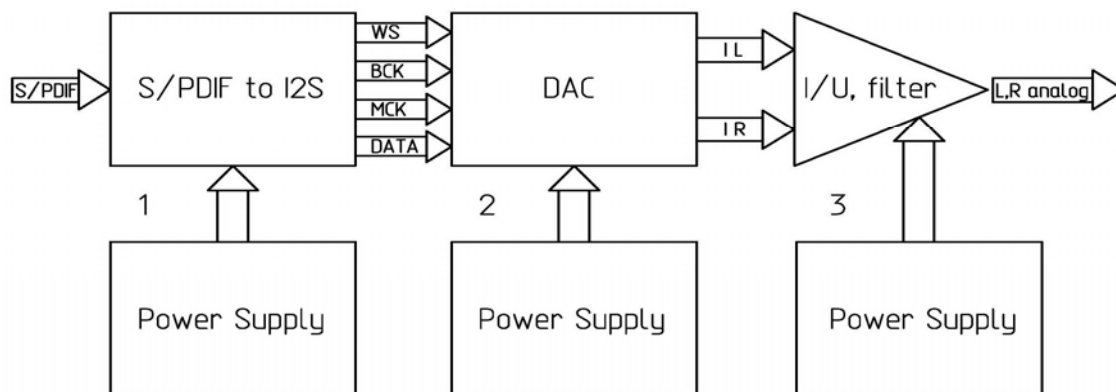


ЦАП начального уровня

В данной статье в краткой форме изложены принципы проектирования цифроаналогового преобразователя (ЦАП) для начинающих. Под начинающими подразумеваются аудио-конструкторы, которые уже имеют опыт изготовления и наладки аналоговой техники, например усилителей, но которым хочется приобщиться к созданию устройств из мира «цифры». Такой ЦАП должен обладать субъективным звучанием не хуже чем бюджетные промышленные аппараты, а так же быть достаточно простым в сборке и наладке и, что немаловажно, базироваться на легкодоступных, недорогих электронных компонентах.

ЦАП, как полноценное устройство, условно можно разделить на несколько функциональных блоков:

- 1) Входной цифровой.
- 2) Микросхема-преобразователь цифрового кода в аналоговый сигнал (DAC).
- 3) Аналоговый.



Функциональное назначение цифрового блока – прием цифрового сигнала интерфейса S/PDIF как наиболее универсального и распаковка в поддерживающий ЦАПом интерфейс стандарта I2S. Данные операции выполняются специализированной микросхемой – цифровым приемником (Digital Interface Receiver). S/PDIF интерфейс является асинхронным, по одному проводнику в закодированном виде одновременно передается сигнал синхронизации и данные. Существенный недостаток и расплата за такую универсальную простоту – привнесенная апертурная дрожь (джиттер) составляющих шины I2S (BCK, WS, DATA, MCK) при распаковке. Джиттер – это кратковременная нестабильность положения фронтов цифрового сигнала. Можно сказать, что во всех цифровых системах в той или иной степени присутствует джиттер разных видов и природы происхождения, но его влияние в последнее время несколько преувеличено, а сверхмалое значение действительно имеет смысл при построении бескомпромиссного ЦАП высокого разрешения. Для борьбы с джиттером в цифровой части в качественных устройствах используется синхронная и асинхронная пересинхронизация сигнала непосредственно перед микросхемой ЦАП, применение специальных микросхем асинхронной передискретизации (ASRC), тактирование от прецизионных кварцевых генераторов, малошумящие источники питания и т. д. В любом случае – это усложнение конструкции, а для нашего простого любительского ЦАП вполне достаточно качества широко распространенных цифровых приемников с восстановлением данных посредством системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Наиболее известные представители: DIR9001, WM8804, WM8805, AK4115, CS8416, CS8414. Применение приемников серии CS841X в наше время не имеет смысла, поскольку объективно (да и субъективно при прослушивании) обеспечивают наихудшее качество восстановления цифрового потока. WM880X обладают уникальной внутренней структурой, совмещающей аналоговую и цифровую ФАПЧ с буфером и могут быть рекомендованы к применению, хорошо подходят для низкоккачественных, высокоджиттерных источников сигнала, таких как, например, S/PDIF выход на материнской плате компьютера. DIR9001 – еще один достойный представитель, обладает

простотой в применении и высокими как объективными (джиттер восстановленного потока-50 пС) так и субъективными показателями. Максимальная принимаемая частота 105 кГц, но это не критично, поскольку записей с частотой дискретизации выше 96 кГц весьма немного.

После цифрового приемника цифровой сигнал уже стандарта I2S, т. е. используется несколько линий для передачи сигнала синхронизации и данных. Если в качестве конвертации цифрового кода в аналоговый сигнал используется микросхема ЦАП параллельного типа, то появляется возможность подключить I2S-шину с выхода цифрового приемника напрямую к ЦАП, так называемая non-oversampling (NOS) архитектура, или использовать между ними цифровой фильтр-интерполятор. Последний необходим, чтобы математическими алгоритмами увеличить частоту дискретизации сигнала (как правило, в 4, 8 раз) и тем самым сместить продукты дискретизации как можно выше по частоте, которые затем легко отфильтровать аналоговым фильтром невысокого порядка. Не углубляясь в расхождение теории и практики можно отметить, что отсутствие цифрового фильтра не является каким-то критическим недостатком, а действительно хороших приборов данного класса в наше время не найти, к тому же сложность их применения может вызвать значительное усложнение конструкции. При использовании компьютера как цифрового транспорта алгоритмы качественной цифровой фильтрации можно осуществлять программно, применяя популярные плагины-передискретизаторы (например, SoX). К тому же, в последнее время наметился устойчивый тренд именно на NOS преобразователи (например устройства серии Metrum Acoustic, фирмы All Engineering). Как правило, апологеты ЦАП без цифровой фильтрации приводят в качестве аргумента целостное, не искаженное во временной области восстановление музыкального сигнала и как следствие более естественное и натуральное звучание таких устройств. Существенный недостаток отсутствия цифрового фильтра – это снижение вариативности подключаемых после ЦАП аналоговых усилительных устройств, в виду повышенного значения ультразвуковых составляющих в выходном сигнале.

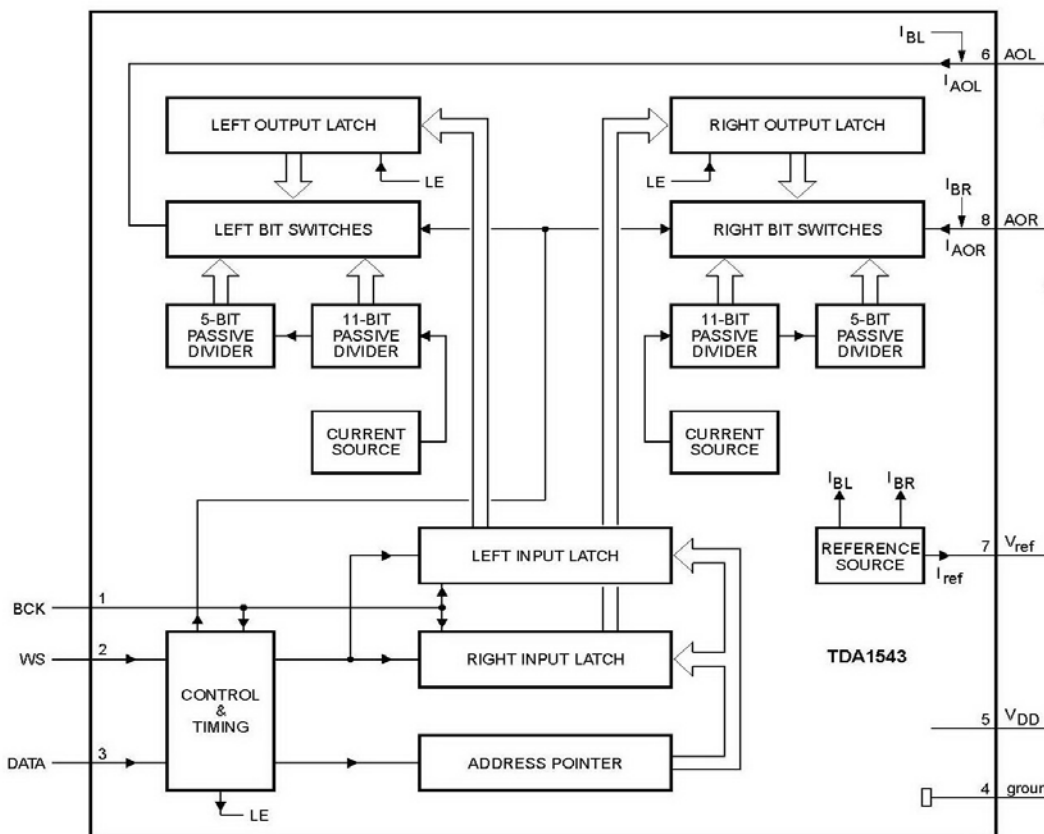
Выбор, собственно, самой микросхемы цифроаналогового преобразователя приводит к закономерному вопросу – какой тип конвертации цифрового кода в аналоговый сигнал предпочесть? Как известно, в мире цифрового аудио существует 2 основных принципа преобразования: параллельный, приборы данного типа часто называют мультибитными и последовательный (дельта-принцип) – одноканальные. Следует отметить, что в настоящее время «чистых» дельта-преобразователей не существует, все современные высококачественные приборы относящиеся к данному классу представляют собой сложные интегральные цифровые устройства, совмещающие в себе принципы как последовательного так и параллельного преобразования.

Традиционно считалось, что параллельные ЦАП обладают определенными субъективными преимуществами, звучание их превозносили и при описании звука часто присутствовали эпитеты: аналоговый, мягкий, слитный, выразительный и т. д. В последние годы тренд сменился, не только промышленные аудио-производители, но и обычные любители, аудио-энтузиасты, все больше внимания уделяют именно дельта-приборам, доводя конструкции на их основе до инженерного совершенства (Дмитрий Адроников, Lynx Audio). Субъективное качество звука при грамотной реализации топовых дельта-конвертеров тоже мало кого оставляет равнодушным, а их физическое разрешение позволяет восстановить низкоуровневую информацию заложенную в hi-res записях. Увы, реализация потенциала качественных дельта-преобразователей (AD1853, PCM1794, AKM4399, WM8741, ES9018 и т. д.), требует весьма тщательного проектирования и продуманной конструкции, что предполагает наличие некоторого опыта у конструктора и сопровождается определенными материально-техническими и технологическими сложностями. Применение менее сложных популярных преобразователей, например PCM2704, изначально не рассматривается в виду их посредственного звучания. Резюмируя, можно сказать, что при одинаковом уровне проектирования, получить хорошо звучащий ЦАП на основе мультибитного конвертера проще. И еще одна немаловажная особенность: параллельные ЦАП при достаточно высоких, относительно сигма-дельта приборов, искажениях, измеренных на стационарном детерминированном сигнале, субъективно могут звучать весьма приятно.

Доступность микросхем параллельного типа преобразования на основе сверхточных резисторов (R-2R архитектура) в наше время оставляет желать лучшего. В виду высокой себестоимости изготовления, обусловленной технологическими сложностями (прецизионная подстройка интегральных резистивных матриц), данные преобразователи (наиболее известные представители – AD1862, AD1860, AD1865, PCM58, PCM63, PCM1702, PCM1704) у ведущих производителей давно сняты с производства. Конечно, на вторичном рынке еще можно найти данный тип микросхем, но нет никакой гарантии, что они соответствуют техническим параметрам (подделка или неправильная эксплуатация/демонтаж), да и цены порой весьма негуманны.

Несколько особняком стоят приборы пионера цифрового аудио – фирмы Philips. В своих конвертерах TDA1540, TDA1541, необходимая точность преобразования осуществляется не технологически, в виду отсутствия сверхточных резисторов, а схемотехнически, используя особую схемную конфигурацию "Динамическое согласование элементов" ("Dynamic Element Matching", DEM). Эта технология объединяет пассивные токовые делители с методом временного деления. Итоговая точность получается даже выше необходимых 16 бит стандарта CDAA (т. е. уровень паразитных спектральных компонент, обусловленных нелинейностью характеристики преобразования находится ниже уровня -96 дБ). Цифроаналоговые преобразователи данного типа получались дешевыми в производстве, не подвержены старению элементов (точность преобразования не меняется со временем в отличие от R-2R приборов), более распространены и относительно доступны даже в наше время. Немаловажное преимущество для конструктора, в одном корпусе 2 канала. В принципе, данные конвертеры (TDA1541 и их разновидности) могут быть рекомендованы начинающим, но не углубляясь в технические подробности отмечу, что для реализации потенциала TDA1541 требуется достаточно продуманная конструкция, предполагающая сложную систему питания и качественное построение послецеповых аналоговых каскадов, весьма желательна двухслойная печатная плата. В итоге методом исключения мы подходим к удовлетворяющей нашим требованиям микросхеме – TDA1543.

TDA1543, образно выражаясь, «младший брат» легендарной TDA1541. Разработана позже и подверглась некоторому упрощению. Широко распространена и весьма дешева. Сам производитель, фирма Philips, в технической документации именует его экономным вариантом для применения в Hi-Fi цифровом оборудовании. Рассмотрим блок-схему.



Состоит из входного блока (I2S вход), регистров, коммутационных битовых ключей, генератора стабильного тока (ГСТ), 5-битной, предположительно, резисторной матрицы, 11-битной транзисторной (2048 транзистора). Использует единственный однополярный источник питания. Имеет униполярный токовый выход, ток втекающий, выходы должны находиться под положительным потенциалом, приблизительно $U_{пит}/2$. Имеется возможность подстройки начального тока середины шкалы преобразования. Может принимать сигнал с 4-х кратной передискретизацией (192 кГц). Принцип преобразования – взвешенная матрица 1-2-4-8...n, где каждому значению цифрового кода соответствует только свой весовой ток конечного элемента. Следует отметить, что в отличие от R-2R преобразователей данная архитектура имеет преимущество, обусловленное независимостью весовых токов разрядов друг от друга. Необходимая точность 11 младших разрядов 16 разрядного двоичного слова обеспечивается 2048 транзисторами (2^n где $n=11$) выполненными в едином технологическом процессе. Деление тока происходит путем эмиттерного масштабирования при коммутации необходимого числа транзисторов в соответствии с входным цифровым кодом. Оставшиеся 5 разрядов обеспечиваются 32 резисторами (2^n где $n=5$).

Фирменный блок DEM отсутствует – это основное упрощение относительно TDA1541. Как следствие, физическое разрешение снизилось до 12-13 бит. Некоторые конструкторы соединяют параллельно несколько пар микросхем (нормализация распределения отклонений характеристики преобразования n-го количества элементов), чтобы улучшить итоговую линейность всего устройства, но у такого схемного решения тоже есть определенные недостатки и на мой взгляд весомого смысла не имеет. Если и хочется усложнить конструкцию, то приоритетным, на мой взгляд, являются аналоговый блок и источник питания. Основное преимущество TDA1543 для начинающего ЦАПостроителя заключается именно в простоте применения.

Аналоговый блок – это то место, где, собственно, «рождается» звук. Применяемое схемное построение, элементная база, качество питания, электромагнитная защищенность, все это приходится учитывать при проектировании этого узла. Назначение этого функционального блока – преобразование тока в напряжение (если ЦАП с токовым выходом), приведение его к стандартному уровню (2В RMS), фильтрация- восстановление исходного аналогового сигнала.

Поскольку TDA1543 обладает токовым выходом, необходим каскад преобразования тока в напряжение. Данный узел может быть выполнен пассивным, на резисторе, или на активных элементах (ОУ, транзисторы). Принцип пассивного метода заключается в падении напряжения на резисторе при прохождении через него тока $U=I \times R$ (закон Ома). Увы, за простотой такого способа преобразования скрывается серьезный недостаток. Любой ЦАП с токовым выходом проектируется и калибруется при работе на нулевое входное сопротивление. При нагрузке же токового выхода на большое сопротивление (чем особенно грешат китайские аудио-инженеры и просто ленивые конструкторы ☺) появится переменное напряжение значительной амплитуды, которое будучи приложенное к токовым ключам ЦАП, вызовет нарушение передаточной характеристики, т. е. приведет к росту искажений. Если рассматривать TDA1543, в даташите нормируется максимальная величина этого напряжения ($V_{OC(AC)}=50\text{ мВ}$), при котором передаточная характеристика соответствует заявленной линейности. Это означает, что если использовать в качестве преобразования резистор малого сопротивления, при котором еще не нарушается линейность (в нашем случае $R=U/I_{вых}=0,05/0,0023=21\text{ Ом}$, где $I_{вых}=2,3\text{ мА}$ -максимальный размах выходного тока, соответствующей полной шкале преобразования), то неизбежным становится дальнейшее усиление. Требования по линейности, шумовым параметрам, качеству питания, предъявляемые к последующему усилителю напряжения становятся весьма высокими, что непременно вызовет усложнение и/или удорожание этого узла.

Использование активного метода преобразования тока в напряжение посредством токового приемника на основе интегрального операционного усилителя (ОУ) свободно от вышеописанных недостатков (входное сопротивление такого преобразователя практически нулевое), но несет в себе некоторые особенности. ОУ представляет собой замкнутую саморегулируемую (посредством глубокой общей отрицательной обратной связи (ООС)), систему. Минимально кратковременные изменения сигнала должны

обрабатываться этой системой с высокой скоростью и точностью, т. е. налагаются определенные требования на полосу рабочих частот, скорость и устойчивость ОУ как линейного безинерционного устройства. Выходной сигнал ЦАП представляет собой смесь звуковых (собственно полезный сигнал) и огромное количество комбинированных внеполосных составляющих весьма высокой частоты (продукты дискретизации, глитч-помехи, ВЧ-шумы), что для ОУ является серьезным испытанием и вынуждает применять специфические быстродействующие широкополосные приборы с высокой перегрузочной способностью входа, которые к тому же должны обладать высоким субъективным качеством звучания. Разводка печатной платы под такие высокоскоростные ОУ (AD744, AD8066, OPA827, LME49880 и т. д.) требует определенного опыта и наличия контрольно-измерительной аппаратуры для контроля устойчивости. Да и цена и доступность подобных микросхем может вызвать некоторые сложности, особенно любителям «глубинки». Но вопреки этим незначительным недостаткам, преобразователи ток-напряжение на основе ОУ пользуются массовой популярностью, демонстрируют превосходные, для качественных грамотных реализаций, объективно измеряемые (уровень искажений ниже -110...-120 дБ) параметры и звучание.

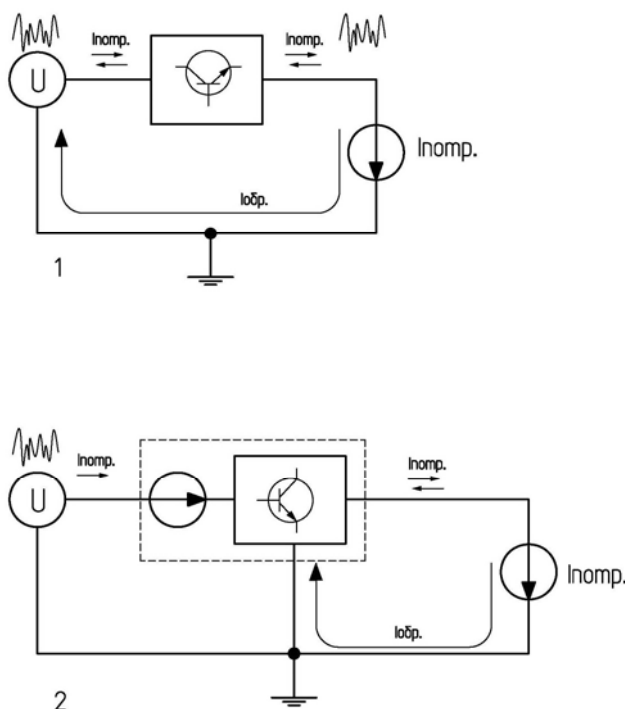
Несколько особняком стоят так называемые безосные дискретные преобразователи ток-напряжение. Как правило схемное их построение – это разновидность токового конвейера, или более упрощенная реализация – включение с общей базой (ОБ), общим затвором (ОЗ) или общей сеткой (ОС), для биполярного, полевого транзистора и электровакуумного триода, соответственно. Особенность такого включения – низкое входное сопротивление, превосходные динамические параметры, а так же отсутствие общей ООС, а значит и связанные с ней специфические искажения. Общая линейность такого преобразователя определяется линейностью активного элемента(ов) и конечно уступает схемам с ООС, но есть некоторые особенности, обусловленные чувствительностью человеческой системы «ухо-мозг» воспринимать искажения. Такие однотактные преобразователи вносят преимущественно гармонические искажения низких порядков, к которым человеческое ухо наименее чувствительно. Следует отметить, что у подобных схемных дизайнов есть немало поклонников, которые весьма скептически настроены на применение глубоководных схем и ОУ вообще, например известный на просторах рунета аудио-инженер Игорь Семинин (Semigor). Для простого ЦАП на TDA1543 такая схемная реализация очень удачно подходит: проста, не требует редких дорогостоящих активных компонентов, к тому же позволяет легко экспериментировать с разными транзисторами.

Как было указано ранее, еще одним функциональным назначением аналогового блока является фильтрация выходного сигнала от внеполосных составляющих и приведение (восстановление) его к изначальному виду. На выходе преобразователя ток-напряжение аналоговый сигнал имеет дискретно-ступенчатую форму, такова особенность импульсно-кодовой модуляции принятой в стандарте CD/DA. Не углубляясь в теорию отмечу, что приведение сигнала в соответствие с теоремой Котельникова-Шенонна к исходной плавной форме требует применение аналогового фильтра очень высокого порядка с бесконечным подавлением на половинной частоте дискретизации, который физически не реализуем. Для устранения этого принципиального недостатка, как было указано ранее, и используются цифровые фильтры-интерполяторы, позволяющие увеличить количество дискретных отсчетов, сместить продукты дискретизации выше по диапазону и отфильтровать их простым аналоговым фильтром 2-го или 3-го порядка, тем самым максимально восстановить сигнал. Для NOS-ЦАП в теории все выглядит совсем печально, но хорошая новость состоит в том, что человеческая система «ухо-мозг» является уникальным адаптивным фильтром, способным проинтегрировать даже «жуткий» ступенчатый сигнал на выходе таких устройств. Учитывая такие субъективные особенности человеческого восприятия, смысла в значительном усложнении нет и достаточно использовать аналоговые фильтры 3-го, 2-го и даже 1-го порядка с частотами среза 30-90 кГц. Но поскольку выход NOS-ЦАП изобилует высокочастотными составляющими, подключение их к традиционным широкополосным многокаскадным транзисторным усилителям мощности приведет к повышенному значению интермодуляционных продуктов на выходе, а в некоторых особо опасных случаях, даже может вызвать повреждение твитера акустической системы.

Выход аналогового блока должен обладать низким выходным сопротивлением и корректно работать на низкоомную сложную нагрузку, например наушники. Это обеспечит весьма удобную универсальность ЦАП, с возможностью непосредственного прослушивания на головные телефоны, а так же нивелирует особенности звучания в зависимости от конструкции и качества межблочных соединительных кабелей.

После описания всех основных функциональных блоков ЦАП остается открытым вопрос питания. Мой опыт мне указывает на весьма значительное влияние используемой схемотехники и элементной базы для построения питающих цепей на итоговое звучание всего устройства. Пресловутая «жесткость», «мыльность» и т. д. все эти не лестные отзывы в звучании устройства могут быть обусловлены неправильной, безграмотной организацией питающих цепей. В бюджетных промышленных ЦАП питание проектируется по остаточному принципу, а в внутренних звуковых картах, позиционируемых даже как аудиофильские (например популярная Asus Xonar Essence ST) вообще балансирует на грани инженерного идиотизма. И если в цифровом блоке возможно применение недорогих интегральных стабилизаторов, то аналоговый блок и микросхема-ЦАП налагают определенные требования на качество и чистоту выходного напряжения и особенности стабилизаторов: их переходная характеристика и устойчивость, линейность, шумовые параметры, низкий и стабильный импеданс в широкой полосе частот. Собственно, под качественным питанием подразумевается в том числе и борьба с высокочастотными помехами проникающих через сеть и первичные питатели, так и минимизация влияния помех излучаемых цифровым блоком. Для устранения помех и снижения взаимного влияния узлов друг на друга применяются различные активные схемотехнические методы и пассивные способы: отдельные стабилизаторы, локальные LC и RC развязки, многообмоточные трансформаторы и отдельные трансформаторы. Особое внимание необходимо уделять топологии печатной платы: экранировке чувствительных аналоговых узлов, оптимальной трассировке питающих и сигнальных проводников, грамотной организации слоя «земли».

Отдельно хочется отметить особенности работы стабилизаторов напряжения для аналоговых узлов. Каждый стабилизатор имеет в своем составе источник опорного напряжения, усилитель рассогласования и регулирующий элемент (транзистор). В зависимости от включения регулирующего элемента относительно нагрузки существуют последовательные и параллельные стабилизаторы.



В последовательном (1)-потребляемый ток протекает по длинной цепи, затрагивая выпрямитель, что вызывает корреляцию тока нагрузки переключательными помехами диодов выпрямительного моста и помехами проникающими с первичной обмотки трансформатора. В параллельном (2) стабилизаторе существует постоянство потребления

тока от первичных узлов питания, а локальный ток нагрузки течет в малом контуре, замыкающимся на регулирующем транзисторе, тем самым исключая мультипликативные (наведенные) помехи. Субъективно аналоговые каскады, питаемые от стабилизаторов параллельного типа, звучат естественнее, чище и мягче. Недостатки – низкий КПД, нагрев, применение теплоотводов в конструкции, динамические ограничения потребляемого тока. Но эти недостатки, на мой взгляд, не столь существенны относительно субъективных преимуществ параллельных стабилизаторов именно для питания ответственных маломощных аналоговых узлов.

Следует отметить, что устройства со смешанными сигналами, к которым относятся ЦАП, налагают определенные требования на тип и особенности проектирования печатной платы. Для сложных высокоскоростных устройств, содержащих определенное количество цифровых микросхем, излучающих широкий спектр помех и находящиеся в непосредственной близости с чувствительными аналоговыми узлами весьма рекомендуются двух и более слойные печатные платы. Для двухслойных плат один слой полностью выделяется под «землю», обеспечивая таким образом низкий импеданс для высокочастотных возвратных токов в цифровой части и низкий импеданс и экранировку в аналоговой части, а во втором слое разводятся сигнальные и питающие линии. Слой «земли» на плате делится на цифровой и аналоговый, соединяясь возле микросхемы-преобразователя, находящейся на аналоговой стороне. В особо ответственных местах «земляной» слой выполняется секторальным, обеспечивая минимальное влияние возвратных токов разных узлов схемы друг на друга. В цифровой части настоятельно рекомендуется применять электронные компоненты предназначенные для поверхностного монтажа, обладающие минимальной индуктивностью выводов.

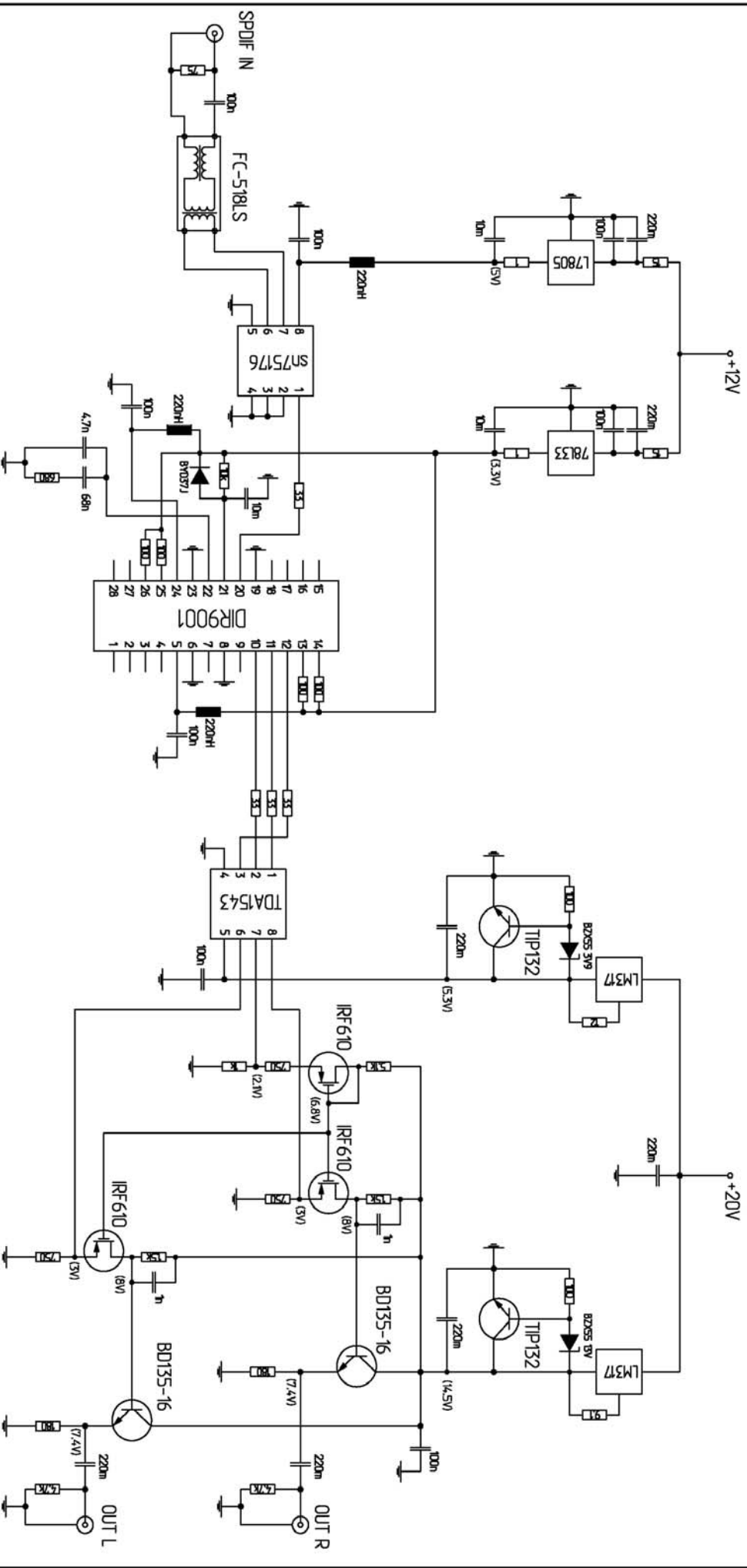
Односторонние печатные платы на данный момент времени являются архаизмом, но все же могут применяться для простых неответственных устройств, содержащих малое количество низкоскоростных цифровых микросхем. К тому же сложность изготовления такой платы не высока и позволяет ее выполнить даже в домашних условиях. При проектировании данного простого ЦАП было принято решение использовать одностороннюю плату.

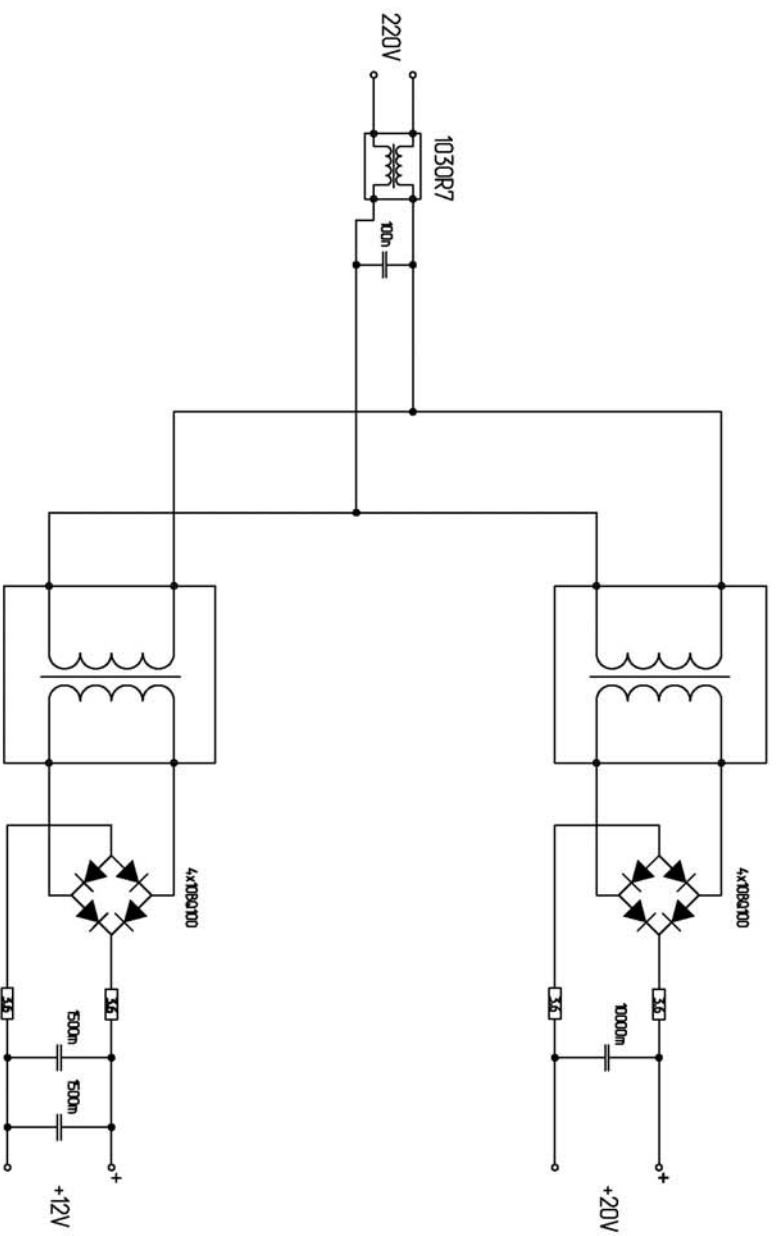
С учетом всех вышеописанных принципов был спроектирован и изготовлен ЦАП на основе микросхемы-преобразователя TDA1543. Выполнен по NOS-архитектуре, имеет коаксиальный S/PDIF вход и поддерживает формат до 24/96 включительно. Допускает прямое подключение наушников сопротивлением 40-100 Ом.

Вход устройства имеет трансформаторную гальваническую развязку от источника. Применяемый высокочастотный трансформатор кроме, собственно, развязки, обеспечивает подавление синфазных помех наведенных на S/PDIF кабель. При повторении конструкции настоятельно рекомендуется применять трансформаторы именно такого типа. В качестве цифрового приемника используется DIR9001, вход которой принимает сигналы TTL уровня (выше 2,4В). Поскольку стандартный S/PDIF интерфейс имеет более низкое значение (около 0,5 в), возникает необходимость использования дополнительного формирователя уровня, в данном случае реализованного на дифференциальном драйвере – sn75176. Небольшие резисторы (33 Ом), включенные в линию передачи цифровых сигналов повышают стабильность работы.

Преобразователь ток-напряжение выполнен на полевом транзисторе IRF610, включенным по схеме с общим затвором. Выбор транзистора такого типа обусловлен относительно линейной передаточной характеристикой и высокой перегрузочной способностью. Идентичный транзистор (IRF610), включенный как диод, задействован в цепи создания начального напряжения смещения и необходим для термостабилизации всего узла. Конденсатор 1000 пФ включенный параллельно резистору 1,5 кОм, преобразователя ток-напряжение, образует фильтр нижних частот первого порядка с частотой среза около 100 кГц.

В качестве выходного буфера применяется транзистор средней мощности (BD135) с достаточно большим (40 ма) током покоя, включенный эмиттерным повторителем, обеспечивая низкое выходное сопротивление и необходимые токовые возможности при работе на любую нагрузку. Каскад работает в линейном режиме (класс А) и вносит минимальные искажения преимущественно низких порядков.



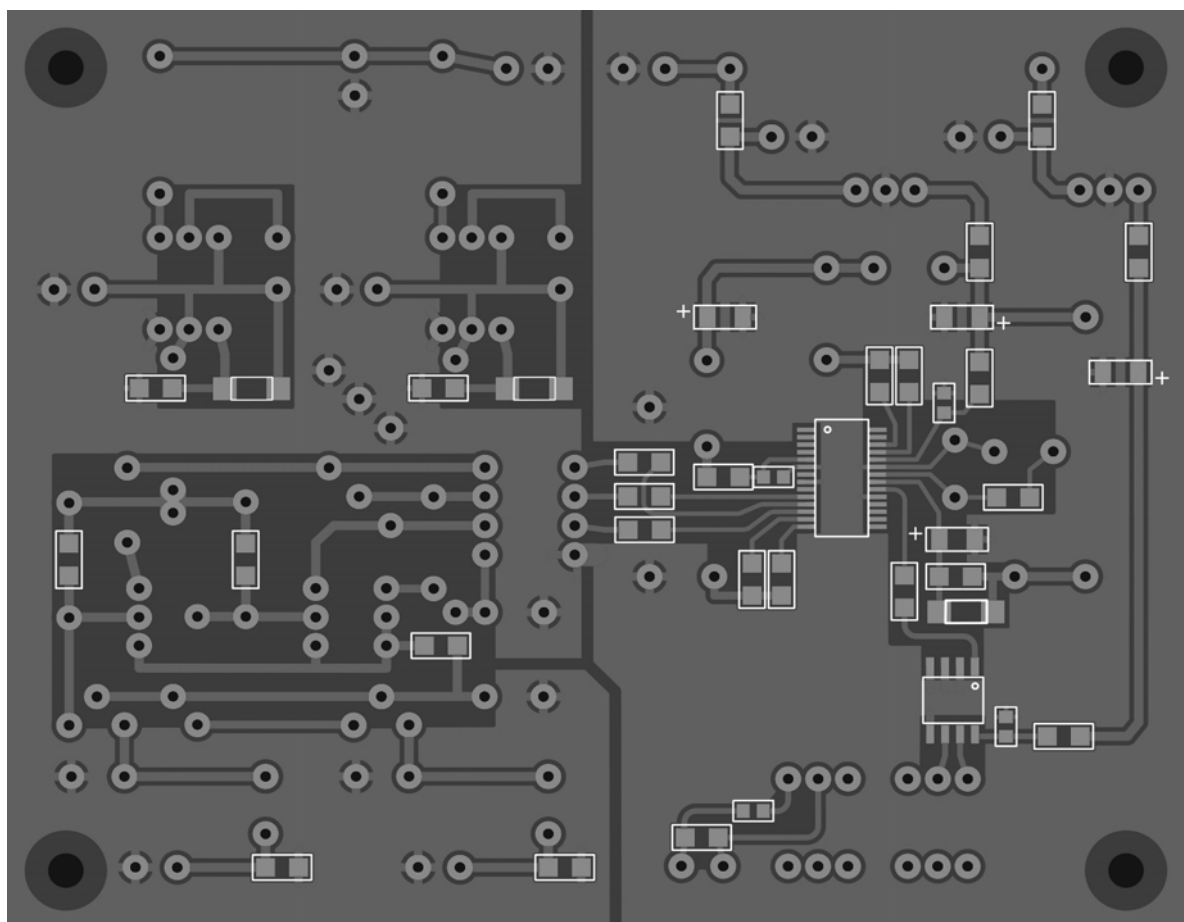


Питание в данном ЦАП организовано по принципу «каждому потребителю свое». Используются отдельные трансформаторы для питания цифровой и аналоговой части и отдельные стабилизаторы на каждый питаемый узел. В первичной цепи трансформаторов применяется простейший LC-фильтр для подавления помех сети. Для снижения собственных помех переключения выпрямителя применяются диоды Шоттки и небольшие резисторы-ограничители тока заряда емкостей. В цифровой части на входе перед стабилизаторами присутствует RC-фильтры с большой постоянной времени, а в непосредственной близости у ног питания цифровых микросхем локальные LC-фильтры, состоящие из ферритовой «бусины» индуктивностью 220 нГн и конденсатора емкостью 100 нФ. Данные схемотехнические методы позволили значительно снизить уровень помех генерируемых цифровой частью и исключить их влияние на аналоговый тракт.

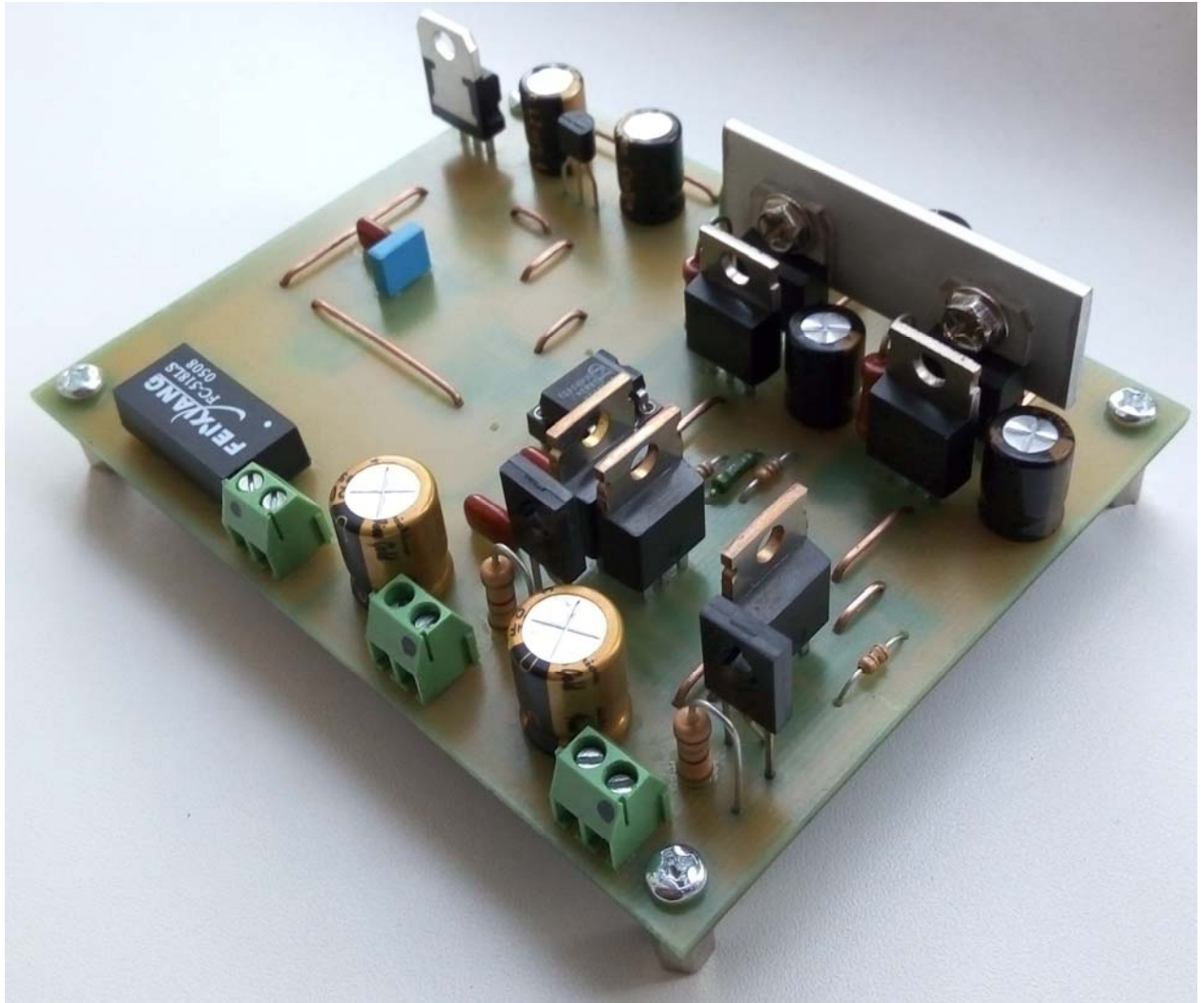
В цифровом блоке применены недорогие трехвыводные интегральные стабилизаторы (L7805, 78L33). Для обеспечения устойчивой работы их выходы отвязаны от низкоимпедансных блокирующих емкостей (10 мкФ) небольшими сопротивлениями (1 Ом).

Стабилизатор микросхемы-ЦАП и аналоговой части дискретный, параллельного типа. Состоит из источника стабильного тока (ИТ), выполненного на LM317, источника опорного напряжения, реализованного на стабилитроне BZX55C, а в качестве усилителя рассогласования и регулирующего элемента использован составной транзистор-Дарлингтона (TIP132) с большим значением коэффициента усиления по току, обеспечивая таким образом малое выходное сопротивление и высокий коэффициент стабилизации всего стабилизатора. Суммарный потребляемый ток стабилизаторами микросхемы-ЦАП и аналогового блока от первичного питателя постоянен и составляет 240 мА. Для корректной работы стабилизатора аналоговой части, входное нестабилизированное напряжение должно быть не ниже +20В, а фильтрующая емкость выпрямителя 10000-30000 мкФ.

Конструктивно ЦАП состоит из 2 модулей. Модуль первичных питателей, включающий входной фильтр, трансформаторы, выпрямительные мосты и фильтрующие конденсаторы, выполнен на односторонней печатной плате размером 100x160 мм. Непосредственно модуль ЦАП выполнен на односторонней печатной плате размером 100x80 мм. Вид со стороны SMD компонентов.



Топология слоя «земли» оптимизирована для наименьшего влияния возвратных токов разных узлов схемы, а для минимизации ее «изрезанности», нарушающую общность низкого импеданса, неответственные линии выполнены медными проводниками, на стороне компонентов. В цифровой части повороты токонесущих дорожек выполнены под 45 градусов, а особо ответственные высокочастотные сигнальные линии – плавные, без резких изгибов. Большинство компонентов цифровой части SMD типа, расположены в непосредственной близости к цифровым микросхемам. Внешний вид смонтированного модуля ЦАП приведен ниже.



Элементная база была выбрана по принципу «разумной минимальной достаточности». В цифровом блоке применены преимущественно компоненты предназначенные для поверхностного монтажа (SMD): керметные резисторы типоразмера 1206, керамические многослойные (X7R) конденсаторы типоразмера 0603 фирмы Hitano; конденсаторы блокировки после стабилизаторов – танталовые, типоразмера A, Samsung. Конденсаторы в цепи фильтрации ФАПЧ DIR9001 – малогабаритные полипропиленовые выводные Hitano. Индуктивности-«бусины» типоразмера 1206. Резисторы преобразователя ток-напряжения (1,5кОм) требуют особого выбора, т. к. от них зависит звуковой почерк всего устройства. Весьма желательно использовать металлопленочные или фольговые резисторы именитых фирм (Vishay, Caddock, Dale), но их высокая стоимость и доступность вызывает определенные сложности. Как компромиссный вариант были применены выводные угольно-пленочные резисторы фирмы Hitano. Тип фильтрующих конденсаторов преобразователя так же весьма критичен и влияет на итоговое субъективное звучание. Были применены керамические однослойные (NPO) SMD конденсаторы, но возможно использование качественных полипропиленовых или полистирольных емкостей. Конденсаторы на входе перед стабилизаторами – электролитические низкоимпедансные CapXon LZ (рабочее напряжение 25 В). Блокирующие конденсаторы после аналоговых стабилизаторов – электролитические

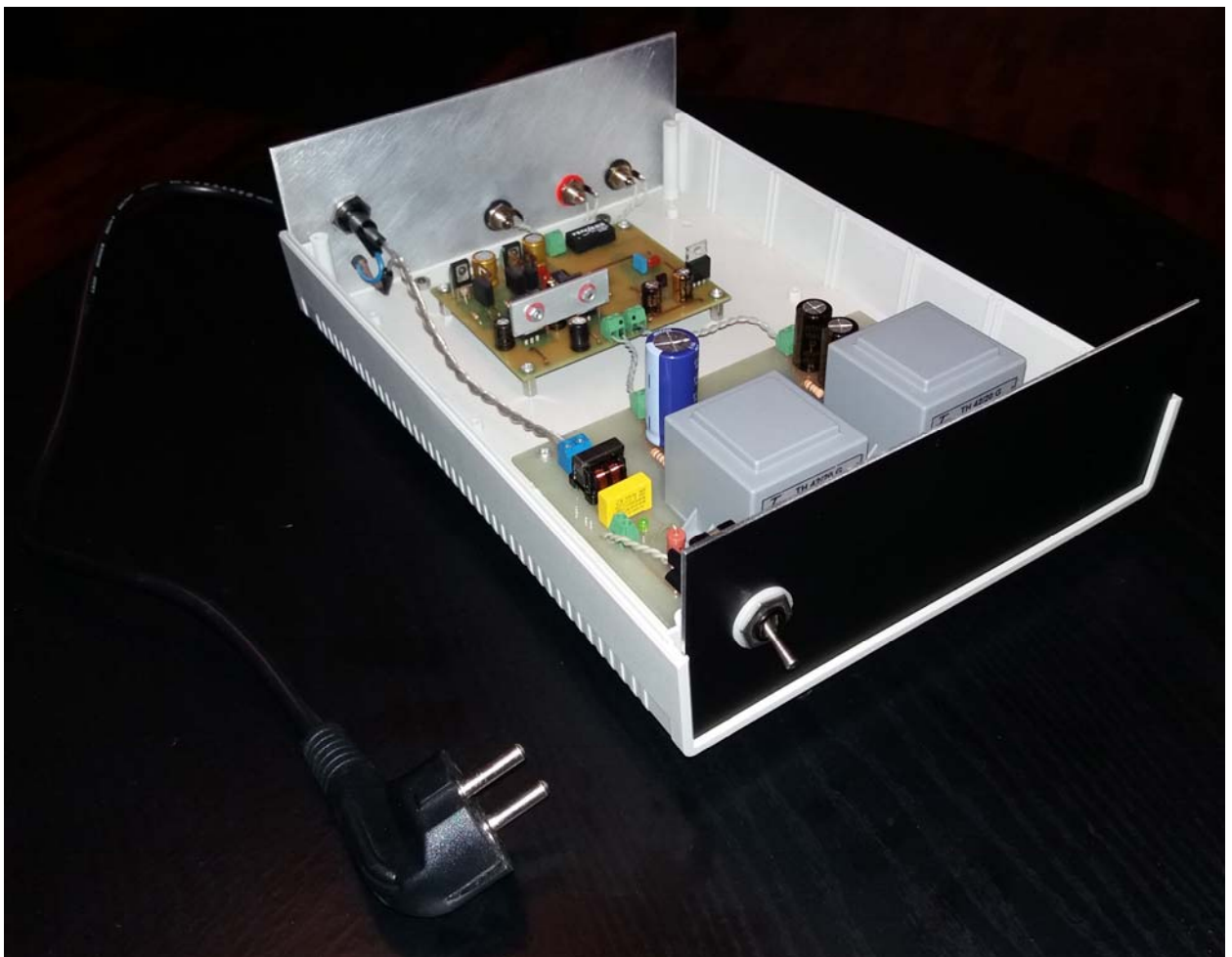
низкоимпедансные Hitano EXR (25 В), а в непосредственной близости возле TDA1543 и выходных транзисторов – пленочные полипропиленовые. Конденсаторы на выходе буфера Nichicon Fine Gold (16 В), но возможно применение других качественных емкостей: Elna Silmic, Elna Cerafine, Nichicon Muse и т. п. Фильтрующие конденсаторы первичного питателя цифровой части Hitano EXR, аналоговой – Samwha SD. Эмиттерные резисторы выходных транзисторов угольно-пленочные, мощностью 1 Вт, Hitano. Резисторы ИТ стабилизатора – МЛТ-1. Входной импульсный трансформатор FC-518LS был демонтирован с сетевой карты. Синфазный дроссель подавления сетевых помех 1030R7 фирмы Murata. Конденсатор помехоподавляющий X2 МКР Hitano. Трансформаторы питающие – герметичные, для монтажа на печатную плату, мощностью 7,5 ВА, фирмы «ТорТранс». Напряжения вторичных обмоток 9В для цифровой и 15В для аналоговой части. Микросхема-ЦАП установлена в панельку DIP-8 кантового типа. Для отвода тепла от источников тока стабилизаторов использован теплоотвод общей площадью около 15 см², представляющий собой алюминиевую пластину толщиной 2 мм и размером 45х15 мм.

Активные компоненты, используемые в устройстве, в основном представлены фирмами International Rectifier (выпрямительные диоды Шоттки 10BQ100, транзисторы IRF610, диод BYD37J) и ST Microelectronics (транзисторы BD135, TIP132, стабилизаторы L7805, 78L33, LM317). Формирователь уровня SN75176 и цифровой приемник DIR9001 от Texas Instruments.

Возможно применение и иных типов пассивных и активных компонентов, все зависит от возможностей конструктора и его личных пристрастий. Допускается отклонение номиналов электролитических конденсаторов в сторону увеличения. Конечно, использование ширпотребных компонентов низкого качества скажется на итоговом субъективном звучании, или даже на стабильности и работоспособности всего устройства. В частности, следует крайне осторожно относиться к замене конденсаторов фильтра ФАПЧ микросхемы-приемника DIR9001. В даташите приведена рекомендация – однослойная керамика (NP0) или качественные пленочные конденсаторы, их габариты должны быть минимальными, а диэлектрик качественным (не лавсан).

Правильно собранное устройство требует минимальной наладки. На принципиальной схеме в скобках указаны контрольные напряжения в данных точках. На первичном этапе, не подключая активные компоненты, рекомендуется проверить напряжения на входе и выходе стабилизаторов. В процессе наладки авторского экземпляра была обнаружена странная особенность интегрального стабилизатора L7805, его выходное напряжение не соответствовало технической характеристике и имело “плавающий” характер. Замена на другой экземпляр, купленный у другого поставщика, полностью решило проблему. Параллельные стабилизаторы не желательно эксплуатировать в ненагруженном режиме, поэтому в процессе наладки их необходимо нагрузить резисторами: для микросхемы-ЦАП – 100 Ом, для аналоговой части – 150 Ом. Только после контроля выходных напряжений стабилизаторов возможен полноценный запуск всего устройства и проверка напряжений в остальных ключевых точках. В виду технологического разброса источника опорного напряжения (V_{ref}) микросхемы TDA1543, возможно придется скорректировать начальный выходной ток, соответствующий середине шкалы преобразования и соответственно напряжение на эмиттерах выходных транзисторов. Выходной ток устанавливается подбором резистора, соединяющую 7 ножку микросхемы с “землей” в установившемся тепловом режиме (при прогреве 5-10 мин). При указанном на схеме номинале (1к) он равен 4,2 ма, а напряжение на выходе приблизительно равно $U_{пит}/2$.

ЦАП смонтирован в корпусе из белого твердого пластика с металлическими стенками-панелями, окрашенными снаружи в матовый черный цвет. На фронтальной панели находится тумблер питания, а на тыловой RCA разъемы цифрового входа, аналоговых выходов и гнездо плавкого сетевой предохранителя. Модуль первичных питателей размещен на максимальном удалении от модуля ЦАП и соединяется с питающими клеммами последнего посредством свитых проводников. Ввод цифрового сигнала с RCA разъема на клемму платы ЦАП выполнен коротким участком витой пары. Внешний вид собранного устройства со снятой верхней крышкой приведен ниже.



Субъективная оценка звучания ЦАП проводилась на следующей системе. В качестве цифрового источника выступил компьютер на ОС Windows 7 (64 bit), а вывод S/PDIF потока осуществлялся посредством звуковой карты Creative Audigy 4. S/PDIF кабель – экранированная витая пара длиной около метра. Программный плеер – Album Player версии 2.108 с пресетом full memory, модуль вывода – kernel streaming. В процессе прослушивания для CDDA записей задействовался программный ресемплер SoX, встроенный в модуль DSP данного плеера. Отмечу, что отдал предпочтение именно режиму с цифровой фильтрацией и передискретизацией до 96кГц. Hi-Res записи (24/96) прослушивались в NOS режиме, с принудительной установкой разрядности выводимого потока 16 bit в настройках плеера. К ЦАП поочередно подключались наушники: Audio-Technica ATH-M30, Sony MDR-MA500, AKG K301 XTRA.

Вопреки самым скептическим опасениям, качество звука порадовало с первых минут прослушивания. Общий характер подачи музыкального материала выделяется плотностью и насыщенностью среднечастотного диапазона, на качественных записях прослушивание весьма эмоционально увлекательно и приятно. Разрешение данного простого ЦАП находится на среднем уровне, но позволяет с легкостью замечать технические огрехи в записях. Построение виртуальной сцены отличается уверенной проработкой в глубину. Устройство нельзя назвать нейтральным, оно тяготеет к некоторому выделению среднечастотного диапазона. Особенно эффектно воспроизводится вокал и инструменты данной частотной области, кстати, наиболее чувствительной и информационно важной для человеческого восприятия. Из недостатков можно отметить несколько «валяжную» подачу музыкального материала, что негативно сказывается при воспроизведении быстрых, динамичных жанров.

В процессе проработки вариантов и экспериментальной оценки влияния питания, модуль первичных питателей менялся на более простой: отсутствие входного синфазного дросселя и токоограничивающих резисторов после диодного моста, единственный трансформатор с двумя вторичными обмотками. Надо отметить, что подобное построение питающих узлов имеет большинство бюджетных промышленных аппаратов. При контрольном прослушивании была выявлена явная деградация качества звучания, субъективно выражающаяся прежде всего в уменьшении эшелонированности сцены и

общей «замыленности» звукового полотна. Остается только догадываться о том, какой звук могут выдавать китайские подделки на TDA1543, независимо от количества установленных в них микросхем-преобразователей: 8, 16 ... 256. Низкий инженерный уровень построения подобных устройств, вкупе с посредственной элементной базой и ужасным питанием (применение низкокачественных ширпотребных импульсных блоков питания) просто не даст реализовать потенциал даже такого примитивного преобразователя как TDA1543.

В заключение хотелось бы сказать, что к проектированию и изготовлению своего первого в жизни цифроаналогового преобразователя необходимо отнестись со всей серьезностью и ответственностью. Это тот класс устройств, где мысли: «а спаяю я простенький ЦАПик на выходных на макетке» необходимо отбрасывать, поскольку простота обманчива. Но первый грамотно спроектированный удачный аппарат, который будет радовать своим звучанием, непременно мотивирует следовать далее по этому увлекательному пути в мире цифрового звука.

Николай Штаюра
Краматорск, 2016 г.