

Без передискретизации и цифровой фильтрации. Нормальный ДАС построить можно и в России

Стремительно развивающиеся форматы цифровой записи звука сменяют один другого на протяжении последних 5-7 лет, но ни одному формату не удалось реально ослабить позиции старого "Compact Disc Digital Audio". Предложенный во второй половине семидесятых стандарт ИКМ-записи оказался настолько удачным (при всех своих недостатках, весьма, кстати, существенных), что лидирует на рынке цифровой записи и воспроизведении звука уже почти 25 лет. Срок невиданный для цифровых систем. Мало того, формат CDDA включает в себе еще целый ряд нераскрытых возможностей, не учитываемых в коммерческих вариантах аппаратуры. Задача истинного инженера-ценителя звука как раз и состоит в том, чтобы эти возможности обернулись реальным качеством. Попробуем проанализировать возможные направления работы по совершенствованию CD-систем воспроизведения звука.

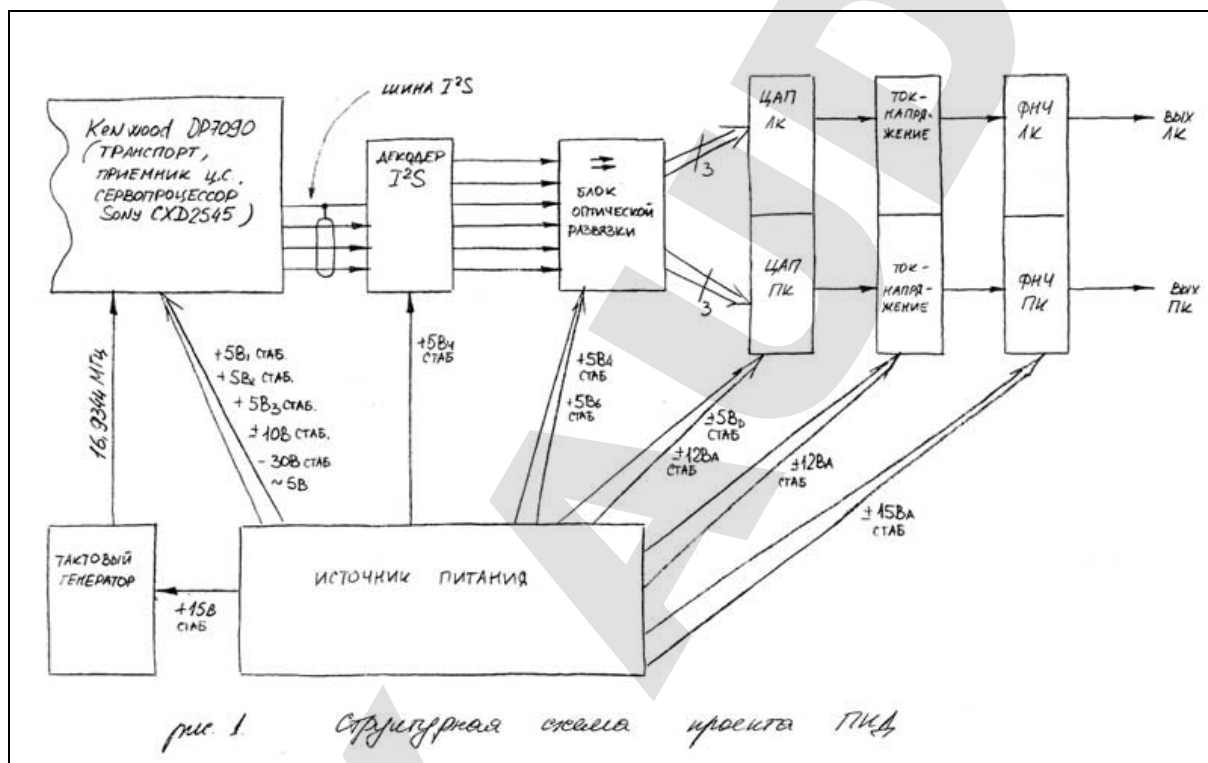
Начнем с начала, то есть с основных принципов, которые априорно должны стоять во главе угла при конструировании любой цифро-аналоговой аппаратуры:

1. Организация высококачественной синхронизации в цифровой части схемы.
2. Тактовые сигналы должны быть предельно стабильными - как на длительных интервалах времени, так и на коротких.
3. Дрожание фронтов тактовых импульсов, паразитная частотная модуляция синхросигнала наводками от сети, от двигателей и т.п. должны подавляться всеми возможными средствами.
4. Всемерное снижение наводок от цифровой части аппарата на аналоговую и снижение взаимных помех между различными цифровыми системами. Качественная передача информации в цифровой части схемы. Потеря любого количества информации невозможна, а следовательно и не допустима.
5. Высокоточное преобразование цифровых данных в аналоговый сигнал. Необходимо принимать меры по снижению дифференциальной нелинейности проходной характеристики ЦАП и по обеспечению монотонности шкалы преобразования. Последнее означает, что каждому значению входного кода ЦАП должно соответствовать только одно (!) значение выходного тока или напряжения, независимо от предыстории сигнала. Это очень существенный момент, ибо немонотонность шкалы приводит к нарушению статистических характеристик исходного сигнала, изменяя распределение энергетического и фазового спектров случайных и псевдослучайных сигналов.
6. Использование в аналоговой части высококачественных активных и пассивных элементов отнюдь не "компьютерного" класса. По возможности, следует избегать применения ОУ с внешней петлей ООС, за исключением тех случаев, где от операционного усилителя больше пользы, чем вреда. В остальных же ситуациях лучше всего применять специальные развязывающие буферы с единичным коэффициентом передачи и использующие только местные внутрикаскадные, практически безынерционные (с постоянной времени десятки пикосекунд) ОС.
7. Обеспечение "чистого питания" всех элементов схемы, отдельного для цифровых и аналоговых цепей. Можно вести речь о питании каждого каскада от индивидуального источника (в т. ч. отдельной обмотки или даже трансформатора).

Каким же образом можно реализовать вышеперечисленные принципы? Возможностей для этого, к сожалению, не очень много, кроме того реализация подобного проекта может оказаться весьма дорогостоящей. Тут каждый должен сделать для себя выбор - либо покупать промышленное барахло, где даже в очень дорогих аппаратах используют копеечные ширпотребовские детали, никак не согласующиеся с ценой изделия, либо потратить некую сумму на покупку хорошей комплектации и отдать пару-тройку недель на изготовление действительно хорошего CD проигрывателя практически из любой "вертушки CD".

Проведенные мною в последние годы теоретические и экспериментальные исследования позволили в общих чертах определить структуру высококачественного CD-проигрывателя и создать весьма удачную конструкцию, практически не требующую настройки. При разработке за основу были взяты представленные выше принципы построения цифро-аналоговых систем, а также опыт создания прецизионной метрологической аппаратуры.

Структурная схема аппарата, построенного на основе транспорта и цифровой части CD-проигрывателя "Kenwood DP7090" приведена на следующем рисунке:

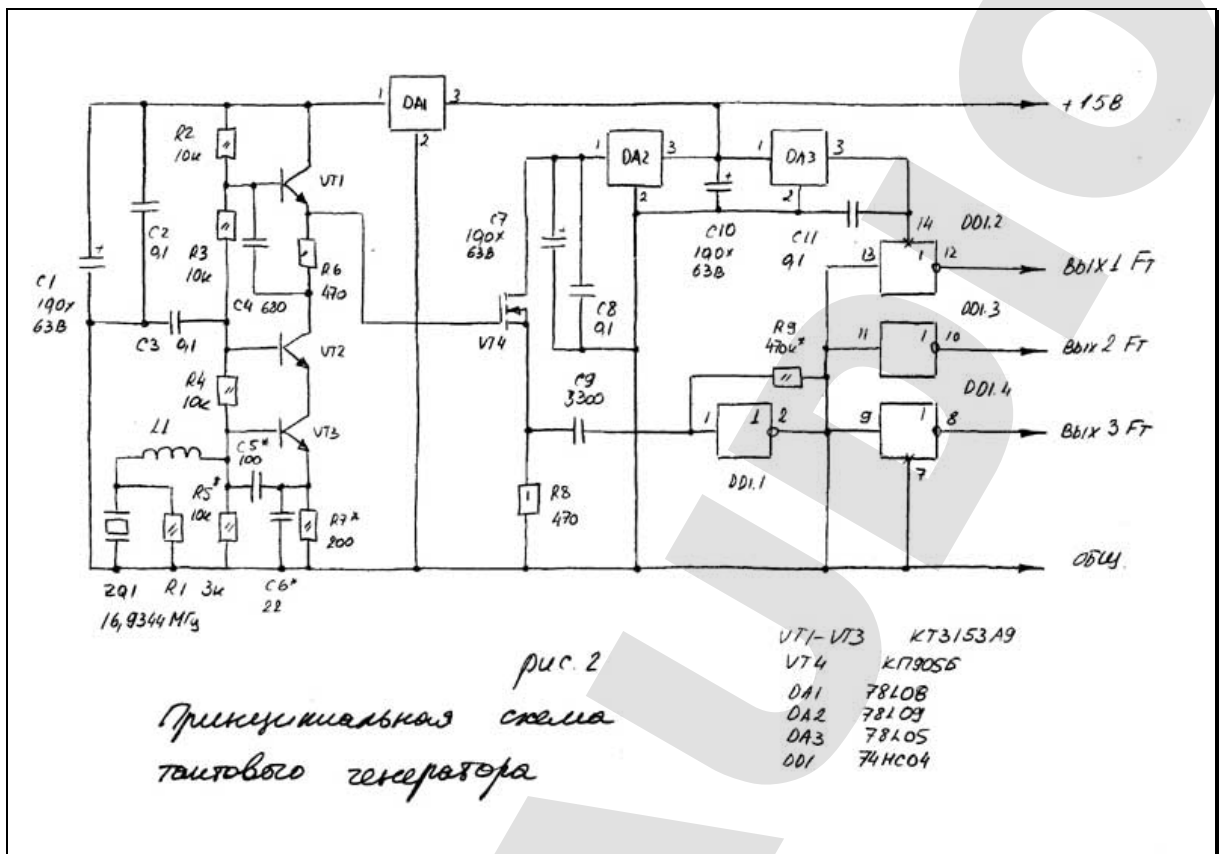


В качестве основы может быть использован практически любой CD-проигрыватель с транспортом хорошего качества, либо же отдельный CD-транспорт.

От стандартного CD-проигрывателя используется лишь часть, обеспечивающая работу транспорта, считывание сигнала, его декодирование в стандарт шины I2S, управление и индикацию. Во всем остальном это самостоятельная конструкция, которую можно разместить как в отдельном корпусе, так и внутри корпуса исходного аппарата.

Основой синхронизации всей системы является высокостабильный генератор частоты 16.9344 МГц, необходимый для работы сервопроцессор Sony CXD2545 (для других типов процессоров тактовая частота может быть иной). Следует отметить, что процессор CXD2545, используемый в Kenwood DP7090, с большим внутренним ОЗУ (32кВ) статического типа и двойной пересинхронизацией шины выдачи данных. Это означает, что звуковой сигнал в формате шины I2S на выходе процессора стабилен и четко привязан к временным отсчетам, задаваемым простым делением тактовой частоты специальным счетчиком, сформированным на кристалле этой микросхемы. CXD2545 применяют во многих аппаратах высокой стоимостной категории, в т. ч. в проигрывателях "Accuphase".

Тактовый генератор формирует сигнал частотой 16.9344 МГц с долговременной нестабильностью лучше $2 \cdot 10^{-6}$ и фазовым шумом < 95 дБ при отстройке ± 5 Гц. Его принципиальная схема приведена на рисунке:



Сигналы шины I2S, несущие информацию звукового сигнала с выхода сервопроцессора подаются на декодер, разделяющий их на независимые сигналы для ЦАП правого и левого канала, а кроме того формирующий необходимый протокол загрузки для конкретного типа ЦАП. Сигналы от декодера через блок оптической развязки поступают на входы микросхем ЦАП. Собственно оптическая развязка цифровых цепей от ЦАП позволяет гальванически разорвать "земли" цифровой и аналоговой частей аппарата, что необходимо для уменьшения цифровых широкополосных помех, наводимых на аналоговые цепи. Обратите внимание, что в схеме проигрывателя не применяется цифровая фильтрация. На сегодняшний день преимущества, которые дает цифровая фильтрация не компенсирует ее недостатки. В частности, высокую чувствительность к джиттеру и фазовому шуму тактового сигнала.

Также я являюсь противником передачи данных по однопроводной шине S/PDIF или ее баланскому варианту AES/EBU. Дело в том, что подобный стандарт обладает серьезными недостатками. Главный из них состоит в том, что формирование единого сложного сигнала, а затем его распаковка порождают дисперсию сигнала, т.е. различные времена распространения для высоко- и низкочастотных составляющих и интерференцию фронтов импульсов, т.е. их взаимозатягивание. Три провода I2S несравненно правильнее и серьезнее, но, увы, не позволяют устраивать детские игры вокруг смены цифровых кабелей.

Следующий блок функциональной схемы - собственно цифро-аналоговые преобразователи. Казалось бы, сегодня фирмы-изготовители предлагают огромное количество разнообразнейших ЦАП. Реальный выбор, однако, не так уж и богат. Большинство современных приборов - это дельта-сигма демодуляторы, либо однобитные преобразователи. И те и другие страдают общим недостатком - немонотонностью характеристики. Декларируемые параметры многих подобных ЦАП (24 разряда/96кГц) есть не что иное, как рекламный трюк. Да, это разрешение будет действительно иметь место, но при работе на стационарном детерминированном сигнале - синусоиде.

Случайный сигнал (каким является сигнал звуковой) при восстановлении из цифровой последовательности дельта-сигма демодулятором меняет статистические характеристики и обогащается модуляционным шумом, который коррелирован с самими сигналом, а поэтому, в отличие от аддитивного шума пассивных компонентов, существенно влияет на качество звука. Кроме того, ныне модно стало на кристалле ЦАП помещать еще и цифровой фильтр, и первые аналоговые каскады. Увы, все это ведет только к двум последствиям - удешевлению системы и увеличению уровня цифровых помех в аналоговых цепях. В результате, реальными кандидатами на роль ЦАП остаются лишь параллельные мультибитные приборы. Они дороги, дефицитны, применяются не только (и не столько) в звуковой технике, сколько в прецизионных генераторах сигналов.

Таких ЦАП не очень много:

Burr-Brown: PCM1702, PCM56, PCM51, PCM61, PCM63.

Analog Devices: AD1850, AD1851, AD1860, AD1861, AD1862, AD1865.

Есть еще достаточно старые ЦАП Philips, но они несравненно хуже. В принципе, в проигрывателе можно применить любые из названных микросхем. Burr-Brown более демократичны, их легче приобрести и они несколько дешевле (самый дорогой - PCM63 стоит в Петербурге чуть более \$40). Приборы Analog Devices относятся к аристократии в мире ЦАП - они дороги, весьма дефицитны, обладают непрерывностью структуры резистивной токовой матрицы и, единственные, - возможностью подстройки по максимуму линейности дифференциальной характеристики в начале шкалы. Самый дорогой - AD1862, в зависимости от модификации может стоить до \$90.

После ЦАП следует самая спорная часть схемы - преобразователи ток-напряжение и аналоговые фильтры. Существуют два взгляда на проблему их применения:

1. Ни в коем случае ничего лишнего после ЦАП, даже выходной ток ЦАП преобразуем в напряжение на резисторе небольшой величины.

2. Применяем и преобразователь ток-напряжение, и многоступенчатые фильтры на ОУ.

Каждый из подходов имеет право на жизнь, свои преимущества и недостатки. Так, преобразование ток - напряжение на резисторе не требует активных компонентов, но приводит к тому, что к ключам ЦАП прикладывается внешнее напряжение, равное падению напряжения на резисторе-преобразователе. В результате резко возрастает нелинейность характеристики преобразования, либо, если величина резистора составляет около 1-2 Ом, требуется применение качественного линейного усилителя вслед за ЦАП. Преобразователь "I-U", выполненный на ОУ обеспечивает идеальные условия работы ЦАП, поддерживая нулевой потенциал его выхода, но охвачен глубокой общей ООС. Последний недостаток можно несколько уменьшить, применив ОУ, первый полюс АЧХ которых лежит выше, чем 20-30 кГц. К сожалению, это весьма дорогостоящие приборы.

С моей точки зрения, второй подход имеет больше преимуществ, чем недостатков, поэтому я выбрал именно его. Операционные усилители, обладающие необходимыми свойствами для работы в преобразователе "ток-напряжение" (т.е. частота единичного усиления 15 МГц, скорость нарастания не менее 20 В/мкс (желательно 100 В/мкс), время установления выходного напряжения с точностью 0.01% - менее 500 нс, устойчивость при $K_y = \pm 1$) и обладающие хорошим звучанием весьма редки. К ним, в частности, можно отнести приборы типов AD825, AD843, AD845, AD797, AD817, AD847, OPA620, OPA671, а также приборы с токовой ООС: AD811, AD844, AD846.

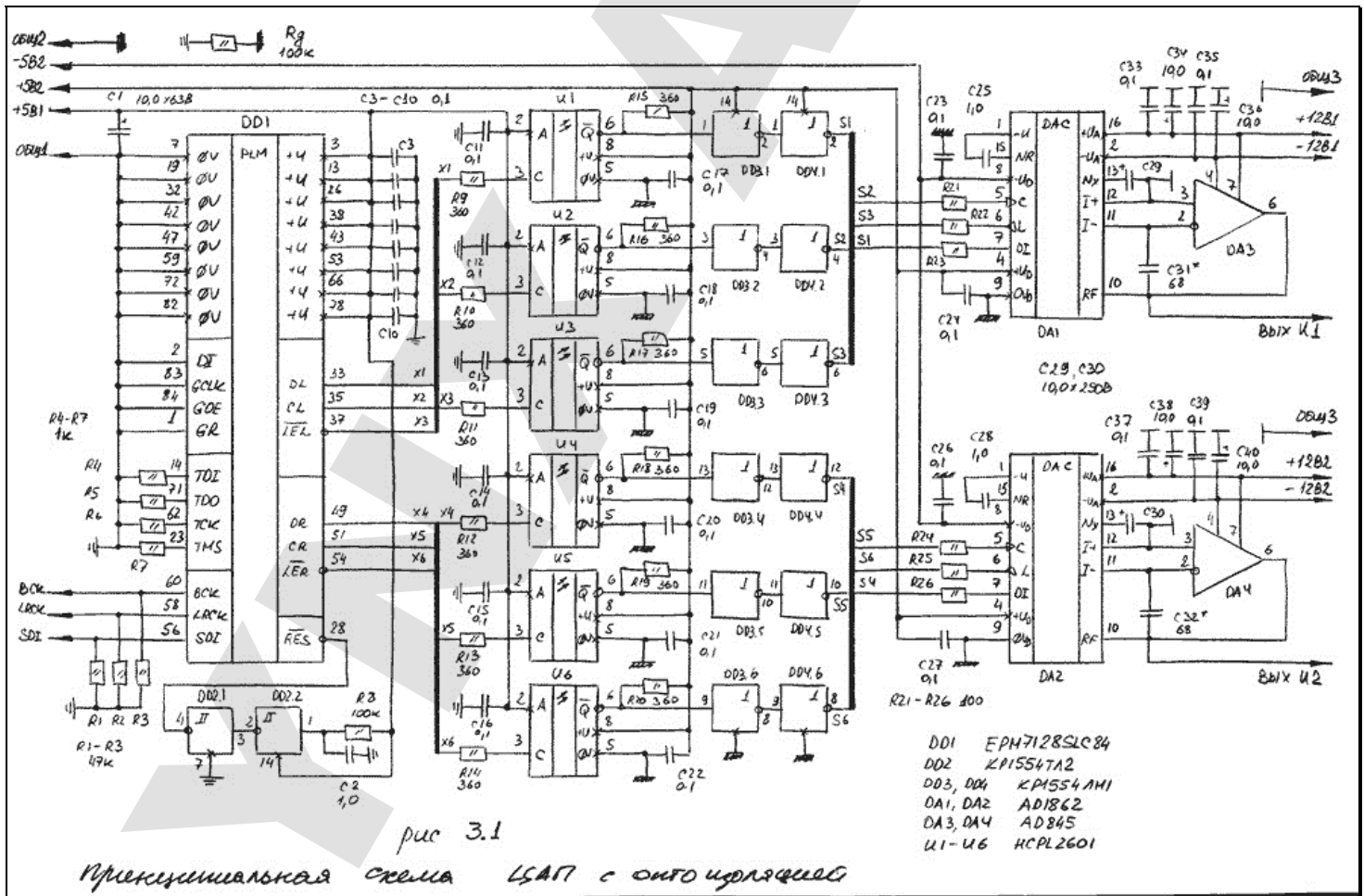
Восстанавливающий фильтр ограничивает спектр ступенчатого сигнала с выхода ЦАП, выполняя тем самым условия "краеугольного камня" цифровой обработки сигналов - теоремы Котельникова-Шеннона. Увы, но точное выполнение этой теоремы физически не реализуемо, т.к. для этого необходим идеальный ФНЧ, с частотой среза 22.05 кГц и бесконечным затуханием всех составляющих с частотами выше частоты среза. Создать такой фильтр невозможно, к нему можно только приблизиться с той или иной степенью ошибки. Увеличение порядка восстанавливающего фильтра благоприятно сказывается на

точности аппроксимации идеальной АЧХ, но увеличивает число активных и пассивных компонентов в цепи сигнала, а также сильно усложняет подбор резисторов и конденсаторов с высокой (до 0.01%) точностью. Фильтры малых порядков (2-4) слабо чувствительны к разбросу номиналов элементов и их стабильности, требуют всего 1-2 развязывающих активных компонента, но крутизна спада их АЧХ явно недостаточна для качественной фильтрации сигнала ЦАП. Мною было принято компромиссное решение - фильтр 6-ого порядка с частотой $F_b = 19$ кГц на специальных буферных элементах с $k = 1$, $f_b = 110$ МГц, скоростью нарастания 3000 В/мкс и шумом не более 4 нВ/Гц^{1/2} во всем звуковом диапазоне частот. Все рассмотренные каскады питаются от аналогового источника питания с 3-мя сетевыми трансформаторами:

Первый обеспечивает питание цепей индикации, управления и привода CD и лазерной головки. Второй трансформатор питает цифровую часть аппарата - сервопроцессор, декодер I2S и входные регистры ЦАП, а также тактовый генератор. Третий трансформатор обеспечивает напряжения питания аналоговой части ЦАП, преобразователя "I-U" и буферов фильтров.

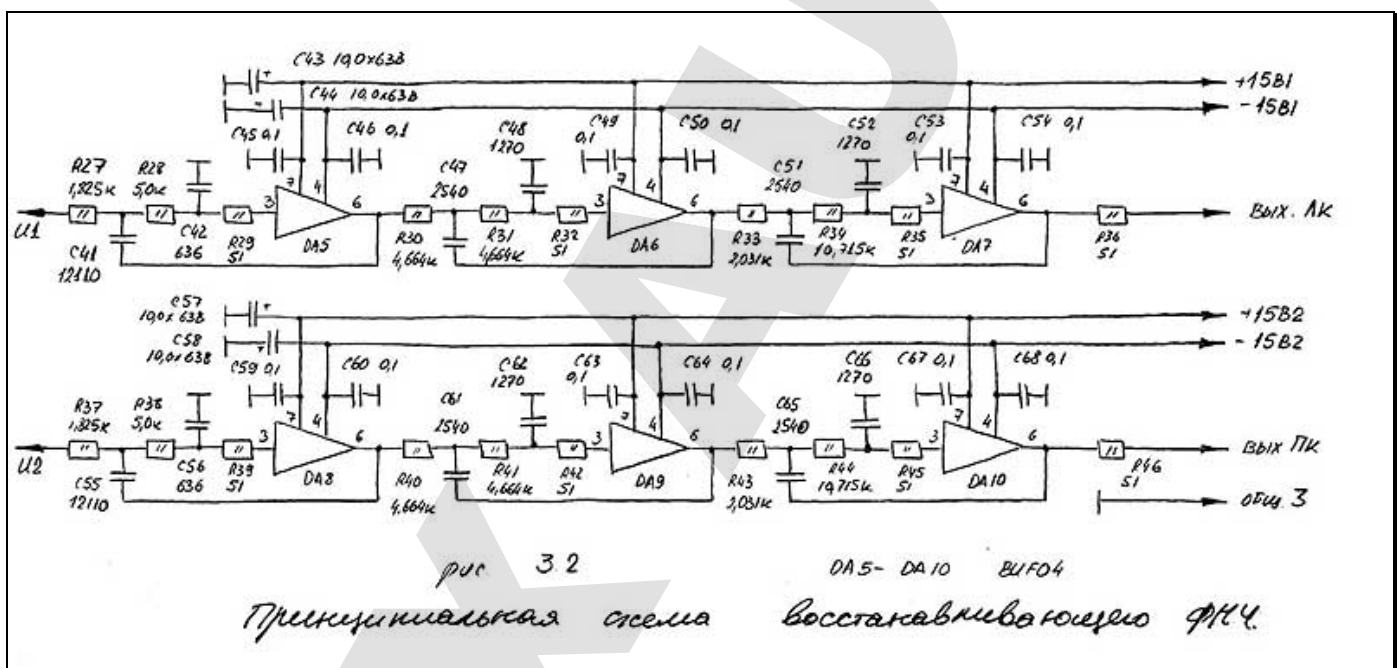
Все напряжения питания стабилизированы, каждое напряжение получается путем выпрямления переменного напряжения собственной обмотки трансформатора, а стабилизаторы аналоговых питаний построены на быстродействующих полевых транзисторах.

Полная принципиальная схема проигрывателя (без источника питания и части, касающейся привода, управления и индикации) приведена на рисунке:



Сигналы шины I2S поступают на декодер шины и формирователь протокола загрузки данных в регистры ЦАП, выполненный на программируемой матрице фирмы Altera. В принципе его можно выполнить и на дискретных элементах (например, серий 1533 или 1554), но это займет примерно 20-30 корпусов микросхем и около 1 А потребления (мой первый вариант схемы был реализован именно таким образом). Сигнал первоначальной установки регистров декодера формируется элементами микросхем DD2 и цепочкой R8C2. С выходов декодера сигналы, соответствующие входным протоколам ЦАП, поступают на скоростные оптроны u1-u6 типа HCPL2601, а с их выхода через формирующие цепи на микросхемах DD3 и DD4 - на входы данных, такта и разрешения загрузки ЦАП. Схема включения ЦАП AD1862 соответствует первоисточнику (CD-ROM "Analog Devices"). Преобразователи ток-напряжение выполнены на ОУ DA3 и DA4 типа AD845 с использованием внутреннего резистора ОС ЦАП AD1862.

Активный фильтр 6-ого порядка (Баттерворта) формирует ровную АЧХ в полосе частот 0-18 кГц, со спадом 3 дБ на частоте 19 кГц и дальнейшем затухании 36 дБ/октаву. Реализован по схемотехнике Саллена-Кея на активных повторителях BUF04:



Подобные микросхемы, по сути, являются сложными эмиттерными повторителями, не имеющими внешней ООС и весьма хорошо работающими в звуковых цепях (зачастую, по качеству они превосходят многие ламповые каскады).

Обратите внимание на особенности схемы. Во-первых, используются три независимых общих провода и одиннадцать различных напряжений питания. +5В1 питает декодер I2S, цепь начальной установки и светодиоды оптронов. Это напряжение подается относительно "земли" ОБЦ1. Около входа каждого оптрона установлен шунтирующий конденсатор 0.1 мкФ, на кристалл "Altera" их приходится 8 шт. (по числу выводов питания). "Земля" ОБЦ1 связана с землей ОБЦ2 через резистор Rg весьма высокого сопротивления (100кОм), предотвращающий появление наведенной разности потенциалов между "землями", но не увеличивающий проникновение помех на выход. Земля ОБЦ2 подается на приемники оптронов, формирователи фронтов импульсов и входные регистры ЦАП. Относительно этой земли поданы напряжения питания входных регистров ЦАП +5В2 и -5В2. Земля ОБЦ3 - аналоговая земля. Она соединяется с ОБЦ2 только в одной точке - на выходе источника питания. Относительно нее подается питания ЦАП +12В1 и -12В1; +12В2 и -12В2; питания фильтров: +15В1 и -15В1; +15В2 и -15В2. Все выводы

питания ЦАП, ОУ и буферов зашунтированы на аналоговую землю конденсаторами 0.1 мкФ непосредственно рядом с соответствующими выводами микросхем.

В фильтре применены прецизионные полистирольные конденсаторы (фирмы Rifa - аналог К71-7) и резисторы С2-29 из ряда Е192 (можно также БЛП или УЛИ). Последовательно с выходами последних буферов фильтра и выходными разъемами включены защитные резисторы R36 и R46, т. к. высококачественные повторители не имеют защиты от короткого замыкания в нагрузке. Если вы не собираетесь играть с различными "шнурками", смело убирайте эти резисторы, и тогда $R_{\text{вых}}$ не превысит 0.1 Ом в диапазоне 0 Гц - 5 МГц.

И, наконец, в схеме нигде нет никаких разделительных элементов на пути аналогового сигнала - ни "плохих" конденсаторов, ни "ужасных" трансформаторов. Постоянное напряжение на аналоговом выходе не превышает 5 мВ при самом неудачном сочетании параметров аналоговых элементов, реально же оно существенно ниже.

Источники питания каждый может разработать самостоятельно, или найти в соответствующей литературе, поэтому схему не привожу.

В заключение несколько слов о звучании такого аппарата.

Прослушивание значительного количества фонограмм показало, что звук ДАС чистый, без "каши" на низких уровнях, с хорошим разрешением и артикуляцией и больше характерен для аналоговых устройств. Небольшой спад АЧХ на высоких частотах придает звучанию некоторую мягкость и деликатность, но не убивает динамику и разрешение. Низкое выходное сопротивление, не зависящее от частоты сигнала, делает аппарат малочувствительным к межблочным кабелям, а очень низкий уровень помех на аналоговом выходе (менее 100 дБ в полосе 0 Гц - 100 МГц) позволяет не опасаться за появление интермодуляционных взаимодействий помеха-шум в любом усилителе мощности.

Дмитрий Андронников
Санкт-Петербург, 1996-1997 г. г.