ламповый каскад (типовая схема двухтактного выходного каскада содержит 2-4 лампы) просто невозможно согласовать с низкоомными акустическими системами. Есть, конечно же, и экземпляры "суперламповых" УМЗЧ, где нет выходных трансформаторов. Их место заняли либо мощные комплементарные пары полевых транзисторов или ... батарея мощных ламповых триодов, соединенных параллельно. Но эта тема уже выходит за рамки данной статьи. В нашем случае все гораздо проще. Транзистор VT1 (рис.2) МОП-типа, включенный по схеме с общим стоком (истоковый повторитель) работает на генератор тока (источник тока), выполненный на транзисторе VT2. Применять мощные полевые транзисторы типа КП904 не следует, у них повышенные входные и проходные емкости, что не может не сказаться на работе этого каскада.

Рис.4



Еще один камень преткновения, серьезная проблема в создании *широкополосного* трансформатора ожидает конструктора при выборе магнитопровода. Здесь уместно кое-что добавить к тому, что можно встретить в доступной радиолюбителю литературе. Различные варианты конструкций как у радиолюбителей, так и у профессионалов предлагают использование разных материалов магнитопро-

водов трансформаторов, которые не доставляли бы хлопот как при их приобретении, так и при их использовании. Суть методов такова.

Если ваш УМЗЧ будет работать на частотах выше 1 кГц, то можно смело использовать ферритовые сердечники. Но отдавать предпочтение следует экземплярам магнитопроводов с наибольшей магнитной проницаемостью, очень хорошо работают сердечники от строчных трансформаторов телевизоров. Следует предостеречь конструкторов от использования сердечников, которые уже находились длительное время в эксплуатации. Известно, что ферритовые изделия теряют с "возрастом" свои параметры, в том числе и начальную магнитную проницаемость, "неповторимая" старость их убивает не меньше, чем, например, магниты длительно эксплуатируемых громкоговорителей, о чем почему-то почти все умалчивают.

Далее о сердечниках - если УМЗЧ используют в качестве басового варианта, то смело можно применять традиционные Ш-образные пластинчатые варианты магнитопроводов. Необходимо подчеркнуть, что экранировка всех таких трансформаторов почти везде была необходимостью и потребностью. Что уж тут поделаешь, за все необходимо расплачиваться. Обычно было достаточным изготовление "кокона" из обычной кровельной жести толщиной 0,5 мм.

На НЧ хорошо работают и тороидальные сердечники. Кстати, их использование упрощает уничтожение всевозможных наводок со стороны сетевых трансформаторов. Здесь сохраняется "обратимость" преимущества тороидального сердечника - в сетевом варианте он отличается малым внешним полем излучения, во входных же (сигнальных) цепях - он малочувствителен к внешним полям. Что же касается широкополосного варианта (20 - 20 000 Гц), то наиболее правильным будет применение двух разных видов сердечников, размещенных рядом, в одном окне каркаса для намотки обмоток трансформатора. При этом устраняется завал как на высоких частотах (здесь работает ферритовый сердечник), так и на низких частотах (здесь работает трансформаторная сталь). Дополнительного улучшения звуковоспроизведения в области 1-15 кГц добиваются покрытием пластин стального сердечника лаком, как это делают в ламповых УМЗЧ. При этом каждая пластина "работает индивидуально" в составе сердечника, чем и достигается уменьшение всевозможных потерь на вихревые токи. Нитролак высыхает быстро, тонким слоем его наносят простым окунанием пластины в посуду с лаком.

Многим может показаться слишком кропотливой такая технология изготовления трансформатора в фазоинверторе, но поверьте на слово - "игра стоит свеч", ибо "что посеешь, то и пожнешь". А насчет сложности, "нетехнологичности" можно сказать следующее - за один выходной день удавалось без спешки изготовить два таких трансформатора, да и распаять их обмотки в необходимом порядке, что не скажешь о выходных трансформаторах для ламповых УМЗЧ.

Теперь несколько слов о количестве витков. Теория требует увеличения индуктивности первичной обмотки (I), с ее увеличением расширяется диапазон воспроизводимых частот в сторону более низких частот. Во всех конструкциях вполне достаточной была намотка обмоток до заполнения каркаса, диаметр провода применялся 0,1 - для 15 жил, 0,15 - для 9 жил и 0,2 для 6-жильного варианта. В последнем случае использовался и имеющийся ПЭЛШО 0,25.

Для тех же. кто не переносит трансформаторы :-), есть и бестрансформаторный вариант - рис.5. Это простейший. но вполне звучащий вариант схемы фазоинверторного каскада, который использовался не только в симметричных схемах УМЗЧ, но и в мощных мосто-

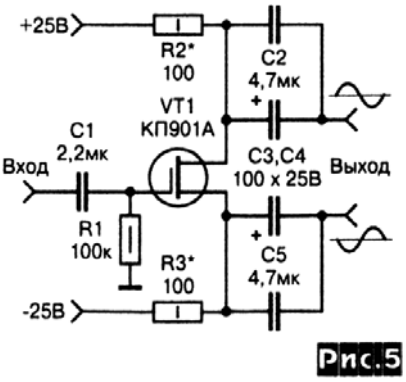


Рис.5

вых УМЗЧ. Простота зачастую обманчива, поэтому ограничу себя в критике подобных схем, но осмелюсь сказать, что площади синусоид отсимметрировать довольно сложно, зачастую необходимо вводить дополнительные цепи смещения и балансировок, а качество звуковоспроизведения при этом оставляет желать лучшего. Несмотря на вносимые трансформаторами фазовые, амплитудно-частотные искажения, они позволяют достигнуть практически линейной АЧХ в области звуковых частот, т.е. во всем диапазоне 20 Гц - 20 000 Гц. От 16 кГц и выше могут сказаться емкости обмоток, но частично уйти в сторону от этой проблемы позволяет дополнительно увеличенная площадь сечения магнитопровода. Правило простое, подобное сетевым трансформаторам: увеличив площадь сечения магнитопровода сердечника трансформатора, например, в два раза. смело уменьшают количество витков обмоток в два раза и т.д.

Расширить область эффективно воспроизводимых частот вниз, т.е. ниже 20 Гц, можно следующим способом. Полевые транзисторы (VT1, VT2 - рис.2) применяют с большими значениями Iс.нач. и увеличивают емкость конденсатора С4 до 4700 мкф. Электролитические конденсаторы работают значительно чище, если к ним приложено прямое поляризующее напряжение в несколько вольт. Очень удобно в этом случае поступать следующим образом. Устанавливают в верхний (по схеме) транзистор VT1 экземпляр с начальным током стока большим, нежели у транзистора VT2. Можно поступить и еще более "эффективно", применив балансировочный резистор для транзистора VT2, фрагмент схемы с таким резистором показан на рис.6. Первоначально движок подстроечного резистора R2' находится в нижнем (по схеме) положении, перемещение его движка вверх вызывает увеличение тока стока транзистора VT2, потенциал на положительной обкладке конденсатора С4 становится более отрицательным. Обратный процесс происходит при противоположном перемещении движка резистора R2. Таким образом можно отрегулировать каскад по наиболее подходящим режимам, особенно, когда нет транзисторов (VT1 и VT2) с близкими значениями Iс.нач., а устанавливать приходится то, что есть под рукой...

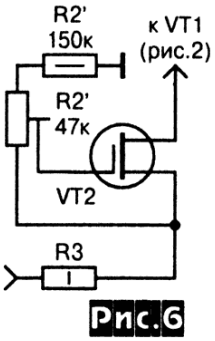


Рис.6

Довольно подробно я остановился на такой как будто бы очень простой схеме. Она-то простая, но не примитивная. Есть у нее и неоспоримые преимущества по сравнению с "всепропускающими" гальванически соединенными схемами усилителей-фазоинверторов. Первый такой плюс - это подавление инфранизкочастотных помех (например в ЭПУ), второй же - "отсечка" ультразвуковых помех вроде мощных радиостанций, различных ультразвуковых установок и др. И еще одно положительное свойство такой схемы следует подчеркнуть особо. Речь идет об отсутствии каких-либо проблем при стыковке отличных симметричных схем с асимметричным входом. Стоит взглянуть на рис.5, и сразу становится понятно (если человек имел с этим дело!), что проблема потенциалов здесь просто не решена никак. Частично ее решают заменой электролитического конденсатора на батарею параллельно соединенных неэлектролитических, мол временная задержка подключения АС все решит. Задержка во времени подключения акустических систем к УМЗЧ щелчки и выбросы при включении действительно устраняет, но вопрос возникновения дополнительных искажений изза разных потенциалов и разных выходных импедансов фазоинвертора решить она никак не может. Данная схема усилителя-фазоинвертора (рис.2) успешно использовалась с различными УМЗЧ, в том числе и с ламповыми симметричными.

В последнее время в периодических изданиях можно найти схемы УМЗЧ на мощных КП901 и КП904. Но не упоминают авторы о том, что полевые транзисторы следует отбраковывать на токах "утечки". Если, к примеру, VT1 и VT2 (в схеме рис.2) однозначно необходимо использовать высококачественные экземпляры, то в каскадах с большими амплитудами напряжений и токов, а главное - там, где входное сопротивление МОП транзистора (его уменьшение) роли не играет, можно применять и худшие экземпляры. Достигнув максимальных значений утечек, МОП транзисторы, как правило, стабильны в будущем и дальнейшего ухудшения их параметров уже не наблюдается со временем (в большинстве случаев).

Число транзисторов с повышенными утечками в цепи затвора, например, в одной пачке (стандарт - 50 шт.) может колебаться от 10 до 20 шт. (а то и более). Отбраковать мощные транзисторы не составляет большого труда - достаточно собрать своеобразный стенд, например, по рис.6 и включить в цепь затворов цифровой амперметр (стрелочные приборы в этом случае слишком чувствительны к перегрузкам и неудобны из-за необходимости многократных переключений с диапазона на диапазон).

Отличными следует считать экземпляры МОП транзисторов (речь идет применительно к схеме рис.2 - VT1, VT2), у которых ток затвора менее 10 мкА, лучшие экземпляры вообще не обнаруживают этого тока (на пределе 100 мкА).

А теперь, когда фазоинвертор уже изготовлен, можно приступать и к схеме рис.1, т.е. вернуться непосредственно к УМЗЧ. Широко распространенные разъемы (гнезда) СШ-3, СШ-5 и им подобные вообще использовать нельзя, как это делают многие конструкторы и делали заводы-изготовители. Контактное сопротивление такого соединения значительно (0,01 - 0,1 Ом!) и еще колеблется в зависимости от протекающего тока (с увеличением тока сопротивление растет!). Поэтому следует применять мощные разъемы (например, от старой военной радиоаппаратуры) с малым сопротивлением контактов. То же касается и контактов реле в блоке защиты АС от возможного появления на выходе УМЗЧ постоянного напряжения. И не надо их охватывать (контактные группы) какими-либо обратными связями для уменьшения искажений. Поверьте на слово, что на слух (субъективная экспертиза) их практически не слышно (при достаточно малых сопротивлениях контактов), чего не скажешь об "электронных" искажениях, вносимых всеми усилительными каскадами, конденсаторами и другими компонентами УМЗЧ, которые непременно вносят яркие краски в общую картину звуковоспроизведения. Свести к минимуму всевозможные искажения можно рациональным использованием усилительных каскадов (особенно это касается усилителей напряжения - чем их меньше, тем лучше качество усиленного сигнала). В данном УМЗЧ всего один каскад усиления напряжения - это транзистор VT3 (левое плечо) и VT4 (правое плечо). Каскад на транзисторах VT6 и VT5 всего лишь согласующие (токовые) эмиттерные повторители. Транзисторы VT3 и VT4 отбирают с $h21_э$ более 50, VT6 и VT5 - более 150. В этом случае никаких проблем при работе УМЗЧ на больших мощностях возникать не будет. Напряжение отрицательной обратной связи по постоянному и переменному току поступает на базы транзисторов VT6 и VT5 через резисторы R24 и R23. Глубина этой ОС всего около 20 дБ, поэтому динамические искажения в УМЗЧ отсутствуют, но такой ОС вполне достаточно для поддержания режимов выходных транзисторов VT7 и VT8 в необходимых пределах. УМЗЧ достаточно устойчив к ВЧ самовозбуждению. Простота схемы позволяет его быстро размонтировать, поскольку допускается независимое отключение питания (-40 В) драйвера и оконечных транзисторов (2 х 38 В). Полная симметрия усилителя способствует снижению нелинейных искажений и снижению чувствительности к пульсациям питающего напряжения, а также дополнительному подавлению синфазных помех, поступающих на оба входа УМЗЧ. Недостаток усилителя состоит в значительной зависимости нелинейных искажений от $h21_э$ примененных транзисторов, но

если транзисторы будут иметь h21кэ max > 100 В) транзистором n-p-n структуры с $h21_э$ > 30.

Резисторы применены типов С2-13 (0,25 Вт), МЛТ. Конденсаторы типов К73-17, К50-35 и др. Налаживание правильно (без ошибок) собранного УМЗЧ заключается в установке тока покоя транзисторов выходного каскада УМЗЧ - VT7 и VT8 в пределах 40-70 мА. Очень удобно контролировать значение тока покоя по падению напряжения на резисторах R27 и R29. Ток покоя задают резистором R3. Близкое к нулевому постоянное выходное напряжение на выходе УМЗЧ устанавливают балансировочным резистором R11 (добиваются разности потенциалов не более 100 мВ).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сухов Н.Е. и др. Техника высококачественного звуковоспроизведения - Киев, "Техника", 1985
2. Сухов Н.Е. УМЗЧ высокой верности. - "Радио", 1989 - №6, №7.
3. Сухов Н.Е. К вопросу об оценке нелинейных искажений УМЗЧ. - "Радио", №5. 1989.

© Радиохобби, №4, 2000 г.
AK Laboratory, 2000г.