

«ЯНУС-УМ» - балансный усилитель мощности класса А.

В продолжение темы, изложенной в [1], предлагаю схему усилителя мощности, построенную по тем же принципам: одноклассный класс А, без общей ООС и разделительных конденсаторов, в балансном исполнении. Упрощённая схема выходного каскада, поясняющая принцип работы, показана на **рис.1**. По сути, это мощный балансный истоковый повторитель. Управляемые противофазным сигналом полевые транзисторы Т1 и Т3 нагружены на источники тока на аналогичных транзисторах Т2 и Т4. Нагрузка же подключена между плечами и не имеет контакта с «земляной» шиной, как и шины питания. К «земле» привязаны затворы Т1 и Т3, что позволяет не использовать разделительные конденсаторы, а также общая точка соединения резисторов R1 и R6, задающая потенциалы на истоках Т1 и Т3, равные примерно половине питающего напряжения. Питание, таким образом, однополярное. Равенство потенциалов на истоках Т1 и Т3 обеспечивается, во-первых, отбором этих транзисторов по одинаковому (близкому) $U_{зи}$ в рабочей точке и, во-вторых, одинаковому тепловому режиму (они расположены на одном радиаторе в 3...4 см друг от друга). Токи же плеч жёстко удерживаются источниками тока, управляемыми напряжением (ИТУНы, о них ниже). Таким образом, постоянное смещение на нагрузке невелико (до 20...30 мВ) и стабильно при нагреве. Такое построение схемы по сравнению с небалансным имеет ряд преимуществ: исключение блока питания из тракта прохождения звукового сигнала, нечувствительность к его выбору (потребляется практически постоянный ток) и его упрощение (применён однополярный БП без стабилизации, **рис.5**), подавление чётных гармоник (основных в спектре одноклассника), нечувствительность к синфазным наводкам, нечувствительность к короткому замыканию выхода (что позволяет применить щадящую звук защиту, **рис.2 и 5**). Недостаток схемы – низкий КПД, сравнимый с таковым у ламповых одноклассников, и поэтому необходимость применения кулеров. При этом звучание усилителя получилось прежде всего очень нейтральным и детальным со всеми признаками класса А. Динамический диапазон как-бы расширен в сторону слабых сигналов (особенно это заметно при работе непосредственно от балансного источника сигнала), поэтому несмотря на небольшую выходную мощность субъективно её достаточно для озвучивания, например, жилой комнаты в 25 кв. м совместно с АС чувствительностью 88 дБ (4 Ома). Кроме того, проработка мельчайших деталей даёт очень положительный эффект цельности звуковой картины, не ограниченной пространством между АС. Конечно, для этого весь звуковой тракт должен иметь соответствующий уровень, в том числе и кабели. С использованием этого усилителя, например, неоднократно проводились тесты межблочных кабелей от бюджетных серий и до \$2500 по стоимости, обычных и балансных. При этом всегда достаточно чётко была слышна разница характеров звучания и грация по ценовым категориям. В моём же комплексе он работает преимущественно от источника, имеющего балансные выходы с выходным сопротивлением 50 Ом/плечо, максимальной амплитудой выходного тока 14 мА и дифференциальным напряжением до 5,5 В. На нагрузке 4 Ома это позволяет получать до 6 Вт/канал чистого и нейтрального класса А без использования дополнительного каскада усиления напряжения. Для небалансных же источников предусмотрен RCA-вход. Максимальная амплитуда выходного напряжения данного усилителя при указанном напряжении питания - 11 В, что соответствует 15 Вт выходной мощности на нагрузке 4 Ома. Выходное сопротивление – 0,5 Ом, полоса частот с балансного входа около 600 кГц, с небалансного – около 400 кГц. Спектр гармоник – короткий, содержит преимущественно третью гармонику (так как чётные – компенсируются). Результаты моделирования в Микрокапе следующие (нагрузка 4 Ома): выходная мощность/ токи покоя плеч/ 3-я гармоника/ 5-я гармоника – 1 Вт/ 2,6 А/ 0,03%/ --; 5 Вт/ 2,6 А/ 0,16%/ 0,008%; 10 Вт/ 2,6 А/ 0,44%/ 0,050%; 10 Вт/ 3 А/ 0,27%/

0,020%; 15 Вт/ 3 А/ 0,55%/ 0,090%. Меандр любой звуковой частоты имеет близкую к идеальной форму (на верхних ЗЧ, как и положено, слегка сглаживаются фронты).

Полная схема усилителя мощности показана на **рис.2**. Управляемые сигналом – те же транзисторы Т1 и Т3, а на Т2 и Т4 совместно с ОР2 собраны ИТУНЫ, для их питания и получения опорного напряжения применён интегральный стабилизатор VR1 LM317L (корпус ТО-92). Источниками опорного напряжения служат красные светодиоды D7 и D8. Подстроечные резисторы Р4 и Р6 позволяют в широком диапазоне выставлять ток покоя плеч, независимо друг от друга и от параметров Т2 и Т4 (их не надо подбирать). Конденсаторы С16...С19 дополнительно снижают уровень шумов опорного источника, образуя соответствующие RC-фильтры. Далее это напряжение усиливается ОР2, коэффициент усиления при этом можно выбрать самостоятельно, меняя R18 и R29 от 2 кОм и до нескольких десятков кОм. Точность поддержания тока при увеличении K_u также увеличивается, хотя она достаточна и при минимальном $K_u=2$. Но попутно возникает некоторая разница и в звучании. Причина заключается в небольшой динамической модуляции источников тока звуковым сигналом, формирующимся на R16 и R32 и поступающим через R19 и R30 на неинвертирующий вход ОУ. Обнаружить это можно осциллографом, например, на затворах Т2 и Т4. Таким образом, при увеличении K_u усиливается и модуляция ИТ, звучание при этом становится более чётким и точным, но есть и некоторый здравый предел. То же самое касается и конденсаторов С15 и С20, меняющих полосу этой модуляции, их ёмкость и тип также немного заметны на слух. Для тех, кто не согласен с таким положением вещей существует простой способ полностью исключить модуляцию: на выходах ОР2 включить дополнительные RC-цепи, срезающие все звуковые частоты, например 10 кОм+ 100,0 мкФ (электролит). В первом варианте усилителя так и было сделано. Надо добавить, что в качестве ОР2 могут работать далеко не все ОУ по причине близости потенциала входов к потенциалу вывода минусового питания. Пригодны будут ещё ОРА2604 и NE5532, а в случае работы без модуляции – ОР2177. Подключением с помощью реле Re2 подстроечных резисторов Р2 и Р7 токи покоя снижаются в два раза (или по собственному усмотрению). Такой режим используется в первых трёх положениях громкости (см. **рис.3**), при которых нет необходимости лишней траты электроэнергии. И наоборот, подключением подстроечных резисторов Р3 и Р5 с помощью реле Re1 можно ещё немного увеличить токи покоя для работы на максимальной мощности или с более низкоомной нагрузкой. У меня таким образом выставляются токи покоя по 3А/плечо, что позволяет получать до 15 Вт/4 Ома выходной мощности. Подстроечный резистор Р1 предназначен для установки на истоках Т1 и Т3 напряжения чуть выше половины напряжения питания, то есть так, чтобы напряжения сток-исток каждого транзистора были примерно одинаковы. Конденсаторы С7...С9 (желательно звуковых серий, например, Elna Silmic II плюс плёночный) применены на случай неидеальной симметрии плеч, вполне вероятный для практики случай, поэтому их следует установить вблизи транзисторов, а основной сглаживающий пульсации выпрямителя конденсатор – вблизи самого выпрямителя. На ОУ ОР1 собрана схема защиты от постоянного напряжения на выходе, полностью идентичная описанной в [1]. Порог срабатывания около 300 мВ (подстраивается при необходимости одновременным подбором R4 и R5), связующие элементы – оптопары РН1 и РН2 (РН3 и РН4 для второго канала), с их помощью реле Re4 и Re5 замыкают накоротко выходы и одновременно отключают весь усилитель от сети (см. **рис.5**).

На **рис.3** показана схема коммутации входов и дополнительный усилитель-преобразователь для входа RCA. Он полностью идентичен описанному в [1], состоит из входного ФНЧ R18C6, регулятора громкости R19, усилителя напряжения с $K_u=3$, выходной каскад которого работает в одноканальном классе А (OP2, T2, нагруженный на ИТ на T1). Для большей линейности сигнал с ОУ OP2 снимается в обход выходного каскада с дополнительного вывода для коррекции. Далее, на OP1 собран преобразователь обычного сигнала в балансный, с выходов которого через коммутирующее реле Re3 сигнал поступает на затворы выходных полевых транзисторов. Для регулирования громкости с балансного входа применён 5-ти ступенчатый регулятор на реле и резисторах (пятый, максимальный уровень, соответствует положению, когда все четыре реле разомкнуты). На мой взгляд, этого достаточно, учитывая небольшую выходную мощность усилителя, но, разумеется, уровней громкости можно сделать произвольное количество. Эти реле на схеме не показаны (чтобы не загромождать), удобно применить их того же типа, что и Re3, обмотки запитаны от стабилизированного напряжения +12 В (**рис.5**). Управление ими может быть самым разным: от кнопочного до микроконтроллерного, по желанию. У меня для этого использованы триггеры так, чтобы при переходе на любой уровень громкости все остальные сбрасывались. Предусмотрено также, что на уровнях 1, 2, 3 реле Re2 на **рис.2** замкнуто (то есть ток покоя 1,3А/плечо), на уровнях 4 и 5 это реле разомкнуто и ток покоя 2,6 А/плечо. Реле Re1 (ток покоя 3А/плечо) подключается отдельной кнопкой, как дополнительный режим повышенной мощности. Сопротивления резисторов R1 и R2 выбираются исходя из нагрузочной способности источника сигнала и субъективного качества звучания (в этом случае одновременно нужно пропорционально изменить и сопротивления резисторов R3...R6). При больших сопротивлениях (более 400 Ом) звук несколько «приглушается», при меньших же наоборот возможны резонансные призвуки. Конечно, если источник не способен работать на такую нагрузку, то либо его нужно уметь драйвером, либо увеличивать сопротивления R1...R6, либо использовать вход RCA. Однако ситуация облегчается тем, что самыми «тяжёлыми» для источника являются редко используемые уровни громкости 1 и 2, кроме того, увеличивающиеся при этом нелинейные искажения источника компенсируются снижением искажений самого усилителя. Питается данный узел от параметрических стабилизаторов R14D5 и R15D6, дополненных интегральными VR1 и VR2 на **рис.4**. Такое питание даёт заметно лучшие результаты по звучанию, чем непосредственно от интегральных стабилизаторов, хотя и немного сложнее. Для этого использован отдельный маломощный трансформатор Tr1, включаемый кнопкой S1, одновременно срабатывают реле Re3-А, Re3-Б, подключающие вход RCA. Резистором R1 можно более точно выставить питающее напряжение +/-25 В.

На **рис.5** изображена схема БП выходного каскада, защиты и других вспомогательных узлов. В качестве трансформатора применён мощный тор, около 350 Вт, с двумя одинаковыми обмотками, которые рассчитаны на долговременную отдачу 6...7 А/14 В. Также присутствует ещё одна вспомогательная обмотка 14 В/0,3 А. Питание каждого канала, как видно, отдельное (не путать шину «0 В» и «землю»!) и особенностей не имеет. Конденсаторы C1 и C3 вполне пригодны общего применения, например Samwha GT, они не слишком дороги и габаритны. Пульсации питающего напряжения в данной схеме не имеют большого значения, опять же, по причине балансного построения, поэтому дополнительные стабилизаторы или сглаживающие фильтры не нужны. Более того, первоначально применялась и меньшая ёмкость, 55 000,0 мкФ, результат при этом не сильно отличался. Фон в АС практически отсутствует. В качестве диодов D1...D8 используются софт-ультрафасты BYV42-E, создающие очень малые помехи переключения. Они включены параллельно по 2 штуки (на схеме не показано), что удобно, учитывая их комплектацию в сборке

(корпус ТО-220) и установлены на общий радиатор. Снабберные цепочки R1C2 и R2C4 подавляют возможную генерацию при работе связки трансформатор-выпрямитель, их желательно ставить непосредственно вблизи трансформатора. Дополнительная маломощная обмотка с выпрямителем и стабилизатором питает вентиляторы M1 и M2 и все реле. Включается усилитель нажатием и удержанием в течение нескольких секунд нефиксируемого сдвоенного переключателя S2. При этом с помощью R3 выполняется функция «софт-старта», после чего срабатывает реле Re5 и замыкает своими контактами сетевой контур. Время срабатывания (2...4 сек.) устанавливается подстроечным резистором P1, либо, при необходимости, подбором C9 или R4. Одновременно Re4 размыкает выходы усилителя, если нет сигнала аварии. T1 выполняет роль «защёлки», предотвращая вхождение системы в режим мультивибратора после сигнала аварии. На время переходных процессов при включении «защёлка» блокируется секцией S2.1. Выключается усилитель кратковременным нажатием кнопки S1 (у меня эта функция совмещена с каждой из кнопок громкости при нажатии в течение 3 сек., что удобно). При появлении же сигнала аварии через оптопары PH1...PH4 усилитель отключается от сети автоматически, замыкая накоротко выходы и спасая таким образом АС. Резисторами R5 и R6 в некоторых пределах можно отрегулировать скорость вращения вентиляторов, снизив подаваемое на них напряжение. Например, при токах покоя плеч 1,3 А у меня на них подаётся около 9 В, а при 2,6...3 А – около 11 В (с помощью дополнительного ключа на полевом транзисторе, на схеме не показано). Надо отметить, что применённые вентиляторы надёжны и практически бесшумны, особенно при небольшом снижении питания.

Настройку усилителя нужно начинать с установки всех подстроечных резисторов в среднее положение, а P4 и P6 на **рис.2** – в нижнее по схеме. Систему защиты при настройке следует отключить закорачиванием конденсатора C1 на **рис.2**. Далее, аккуратным вращением P4 (или P6) выставляем ток покоя соответствующего плеча равным 2600 мА (контроль – по падению напряжения на R16 (или R32)). Потом то же самое делаем во втором плече. После чего подстроечным резистором P1 устанавливаем 8,4 В относительно шины «0 В» на истоках T1 и T3 (точнее, столько, чтобы напряжение сток-исток всех четырёх транзисторов было одинаковым). Далее, повторяем всё это во втором канале. После прогрева уточняем токи и напряжения, а также контролируем постоянное напряжение на выходе: если T1 и T3 подобраны правильно, то оно должно быть в пределах вышеуказанных 20...30 мВ. После этого, замыкая реле Re2, подстроечными резисторами P2 и P7 выставляем поочерёдно токи плеч по 1300 мА. В этом режиме напряжения на истоках T1 и T3 будут несколько выше в связи с повышением напряжения питания, однако никакого негатива в этом нет. И наконец, замыкая реле Re1 (но размыкая Re2) подстроечными резисторами P3 и P5 выставляем токи плеч по 3000 мА (можно и немного более, если позволяют радиаторы). Нужно сказать, что данные величины токов и напряжения питания применимы для нагрузки сопротивлением 4 Ома. Для 8-омной же нагрузки токи следует снизить, а напряжение питания повысить, так, например, для получения 10 Вт/ 8 Ом питание нужно поднять до 18...19 В, а токи покоя плеч снизить до 2,2...2,3 А. Можно также уточнить время срабатывания Re5 после «софт-старта» поворотом подстроечного резистора P1 на **рис.5**, для чего нужно выключить и снова включить усилитель. После этого подключаем защиту, размыкая C1. Протестировать её работу удобно путём снижения тока покоя в одном из плеч, разность потенциалов на выходе при этом будет увеличиваться вплоть до срабатывания защиты.

Собран усилитель в корпусе габаритами 420 x 270 x 120, но я бы посоветовал их немного увеличить по причине тепловыделения. Четыре выходных транзистора и диодный мост каждого канала установлены на общий радиатор, но отдельный для каждого канала – алюминиевый профиль с рёбрами 200 x 100 x 38. Вентилятор крепится со стороны рёбер, под его площадью с обратной стороны установлены транзисторы, таким образом, обдувается самая горячая площадка. В боковых стенках корпуса сделаны отверстия для поступления воздуха к вентиляторам. Что касается применяемых деталей, то стоит обратить внимание на качество резисторов R1...R9, R11...R13, R16..R18 на **рис.3**, из них R1, R2, R7, R8 должны быть точными, 0,5% (попарно, а не номинально). Хороший вариант Vishay RN55, RC55. То же касается и качества R12, R15, R17, R31 на **рис.2**. Здесь же R16, R32 – проволочные, 10 Вт, их сопротивление может быть 0,1...0,15 Ом. Все подстроечные резисторы - многооборотные СП5-3. На этом же рисунке C17 и C18 – неполярные электролитические Nichicon Muse ES. Выбор полевых транзисторов IRF630 обусловлен их относительно небольшими межэлектродными ёмкостями, достаточной крутизной, чтобы получить низкое выходное сопротивление и невысокой ценой. Из купленных мной 10 штук одной партии удалось отобрать три пары с близкими значениями $U_{з-и}$ для работы в качестве T1 и T3, остальные были применены в источниках тока. Единственный отрицательный момент заключается в малой площади теплоотдачи (корпус ТО-220), тем не менее, за три года работы усилителя отказов не было. Нагрев их корпусов составляет около 65 градусов в основном режиме (токи покоя плеч по 2,6 А), прокладки слюдяные либо из оксида алюминия. Проверялись в работе также транзисторы 2SK1529, но существенных отличий замечено не было, кроме того, что остаточное напряжение сток-исток у них чуть больше, соответственно максимальная амплитуда выходного сигнала чуть меньше. Также проверялись и 2SK1058, но из-за высокого выходного сопротивления и остаточного напряжения сток-исток в данной схеме оказались непригодны. Транзисторы T2 и T4 в источниках тока возможно заменить на биполярные дарлингтоны, мной была опробована такая замена (2SC3502 + 2SC5200 + резистор 220 Ом между базой и эмиттером последнего транзистора). Характер звучания усилителя при этом также немного меняется: точнее, собраннее, но немного мельче и немного менее объёмно, несколько тяжеловеснее, чем с полевыми транзисторами. Я бы сказал, что для более тяжёлой, драйвовой музыки такие ИТ скорее более приемлемы и наоборот. В этом случае для лучшего удержания токов резисторы R18 и R29 на **рис.2** должны быть не менее 7,5 кОм, а светодиод, формирующий опорное напряжение может быть оставлен один. Также возможно придётся уточнить номиналы R23 и R25. Балансный драйвер DRV134 (OP1 на **рис.3**) можно заменить на SSM2142, более дешёвый и распространённый, но имеющий чуть худшие параметры. Полевой транзистор T2 здесь же меняется на BSS138 или 2SK669. Стабилизатор L7812 (VR1 на **рис.5**) установлен на минимальный радиатор.

Литература

1. А. Петко, «Янус» - балансный усилитель класса А для наушников, Радиолюбитель №1 2013, с. 53.

