

## ЦАП начального уровня. 2003г

Сделать хороший DAC просто.

Особенно если делаешь это первый раз...

Завеса загадочности и ореол недоступности, окружающие область звукотехники, именуемую термином "цифровое аудио", остаются практически незабываемыми с момента появления этого самого термина и по сей день. Проигрыватели компакт-дисков, уже давно и прочно вошедшие в нашу жизнь, для подавляющего большинства потребителей являются загадочным "черным ящиком", знакомство с устройством которого в большинстве случаев ограничено подглядыванием внутрь сквозь прорези вентиляции в корпусе. Непреодолимое любопытство порой заставляет снять крышку корпуса аппарата. Глаза разбегаются от обилия незнакомых микросхем и хитросплетения проводников между ними, плотный монтаж и отсутствие документации не оставляют никаких следов от былой мысли что-либо попробовать изменить своими руками. Благоговейный трепет перед разработчиками удивительного аппарата, заполняющий душу в момент установки крышки на место, порой сменяется чувством неудовлетворенности и обиды на свои умелые руки, которые холодный расчетливый разум допустил только к операции отвинчивания-завинчивания винтов.

Если звучание имеющегося проигрывателя CD Вас уже не устраивает, а руки у Вас действительно умелые и Вы просто не знаете с чего начать – предлагаем описание относительно несложного внешнего блока цифро-аналогового преобразователя (в дальнейшем согласно устоявшейся терминологии DAC), способного вдохнуть новую жизнь в любой старенький проигрыватель CD, имеющий электрический цифровой выход. Если Ваш проигрыватель такого выхода не имеет, то, скорее всего, Вам несложно будет организовать его самостоятельно. Для этого в большинстве случаев достаточно установить на корпусе проигрывателя разъем и подпаять его к соответствующей микросхеме, воспользовавшись при этом рекомендациями Вашего знакомого специалиста, разбирающегося в этом вопросе.

Описанные конструкции не претендуют на какое-либо место в сложной иерархии аналогичных устройств, представленных сегодня на аудио рынке, и служат исключительно для демонстрации принципов построения внешних блоков цифро-аналоговых преобразователей, используемых совместно с различными цифровыми носителями звука. В случае самостоятельного повторения описываемых устройств, при первом включении их в тракт звуковоспроизведения, регулятор громкости усилителя необходимо устанавливать в минимальное положение и плавно увеличивать громкость при отсутствии сильных паразитных помех и сигналов (смотри далее по тексту). Авторы не несут ответственность за возможные последствия, связанные с изготовлением и эксплуатацией описанных ниже конструкций. Будьте внимательны и аккуратны!

В настоящее время для формата CD и аналогичных ему применяются два совершенно различных способа цифро-аналогового преобразования: однобитовый и

мультибитовый. Не вдаваясь в подробности каждого из них, отметим, что в подавляющем большинстве дорогих моделей DAC используется мультибитовое преобразование. Однако однобитовые преобразователи также имеют немало поклонников, т.к. имеют своеобразный характер подачи звука, некоторые моменты которого трудно достижимы с помощью классической мультибитовой технологии. К ним можно отнести более высокую линейность однобитовых ЦАПов на малых уровнях сигнала. Сильным аргументом сторонников мультибитовых ЦАП является масштабность и открытость звука, который выдают "на гора" эти микросхемы. Для правильной реализации принципа работы однобитовых ЦАПов требуется очень высокая тактовая частота. Для формата CD 16 бит на 44,1 КГц она должна составлять около 2,9 ГГц, что является абсолютно неприемлемым значением с технической точки зрения. С помощью математических трюков (что не так уж редко имеет место в звукотехнике) ее удастся уменьшить до приемлемых значений в пределах нескольких десятков мегагерц. Видимо этим и объясняются некоторые особенности звучания этих ЦАПов. Так ли все это – нам предстоит самим убедиться, собрав и прослушав описываемые схемы.

Основным принципом построения описываемых DAC'ов является максимальная простота конструкции, позволяющая понять идею и реализовать ее в конкретном макете, который в дальнейшем может послужить местом реализации уже собственных идей по улучшению конструкции.

Начнем с описания однобитового DAC'а. Из большого разнообразия микросхем, которые могут подойти для нашего проекта, остановимся на продукции фирмы Crystal Semiconductor, хорошо зарекомендовавшей себя своими изделиями и, вероятно, наиболее доступной на нашем рынке. Так как мы решили собирать внешний DAC, без цифрового приемника нам не обойтись. В качестве него лучше всего подойдет классический приемник CS8412, желательно в корпусе DIP. К нему мы будем поочередно подключать наши микросхемы ЦАП: однобитовый и мультибитовый. Фирма Crystal сильна в производстве однобитовых ЦАПов, среди которых выберем также популярную микросхему CS4390 (стараясь найти корпус DIP). Добавляем еще несколько деталей, соединяем все это как надо и в итоге получаем следующую схему:

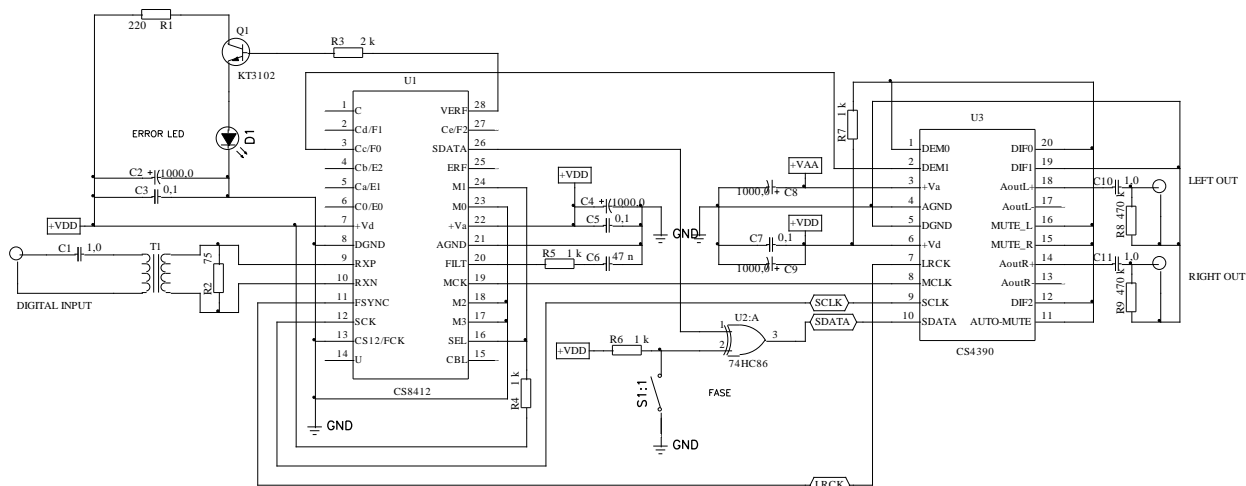


Рис. 1

Резисторы R1-R7 малогабаритные любого типа мощностью 0,125W. R8 и R9 лучше серии BC, УЛИ или импортные углеродистые. Электролитические конденсаторы C2, C4, C8, C9 должны быть номиналом не менее 1000 мкФ с рабочим напряжением 6,3-10V. Конденсаторы C1, C3, C5, C6, C7 – керамические. C10, C11 желательно применить K40-У9 или МБГЧ (бумага в масле), можно использовать конденсаторы серий K77, K71, K73 (перечислены в порядке уменьшения приоритета). Трансформатор Т1-для цифрового аудио, доступен в розничной продаже. На схеме не показано подключение питания микросхемы U2.

Для максимального использования звукового потенциала данной схемы желательно придерживаться следующих правил монтажа. Все соединения общего провода схемы (помечен значком GND) лучше произвести в одной точке, например, на выводе 7 микросхемы U2. Наибольшее внимание необходимо уделить входному узлу цифрового сигнала, включающий входное гнездо, элементы C1, T1, R2 и выводы 9,10 микросхемы U1. Необходимо использовать максимально короткие соединения и выводы компонентов. То же самое относится к узлу, состоящему из элементов R5,C6 и выводов 20, 21 микросхемы U1. Электролитические конденсаторы с соответствующими керамическими конденсаторами должны быть установлены в непосредственной близости от выводов питания микросхем и соединены с ними проводниками минимальной длины. На схеме не показаны еще один электролит и керамический конденсатор, которые подключаются непосредственно на выводы питания 7 и 14 микросхемы U2. Необходимо также соединить между собой выводы 1,2,4,5,7,9,10 микросхемы U2.

Огромная емкость примененных электролитических конденсаторов и их большое количество по сравнению с обычными рекомендациями для цифровых схем обусловлено тем, что цифровое аудио и проблемы, с ним связанные, имеют мало общего с классической цифровой техникой. В данной схеме каждый электролитический конденсатор обеспечивает формирование фронта с высокой крутизной цифрового сигнала соответствующих микросхем, который напрямую связан с величиной джиттера, пагубно влияющего на конечный аналоговый сигнал. Интенсивное использование керамических конденсаторов служит для очистки питания от цифровых помех и также выполнено в идеологии борьбы с джиттером. Качество конденсаторов, используемых для развязки по питанию в цифровой части подобных схем имеет очень большое влияние на звук всего устройства в целом. Для обеспечения малой длительности фронта цифрового сигнала необходимо применять конденсаторы большой емкости и с малым внутренним сопротивлением, обеспечивающим его скоростные свойства (например, танталовые). Подобные конденсаторы также обеспечивают хорошую фильтрацию по питанию. Но с другой стороны, совместно с паразитной индуктивностью монтажа такие конденсаторы образуют высокочастотный колебательный контур, который "заводится" от импульсной помехи на частоте резонанса и колебательный процесс в этом контуре формирует уже свои помехи по питанию, которые распределены по времени и по своей амплитуде могут превышать вызвавший этот процесс помеху. И это все очень хорошо слышно! Для уменьшения добротности такого паразитного контура необходимо применять конденсаторы с более высоким внутренним сопротивлением, что идет в противоречие с выше указанными требованиями. Как всегда в аудиотехнике оптимальное решение лежит

где-то по середине, но его всегда трудно найти. После приобретения некоторого опыта Вы сможете *на слух* подбирать величину и тип электролитических и керамических конденсаторов, стоящих по питанию в каждом участке конкретной схемы.

Несколько слов о работе самой схемы. Светодиод D1 служит для индикации захвата цифровым приемником U1 цифрового сигнала с транспорта и наличия или отсутствия ошибок считывания. В процессе нормального воспроизведения он не светится. Выключатель S1 является переключателем фазы сигнала, его действие аналогично переключению акустических систем на выходных клеммах усилителя. В ряде случаев это очень удобно. Используется встроенная в ЦАП обработка сигнала деемфазиса (вывод 2/U3).

Непосредственное подключение микросхемы ЦАП к выходным гнездам только через разделительные конденсаторы возможно вот по каким причинам. В микросхеме CS4390 имеется встроенный аналоговый фильтр и, что обычно не рекламируется, собственный буфер аналогового сигнала. Такой практики придерживаются в последнее время большинство производителей однобитовых ЦАПов. Это связано скорее всего с тем, что разработчики аудиотехники, использовавшие в своих изделиях ЦАПы первых поколений, имеющих на выходе чистый цифровой сигнал, умудрялись своими разработками искорежить их звучание до неузнаваемости, а все списывалось на звуковые особенности этих ЦАПов, т.е. на фирму производителя. Когда производителям это надоело, они стали встраивать различные компоненты аналогового звена в свои цифровые микросхемы, конечно не слишком усердствуя в вопросе их качества и даже не очень щедро делаясь информацией о том, что же они там все-таки намудрили. Обычно встроенный буфер выполнен на основе дешевого операционного усилителя ( а как Вы думали будет в микросхеме стоимостью 7\$ ?), причем производитель не дает возможность отключить или обойти аналоговую часть, остается только постараться максимально ее использовать. Именно к этой категории относится наша микросхема CS4390, аналоговую часть которой мы с Вами решили использовать на всю катушку. По аналогичному принципу построены микросхемы этой же фирмы CS4329 и CS4327. Хорошую аналоговую часть имел ЦАП CS4328. Если Вы хорошо разбираетесь в вопросах аналоговой фильтрации, стоит попробовать свои силы на великолепной микросхеме CS4303, которая на своем выходе имеет чистый цифровой сигнал и дает возможность построения отлично звучащего аппарата.

Но вернемся к нашей CS4390. Принцип построения однобитовых ЦАПов обуславливает наличие на внутренних цепях питания значительных по величине импульсных помех. Для уменьшения их влияния на выходной сигнал, выход однобитовых ЦАПов практически всегда делают по дифференциальной схеме. Нас же в данном случае не интересуют рекордные показатели по значению сигнал/шум, поэтому мы используем только один выход для каждого канала, что позволяет избежать применения дополнительных аналоговых каскадов и их влияния на звук. Амплитуда сигнала на выходных гнездах вполне достаточна для нормальной работы, а встроенный буфер неплохо справляется с такой нагрузкой как межблочный кабель.

Теперь поговорим о питании нашего устройства. Звук – это просто модулированный источник питания и ничего больше. Каково питание, таков и звук. Этому

вопросу постараемся также уделить внимание. Начальный вариант стабилизатора питания для нашего устройства показан на Рис.2

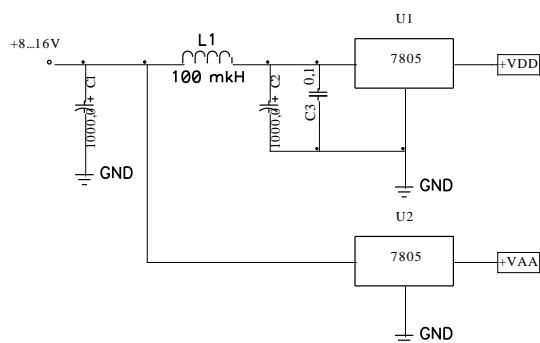
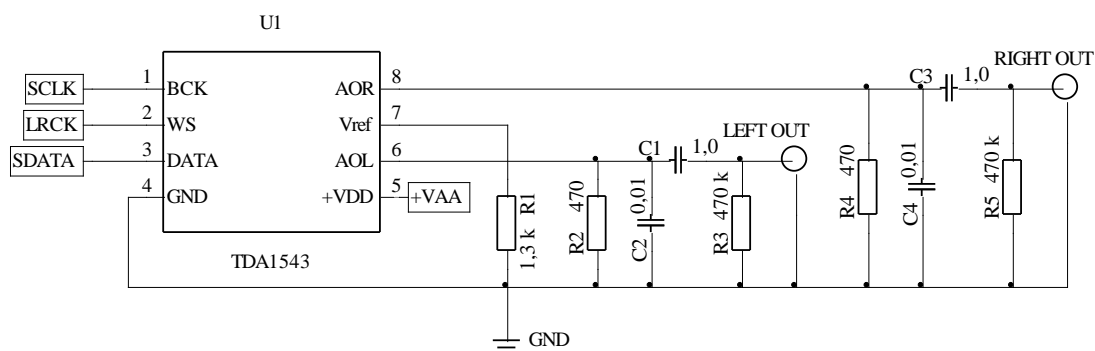


Рис. 2

Достоинства этой схемы в простоте, привычности и понятности. Используются разные стабилизаторы для цифровой и аналоговой частей схемы. Между собой стабилизаторы развязаны по питанию с помощью фильтра, состоящего из элементов C1, L1, C2, C3. Лучшие результаты дает применение вместо стабилизаторов 7805 стабилизаторов серии LM317 с соответствующими для нашего напряжения питания резисторами. LM317 по сравнению с 7805 имеют более широкий частотный диапазон (не забывайте, что по цепям питания у нас не только постоянный ток, но и широкополосный цифровой помехи), меньшие внутренние шумы и более спокойную реакцию на импульсную нагрузку.

По последнему пункту дело тут вот в чем. В установившемся режиме при появлении импульсной помехи (а у нас их по питанию видимо-невидимо!) схема стабилизации, содержащая в себе глубокую отрицательную обратную связь (для обеспечения хороших показателей стабилизации по постоянному току и малого выходного сопротивления) пытается ее скомпенсировать. Как положено для схем с обратным регулированием, тут возникает затухающий колебательный процесс, на который накладываются вновь пришедшие помехи и, в результате у нас по питанию все время творится невесть что. Отсюда следует, что в качестве стабилизаторов питания для цифровых схем желательно использовать схемы на дискретных элементах не содержащие обратных связей. Достаточно высокое выходное сопротивление таких схем, которое к тому же носит пассивный характер, перекладывает ответственность за борьбу с импульсными помехами на шунтирующие конденсаторы, которые неплохо с этой задачей справляются и это благотворно сказывается на звучании. Кроме того, явно вырисовывается необходимость применения для каждого вывода питания цифровых микросхем *своего отдельного* стабилизатора вместе с элементами развязки по питанию (L1, C2, C3 на Рис.2). В DAC'ах серии "MARKAN", разработчиком которой является один из авторов данной статьи, для каждого вывода питания микросхем используется отдельный стабилизатор, выпрямитель с дополнительной интенсивной фильтрацией цифровых помех, и отдельная обмотка сетевого трансформатора. Для питания цифровой и аналоговой частей схемы используются отдельные сетевые трансформаторы. Ну, а пока можно использовать схему на Рис.2. В выпрямителе лучше применять диоды Шоттки.

Перейдем к реализации мультибитового варианта нашего проекта. Обычно мультибитовые ЦАПы требуют для своей работы применения нескольких источников напряжения разной полярности и немалого количества дополнительных дискретных элементов. Среди большого разнообразия этих микросхем остановим свой выбор на TDA1543 производимой когда-то фирмой Philips. Этот ЦАП является "бюджетной" версией великолепной микросхемы TDA 1541, стоит копейки и доступен в розничной продаже у нас в стране. Он великолепно подходит для наших целей, т.к. для него необходим только один источник питания +5v и не требует применения дополнительных деталей. Отпаиваем CS4390 от цифрового приемника и на ее место подключаем TDA 1543 в соответствии со схемой на Рис.3



**Рис. 3**

Здесь необходимо дать несколько разъяснений. Все мультибитовые ЦАПы имеют выход в виде источника тока и для преобразования его сигнала в напряжение существуют несколько подходов. Наиболее распространенный заключается в использовании операционного усилителя (ОУ) подключенного инвертирующим входом к выходу ЦАПа. Преобразование ток-напряжение осуществляется этим ОУ на основе принципа работы обратной связи, охватывающей ОУ. По формулам все работает просто замечательно, такой подход считается классическим и его Вы можете встретить в техническом описании на любую микросхему мультибитового ЦАПа. Однако, когда дело касается качества получаемого звука, то тут все становится очень сложно и неоднозначно.

Существует еще один подход к решению этого вопроса: применение для преобразования ток-напряжение закона Ома. В этом случае к выходу ЦАПа можно подключить резистор, через который проходящий ток будет создавать падение напряжения, превращаясь в полноценный сигнал. Величина этого напряжения будет прямо пропорциональна величине резистора и току, через него протекающему. Несмотря на кажущуюся простоту и изящество этого метода, он пока не получил широкого применения у фирм- производителей аппаратуры, т.к. также имеет много подводных камней. Главный из них заключается в том, что токовый выход ЦАПов не рассчитан на наличие какого-либо напряжения на нем и практически всегда защищен внутри микросхемы диодами, включенных встречно-параллельно и вносящих искажения в

получаемый на резисторе сигнал. Среди известных производителей, которые все-таки решились на применение такого подхода, следует выделить фирму KONDO, которая в своем издании M-100DAC(HIBARI) применяет резистор, выполненный из серебряной проволоки. Очевидно, что такой резистор имеет очень маленькое сопротивление и амплитуда получаемого сигнала также очень мала. Фотографии внутренностей этого аппарата показывают, что для получения стандартной величины выходного сигнала используются несколько ламповых каскадов усиления.

Еще одной известной фирмой, использующей нетрадиционный подход к вопросу преобразования ток-напряжение, является Audio Note. В своих DAC'ах фирма использует для этих целей трансформатор, в котором ток, проходящий через первичную обмотку трансформатора, вызывает магнитный поток, приводящий к появлению на вторичной обмотке напряжения сигнала. Такой же принцип реализован в DAC'ах серии "Markan".

Но вернемся к TDA 1543. Похоже, что разработчики этой микросхемы по каким-то причинам не установили защитные диоды на выходе, о которых мы упоминали выше. Это открывает перспективу для использования резисторного преобразователя ток-напряжение. Резисторы R2 и R4 на Рис.3 служат именно этим целям. При указанной величине этих резисторов амплитуда выходного сигнала составляет около 1V, что вполне достаточно для непосредственного подключения к усилителю мощности. Следует отметить, что нагрузочная способность нашей схемы не очень велика и при наличии неблагоприятных условий (большая емкость межблочного кабеля, малое входное сопротивление усилителя мощности и др.) звучание устройства может быть слегка зажатым по динамике и "размазанным". В этом случае поможет использование выходного буфера, схему и конструкцию которого Вы можете выбрать или разработать сами. Может случиться, что в некоторых вариантах микросхемы TDA 1543 защитные диоды все-таки установлены (хотя таких сведений и нет), в этом случае мы можем снять с нее сигнал амплитудой не более 0,2 V и придется использовать выходной буфер с усилением. Для этого необходимо в 5 раз уменьшить номинал резисторов R2 и R4.

Конденсаторы C2 и C4 на Рис.3 образуют фильтр первого порядка, отфильтровывающий высокочастотные составляющие цифрового сигнала и выделяющий полезный аналоговый сигнал. По вопросу аналоговой фильтрации также ведутся жаркие споры. Классическим подходом считается использование цифрового фильтра, включаемого между цифровым приемником и ЦАПом. Применение цифрового фильтра призвано облегчить задачу разработчику блока аналоговой фильтрации, правда, при этом он отдает огромную долю ответственности за конечное звучание аппарата в руки именно разработчиков цифрового фильтра. В последнее время наметилась тенденция отказа от использования цифрового фильтра и направление усилий на создание высококачественного блока аналоговой фильтрации. Пионером в этом направлении следует признать опять-таки фирму Audio Note, которая, правда, засекретила свои разработки. Аналогичный подход реализован также в DAC'ах "Markan", в которых отсутствует цифровой фильтр и используется аналоговый фильтр третьего порядка с линейной фазовой характеристикой, выполненный на LC элементах.

В нашей схеме на Рис.3 также для простоты не используется цифровой фильтр и применен аналоговый фильтр первого порядка, которого в большинстве случаев вполне

достаточно, особенно если Вы используете ламповый усилитель мощности, да еще и без обратных связей. Если же у Вас усилитель мощности транзисторный, то вполне возможно, что придется нарастить порядок аналогового фильтра (не переусердствуйте, излишне высокий порядок фильтра обязательно скажется на звуке в худшую сторону). Для этого Вам надо будет обратиться к соответствующей литературе. Не забывайте выше упомянутые рекомендации для первого включения!

Резисторы R2,R4 и конденсаторы C2, C4 находятся именно в том месте, где зарождается аналоговый звук. От их качества (особенно от резисторов) в огромной степени будет зависеть качество звучания всего аппарата. Резисторы необходимо ставить углеродистые ВС, УЛИ (предварительно подобрав их по одинаковости сопротивлений с помощью омметра) или импортную экзотику. Конденсаторы могут быть любого типа из указанных выше. Все соединения должны быть минимальной длины.

**ЧТО МЫ МОЖЕМ УСЛЫШАТЬ.** Для однобитовых ЦАПов характерно очень мягкое, приятное звучание. Кажется, что весь свой звуковой потенциал они бросают на помощь солисту, оттесняя других участников музыкального произведения куда-то на задний план. Большие составы оркестров несколько "уменьшаются" по составу музыкантов, страдают мощь и масштабность их звучания. Мультибитовые ЦАП уделяют одинаковое внимание всем участникам музыкального действия, не отдаляя и не выделяя никого из них. Динамический диапазон шире, звучание более ровное, но в то же время более отстраненное.

Звуковой потенциал описанных схем достаточно высок и при творческом выполнении приведенных рекомендаций конечные результаты Вас не разочаруют. Надеемся, что наш материал хоть немного облегчит понимание принципов построения аналогичных устройств и даст толчок к самостоятельным исследованиям в этой области. Желаем Вам успехов, господа!!!

Андрей Маркитанов, инженер КБ звукотехники "Три В", г. Таганрог  
[himarkan@hotmail.com](mailto:himarkan@hotmail.com)

Игорь Гусев .....