

Встраиваемый в ЦАП усилитель для головных телефонов.

Усилитель для наушников - важная часть домашней высококачественной аудиосистемы. Необходимость наушников можно обосновать уже одной только возможностью получить широчайший динамический диапазон. Попытки достичь сравнимо высоких максимальных уровней звукового давления и малого постороннего шума посредством АС весьма затратны и не всегда оказываются успешными. Если же к этому присовокупить такие особенности прослушивания через головные телефоны как относительно низкие искажения, отсутствие влияния резонансов помещения, довольно линейная фазочастотная и временная характеристики, то наличие высококачественных наушников в составе домашнего аудиокomплекса придется признать практически обязательным.

Высокие потенциальные возможности головных телефонов автоматически предъявляют жесткие требования к звуковому тракту. По мере совершенствования устройств воспроизведения вынужденно растут и требования к телефонному усилителю. На данный момент, когда уровень искажений и шумов ЦАП вплотную приблизился/перешагнул уровень -120 дБ, от телефонного усилителя логично ожидать как минимум сравнимо уровня шума и гораздо меньших искажений. Т.е.:

1. Для обеспечения объективной нейтральности подачи звукового материала искажения телефонного усилителя желательны на уровне на порядок меньшем, чем искажения предполагаемого источника, как ориентир можно принять значение -140 дБ.
2. Уровень шума не должен существенно ухудшать характеристики источника сигнала, что на данный момент означает относительный уровень шума не хуже -120 дБ.

Другая часть требований к качественному *универсальному* усилителю для наушников автоматически следуют из характеристик самих головных телефонов:

3. Диапазон допустимых сопротивлений нагрузки от 16 до 300-600 Ом;
4. Выходная мощность порядка долей Ватт (для достижений пиковых уровней звукового давления ~120 дБ);

Назначение данного модуля (работа в составе качественного ЦАП) диктует также такие дополнительные требования как невосприимчивость к высокочастотным помехам, наличие интегрированного регулятора громкости, минимальное влияние со стороны платы усилителя на собственно ЦАП.

С другой стороны, работа исключительно совместно с ЦАП предполагает и некоторое облегчение конструкции. Например, избыточен входной буфер, нет нужды беспокоиться о чрезмерном входном напряжении и его постоянной составляющей. Кроме того, можно заранее полагаться на то, что не будет сигналов с очень большой скоростью нарастания, и вполне достаточно скорости в десяток-несколько вольт/микросекунду.

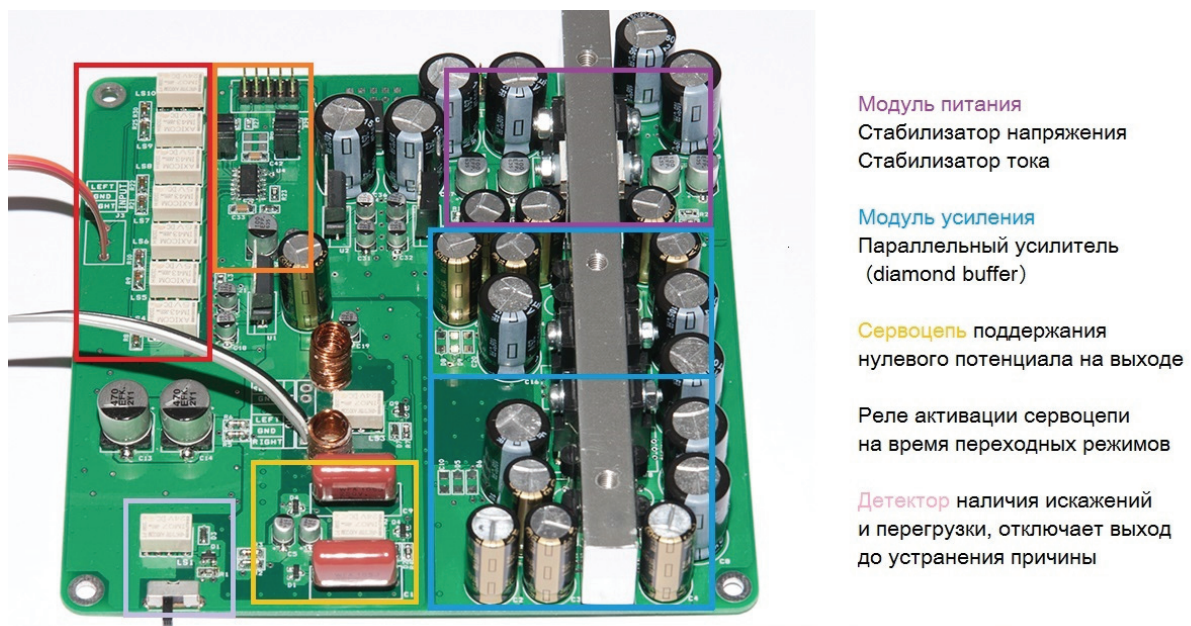
Несколько противоречивым представляется выбор значения выходного сопротивления усилителя. С одной стороны, низкое выходное сопротивление является весьма желательным с точки зрения демпфирования излучателя и снижения его искажений при воспроизведении низкочастотных звуков. С другой стороны, выходное сопротивление усилителя, сравнимое или более высокое, чем активное сопротивление излучателей, порой может оказаться благоприятным с точки зрения минимизации искажений излучающих капсулей на средних и высоких частотах.

На первый взгляд, разумным представляется некий компромисс, скажем установка на выход усилителя резистора рекомендованного ГОСТ номинала 56 Ом. Такой подход вполне оправдан в общем случае, но требование высокого *субъективного* качества звучания вносит свои коррективы. На практике очень непросто подобрать резистор,

который оставался бы совершенно нейтральным на слух. Причем к значительному субъективному изменению качества звука порой приводило даже применение резисторов очень малых номиналов (скажем, 2.2 Ом), весьма желательных в конструкции для ограничения выходного тока при коротких замыканиях в нагрузке.

Поскольку применение альтернативных способов повышения выходного сопротивления нагрузки (например, посредством обратной связи по току) также имеет не всегда однозначные последствия, было принято решение обеспечить минимально возможное выходное сопротивление усилителя, как оптимальное с точки зрения звука в подавляющем большинстве случаев. При желании потребитель может сам поэкспериментировать с повышением выходного сопротивления, подбирая резисторы в соответствии с личными звуковыми пристрастиями.

Внешний вид модуля приведен на рисунке:



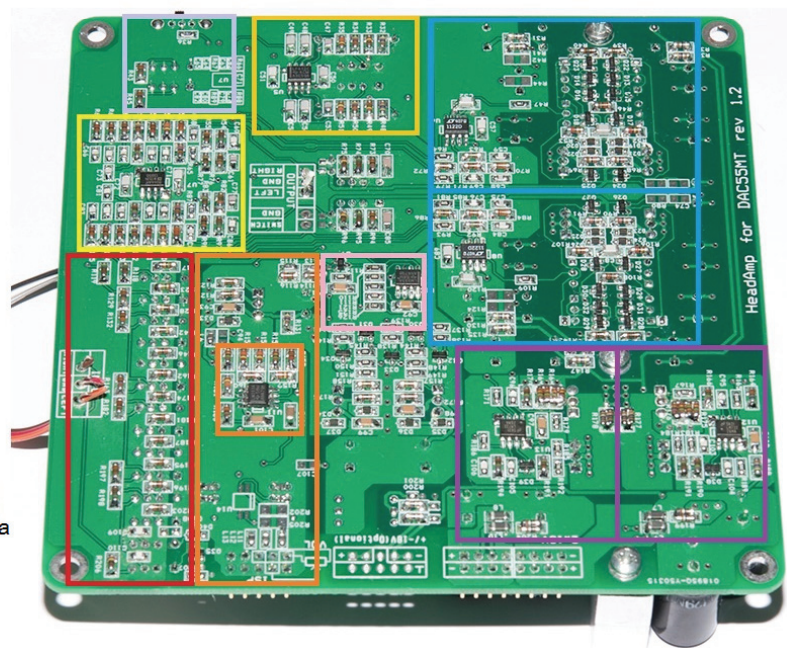
Переключатель и реле для
снижения усиления при применении
низкоомных головных телефонов

Селектор искажений

Сравнивает сигнал после
регулятора громкости с
сигналом на выходе усилителя.
Вносит соответствующую коррекцию

Регулятор громкости лестничного типа
Шаг регулировки 1.5 дБ

Контроллер регулировки громкости и
детектор движения ручки громкости для
кратковременной активации контроллера



Питание:

Модуль выполнен на четырехслойной плате размером 135 x 135 мм. Один из внутренних слоев полностью отведен под "землю". Полигон "земли" сделан не сплошным, а секционированным с целью разграничения токов в специфических областях (источники питания, малосигнальные / сильноточные узлы, сервисные цепи). Земляные секторы сделаны перекрывающимися в смежных слоях, что обеспечивает емкостную связь между соседними полигонами. В итоге разводка земли оказывается своего рода разновидностью "звезды" на звуковых частотах (ЗЧ, где это способствует минимизации искажений) и сплошного полигона на ВЧ (чем достигается помехозащищенность платы). Помимо этого, организованы локальные "островки земли", которые точно подсоединяются к полигону в оптимальном месте.

Общая компоновка предполагает преимущественную перпендикулярность направления течения сигнальных токов и токов питания, что минимизирует их взаимовлияние.

Для минимизации помех все цепи питания сделаны "бутербродом" - положительный и отрицательный полигоны по возможности геометрически идентичны и располагаются друг над другом.

Питание мощного выходного каскада выполнено по оригинальной схеме так называемого стабилизатора параллельного типа. Ток, отбираемый от источника первичного питания, стабилен и не модулирован током звуковой частоты, что благотворно сказывается на звуке. Стабилизация тока потребления сочетается со стабилизацией напряжения. От данного стабилизатора питается исключительно выходной каскад, все остальные цепи запитаны от точки ввода напряжения питания на плату т.е. (благодаря стабилизатору) "не чувствуют" выходного каскада.

Питание малосигнальной части отделено от общего питания синфазным дросселем. Благодаря этому даже на частотах ниже 100 Гц входная часть оказывается запитанной как бы от индивидуального источника. Опыты показали, что опциональное использование дополнительного отдельного источника питания не имеет преимуществ.

Также к линиям малосигнального питания (между его положительной и отрицательной шинами) подключены все реле устройства. Сделано это с целью избежать соединения катушек реле с земляным полигоном. Помимо этого, катушки бистабильных реле регулятора громкости в обычном режиме неактивны и вообще отключены от внутренних цепей коммутирующего их микроконтроллера.

Плата потребляет довольно существенную мощность (~20 Вт), поэтому на время, когда телефонный усилитель не востребован, его можно перевести в режим пониженного энергопотребления простым выдергиванием из гнезда "джека" головных телефонов.

От входа к выходу:

После входного ВЧ-фильтра (400 кГц) сигнал попадает на релейный регулятор громкости (РГ). Он имеет 64 ступени с шагом 1.5 дБ и выполнен на малогабаритных бистабильных реле с золото-рутениевыми контактами (контактные поверхности чисто золотые). Это надежный способ обеспечить идеальную коммутацию малых токов в течение продолжительного периода эксплуатации.

Реле управляются микроконтроллером, который активизируется только на время переключения. После коммутации реле микроконтроллер отключается. Поскольку внутренний АЦП микроконтроллера не активен в режиме сна с полным гашением внутренней генерации, использована схема на компараторах, которая детектирует начало движения ручки потенциометра и "будит"/активирует микроконтроллер.

Для удобства пользования шкала регулировки сделана нелинейной, наиболее употребительным уровням в диапазоне от максимального до -48 дБ отведены верхние 2/3 шкалы, а уровням -48 - -96 дБ соответственно нижняя треть.

Все резисторы в регуляторе громкости (как и во всех остальных сигнальных цепях) - тонкопленочные Vishay Beyslag, 0.4 Вт, 1% в корпусе melf (ММА0204). В РГ, как и во всем устройстве, нет конденсаторов, влияющих на АФЧХ усилителя в звуковом диапазоне. Основная функция конденсаторов малой емкости - защита от помех и формирование нужной коррекции на частотах в $\sim$ мегагерц и выше, что дало возможность применить качественные керамические конденсаторы группы GOG (пр0).

После РГ сигнал попадает на ОУ усилителя (LT1122) умощненный разновидностью параллельного усилителя тока, известного под названием "diamond buffer". Схема имеет ряд не очень принципиальных, но полезных особенностей. В частности, за счет того, что выходные транзисторы буфера питаются пониженным напряжением, транзисторы первой ступени удалось запитать от "двухэтажных" источников тока, что минимизирует тепловые колебания их режима (в том числе и со звуковой частотой - "тепловые искажения").

Для исключения входных синфазных искажений, применено инвертирующее включение ОУ. Известный недостаток такого включения - это уменьшение устойчивости при отсоединении источника сигнала. В данной схеме эффект нейтрализован дополнительными конденсаторами в цепи ОС усилителя. Можно отметить, что конденсаторы подобраны так, что их вклад на ЗЧ практически "взаимоуничтожается", и итоговая характеристика цепи ОС не отличается от таковой у простого резистивного делителя. За счет этого, а так же за счет умеренно широкой полосы ООС (~ 3 МГц) достигаются отличные импульсные характеристики схемы.

В принципе, усилитель в описанном виде представляет собой законченное устройство с приемлемыми параметрами и производит отличное субъективное впечатление. Но необходимо отметить еще одну особенность данной схемы. У нее, как у любого инвертирующего усилителя, выходной сигнал "перевернут" относительно входного, и их суммирование должно в идеале давать ноль. На практике в точке суммирования имеется некоторый сигнал - в чистом виде "ошибка усиления" данного блока (включающая в себя все многообразие искажений и погрешностей - гармонические, интермодуляционные, тепловые, избыточный шум и т.д.). Ну а раз уж ошибка усиления выделена, разумной представляется попытка скорректировать ее в усилителе. Такой подход, также известный как применение так называемого "селектора искажений" известен достаточно давно, но, к сожалению, оказывается довольно сложным для *корректной* реализации.

Принцип, положенный в данную схему, состоит в том, чтобы основную работу по-прежнему делал главный усилитель - быстрый и довольно точный. Схема же селектора искажений (на AD8066) фактически только неспешно "поправляет" сигнал в малом, сводя ошибку усиления (= искажения всех видов) к пренебрежимо малой величине в звуковом диапазоне.

Главенствует принцип "не навредить". В частности, именно поэтому в схему введен контроль сигнала коррекции ошибок ("детектор искажений"). Если по каким-либо причинам (перегрузка выходного каскада по току или напряжению, особенности фонограммы и т.п.) искажения основного усилителя окажутся не малыми, и их исправление может выйти за пределы возможностей, усилитель временно отключит наушники до восстановления нормальной работы. Таким образом, некорректные режимы просто отсекаются.

Нужно отметить, что энергетические возможности схемы (ограничение по амплитуде ~ 14 Вольт, по току ~ 0.18 Ампера в режиме чистого класса А), в общем-то, позволяют работать, не достигая критичного режима ни по напряжению ("клиппирование"), ни по току. Но на практике выяснилось, что первое время после начала прослушивания уровень громкости часто недооценивается и даже превышение порога в 120 дБ не воспринимается как нечто чрезмерное. Как следствие, усилитель вгоняется в режим перегрузки. На этот случай реализовано автоматическое уменьшение громкости по сигналу от детектора искажений. Через 4 секунды после последнего поворота ручки громкости при наступлении перегрузки уровень громкости снижается (не чаще чем раз в 2 секунды) до полного исчезновения перегрузки. После нового прикосновения к ручке громкости (небольшого ее поворота) уровень громкости возвращается к значению, соответствующему углу поворота ручки громкости.

Зависимость выходной мощности от сопротивления нагрузки

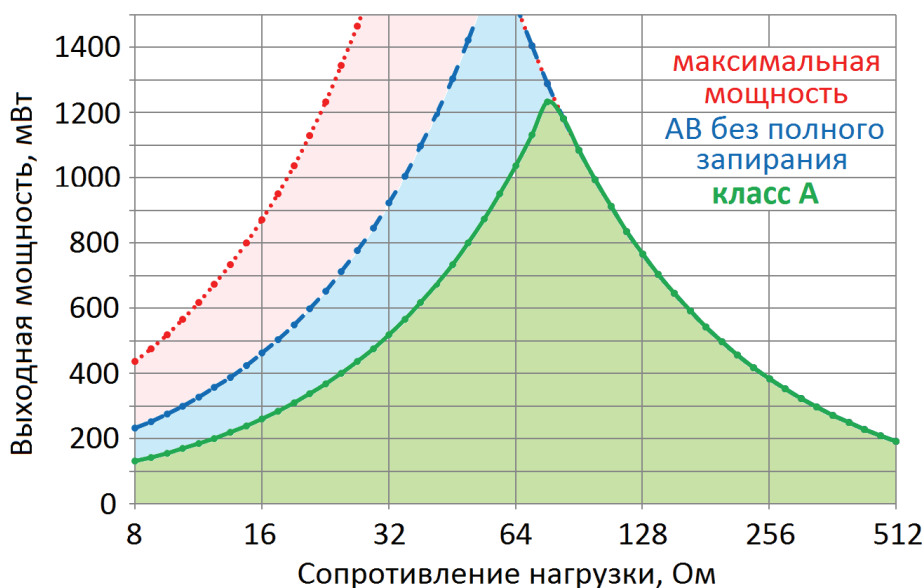


Рисунок иллюстрирует выходную мощность усилителя в зависимости от сопротивления нагрузки. Базовую область работы в чистом классе А отображает зеленая область. Голубая область показывает режимы, в которых один из выходных транзисторов начинает заклипироваться. Хотя такой "идеологически вредный" режим изначально не рассматривался как рабочий, ухудшения объективных характеристик в этой области на данный момент не обнаружено, субъективные же оценки этого диапазона мощностей затруднены ввиду очень высокого уровня громкости. Красным отмечена зона максимальной мощности, в этой области должна срабатывать защиты по току, с соответствующим автоматическим снижением громкости.

Для исключения перегрузки низкоомных наушников установлено реле, снижающее чувствительность усилителя. Переключателем можно втрое уменьшить изначальное усиление (~ 14 дБ). Благодаря особенности включения реле, при этом не просто на ~ 10 дБ уменьшается максимальное выходное напряжение, но и на ~ 6 дБ снижается уровень шума устройства.

Головные телефоны подключены к усилителю через RLC цепь. На нее возложено несколько задач. В частности, последовательное RC звено на выходе демпфирует возможные резонансы кабеля, а LR цепь ослабляет проникновение помех, наводящихся на кабель головных телефонов. Кроме того, отделение нагрузки позволило добиться нечувствительности усилителя к ее емкости и, в более широком смысле, к импедансу кабеля, являющимся, по сути, длинной линией. При повышении емкости нагрузки усилитель остается устойчивым вплоть до срабатывания защиты по току.

Важной особенностью конструкции является наличие интегратора - сервисного устройства для поддержания нулевого постоянного напряжения на выходе усилителя. С одной стороны, головные телефоны очень не любят постоянное смещение, потому наличие интегратора весьма желательно. С другой стороны, накоплен довольно большой негативный опыт применения подобных устройств, что заставило очень вдумчиво подойти к конструированию данного узла. В усилителе реализован двухступенчатый алгоритм работы интегратора. Он активируется при включении устройства (и при срабатывании защиты), причем оказывается в "быстром" режиме, что позволяет стабилизировать напряжение на выходе за доли - несколько секунд. В этот момент выход усилителя неактивен и закорочен, т.е. переходные процессы не затрагивают нагрузку. Через некоторое время, выход активируется и одновременно с этим интегратор (посредством дополнительного реле) переводится в "полуизолированное" состояние. В этом режиме реакция на колебания постоянной составляющей чрезвычайно инертна (постоянная времени ~ 500 секунд, что, впрочем, достаточно для компенсации термодрейфов), но зато обеспечивается как экстремально низкая нижняя рабочая частота 0.001 Гц (на практике неотличимо от УПТ), так и полная субъективная неслышимость интегратора в составе усилителя.

От автора

Основной идеей при конструировании усилителя было не обеспечить некие оговоренные формальные параметры, а реализовать максимально линейное усиление сигнала, по возможности, не допуская факторов, которые могли бы ухудшить звук субъективно. Именно этим продиктовано избыточное с "инженерной" точки зрения усложнение конструкции, такие меры, как отсутствие разделительных конденсаторов на входе и балластных резисторов на выходе, неэкономный и "горячий" класс А выходного каскада, оптимизированные по линейности режимы элементов, достаточно сложная схема селектора искажений, несколько громоздкий блок питания.

Естественно имеют право на жизнь и проторенные пути формальной минимизации искажений (пример концепта: микросхема-буфер в классе АВ плюс широкополосная ООС, композитное включение ОУ), но существует мнение, что при номинально высоких характеристиках такие конструкции далеко не всегда способны обеспечить достаточное *субъективное* качества звука. Кроме того, можно отметить, что собственно схема усилителя (которой зачастую и уделяется основное внимание разработчика) далеко не полностью определяет *интегральное* качество конструкции. Именно для оптимального увязывания таких разных (и зачастую плохо сочетаемых) узлов как регулятор громкости, управляющий контроллер, блок питания и т.п. представленный усилитель реализован на одной многослойной плате, где всевозможные взаимовлияния учтены и минимизированы конструктивно.

Ну а то обстоятельство, что не только субъективные, но формальные характеристики описываемого модуля оказываются вполне приемлемыми, только подтверждает право на жизнь такого подхода. К сожалению, на данный момент не имеется корректных спектров искажений данной конструкции. Можно только утверждать, что на режимах в пределах класса А продукты гармонических и интермодуляционных искажений в области звуковых частот имеют амплитуду не выше -140 дБ (предел разрешения анализатора спектра на момент измерений).