

Модуль ЦАП Lync24

При разработке этого цифро-аналогового преобразователя звуковых сигналов ставилась задача создать устройство, которое бы могло бы прийти на смену хорошо известному ЦАП Lync20, поскольку доставать снятые с производства AD1862 становится всё труднее, а подделок и перемаркировок этих микросхем встречается всё больше. Кроме того, был учтен опыт, полученный при изготовлении и настройке более двадцати экземпляров Lync20 и личной эксплуатации четырех экземпляров.

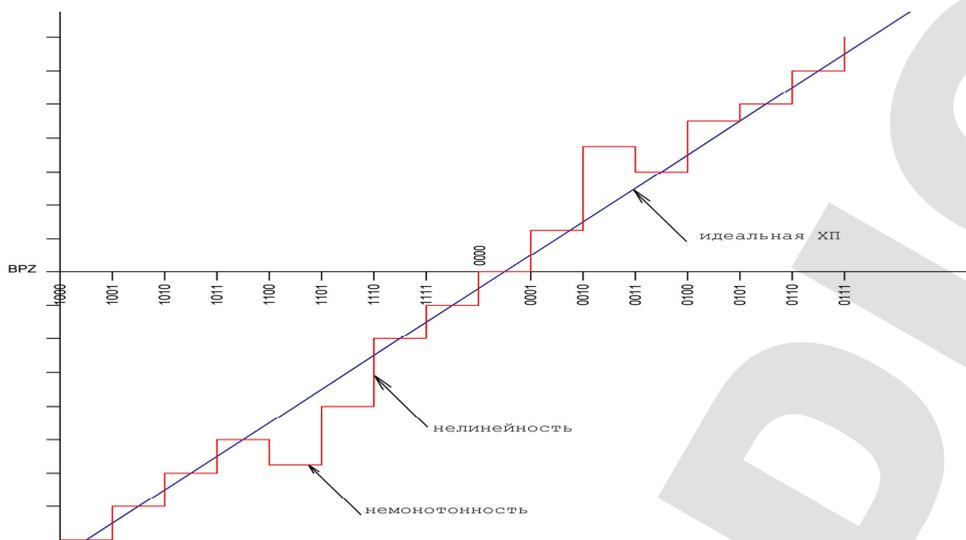
Все теоретические предпосылки работ над данной конструкцией такие же, как и для Lync20, они подробно изложены в статье «Последняя песня Аналога», посвященной этому ЦАП. Поэтому сейчас мы будем рассматривать только те моменты, которые определяют существенные отличия нового ЦАП от предыдущего.

Описываемое устройство предназначено для осуществления цифроаналогового преобразования звуковых сигналов, записанных с частотой дискретизации до 100кГц и разрядностью до 24 при осуществлении 8-кратной передискретизации в цифровом фильтре. В режиме 4-кратной передискретизации допустимая рабочая частота дискретизации составляет 200кГц. С источником цифрового сигнала ЦАП соединяется посредством двухканального синхронного интерфейса с временным разделением каналов (I2S различных модификаций). ЦАП предназначен для работы в мастер-режиме, являясь источником синхросигналов для устройства считывания\хранения данных. О преимуществах такого режима с точки зрения качества звучания системы говорилось очень много и, по сути, только его (в различных модификациях) следует считать приемлемым для систем звуковоспроизведения высокого класса.

После изучения и анализа номенклатуры выпускаемых на сегодняшний день многоразрядных параллельных ЦАП (к сожалению, весьма скудной по сравнению с концом прошлого века, если брать только те приборы, которые имеются в текущих производственных программах фирм-производителей), за основу конструкции Lync24 был взят весьма удачный прибор AD1865 производства Analog Devices. Этот ЦАП на одной подложке содержит два подобранных и очень близких между собой, в том числе и по величине и форме нелинейности характеристики преобразования (ХП), 18-разрядных прибора, аналогичных AD1861 и простейшую логику, объединяющую входы поразрядного такта обоих. Наличие двух ЦАП высокой степени идентичности в одном корпусе вполне логично привело к идее использовать их в дифференциальном включении для взаимной компенсации нелинейности ХП. С учетом того, что ЦАПы принимают входной сигнал в дополнительном до 2 двоичном коде, реализовать дифференциальный режим работы двух ЦАП очень просто, – достаточно проинвертировать данные, поступающие на один из ЦАП, а после преобразования в аналоговую форму вычесть из прямого сигнала инверсный в разностном каскаде, например на ОУ.

Первые эксперименты с AD1865N-K, дали весьма обнадеживающие результаты – без каких-либо дополнительных действий для сигналов с уровнем -30...40дБ удалось получить эффективный динамический диапазон (ЭДД) для 18-разрядного синусоидального сигнала 104...106дБ, т.е. практически полностью реализовать 18-разрядную шкалу этих микросхем, что близко к аналогичному значению для большей части AD1862 в недифференциальном включении. Вскоре проведенный эксперимент с AD1862N-J в том же самом макете показал, что для произвольно взятых экземпляров этих микросхем дифференциальное включение не дает никаких преимуществ, и только при выполнении весьма трудоемкой и метрологически сложной и дорогостоящей операции по подбору ЦАП с одинаковым характером нелинейности ХП появляется выигрыш в ЭДД. К сожалению, из 32 микросхем AD1862N-J удалось отобрать только одну пару, обладающую таким свойством. Поэтому способ компенсации нелинейности ХП за счет разностной обработки дифференциальных сигналов пригоден лишь только для заведомо подобранных по виду нелинейности ХП приборов.

Рассмотрим несколько более подробно вопрос о нелинейностях ХП ЦАП. В последнее время в различных интернет-ресурсах довольно часто встречаются вопросы, так или иначе связанные с разрядностью и линейностью ЦАП. Многие из них вызваны либо недостаточным пониманием природы цифроаналогового преобразования, либо неверным методологическим подходом к измерению и оценке параметров преобразователей. Попробуем обратить внимание на наиболее распространенные ошибки. Очень часто при попытках провести измерение параметров ЦАП с большой разрядностью (напр., 24), критерием монотонности и/или линейности преобразования выбирают способность ЦАП преобразовать 1МЗР в середине шкалы в соответствующие аналоговые уровни. При этом исследователь подает на вход ЦАП код середины шкалы (BPZ) с приращением $\pm(1...2)$ МЗР (младший значащий разряд) и видит на выходе ступеньки, близкие к аналоговой величине МЗР, на основании чего делает вывод о разрешении и монотонности ЦАП в 24 разряда. Причем такой вывод делают даже некоторые достаточно квалифицированные и грамотные специалисты. Однако это методологически и теоретически неверно. Обратимся к рисунку, на котором представлена типовая характеристика преобразования 4-х разрядного ЦАП с различными видами нелинейностей:



Монотонность, нелинейность и дифференциальная нелинейность ХП, как и связанное с ними разрешение (иначе – эффективное число разрядов, effective number of bits - ENOB), по своей природе невозможно определить для одной точки ХП (если, конечно, она не состоит из 3-х уровней ☺). Это интегральные параметры ВСЕЙ шкалы и поэтому для того, чтобы сделать вывод о монотонности 24-х разрядного ЦАП необходимо произвести измерения в $(16777216 - 2)$ точках шкалы, давая приращение ± 1 МЗР для каждой точки и убедиться, что аналоговый уровень для каждого приращения кода изменяется соответственно. Только в этом случае можно говорить о монотонности всей ХП. Еще сложнее измерить порядок дифференциальной нелинейности, поскольку в этом случае нужно не только гарантировать соответствие знака приращения выходного сигнала знаку приращения кода, но и соответствие величины приращения выходного сигнала приращению кода. Поэтому процесс наблюдения ступенек величиной МЗР в районе BPZ никоим образом не отражает реальные свойства ЦАП, а лишь показывает умение исследователя измерять и наблюдать сигналы малых уровней. И вывод о разрешении ЦАП в 24 разряда на основе наблюдения ступеньки МЗР есть ни что иное, как демонстрация незнания теории цифроаналогового преобразования.

Общим критерием монотонности и дифференциальной нелинейности характеристики преобразования (но без определения конкретных зон немонотонности и полярности дифференциальной нелинейности ХП) может быть спектральный анализ преобразованного сигнала полной шкалы. В этом случае все отклонения ХП от линейной проявляются в виде роста нелинейных искажений, величина которых характеризует суммарную нелинейность и немонотонность ХП. Уровень искажений идеального цифрового синусоидального сигнала, преобразованного ЦАП, однозначно связан с суммарной нелинейностью ХП и легко может быть пересчитан в ENOB ЦАП по простой формуле:

$$\text{ENOB} = (-D_x - 2) \div 6,$$

Где D_x – интегральный уровень искажений, дБ

Полученное значение однозначно характеризует разрешающую способность ЦАП для произвольных сигналов в отличие от наблюдения ступенек в МЗР в районе середины шкалы преобразования, которое не несет практически никакой полезной информации и обычно применяется лишь в рекламных целях.

Вышесказанное относится к ЦАП любого принципа преобразования, за исключением монотонности, свойством которой на всей шкале по принципу их работы обладают ЦАП последовательного действия, т.е. приборы, основанные на дельта-преобразовании. К сожалению, таким приборам свойственен более существенный, чем немонотонность ХП, недостаток, проявляющийся при преобразовании случайных и псевдослучайных сигналов, – это взаимная корреляция между соседними отсчетами на достаточно большом временном интервале, во всяком случае, превышающем период дискретизации. В результате при обработке в таком преобразователе случайного сигнала, его автокорреляционная функция будет отличаться от исходной и представляет собой свертку собственной АКФ сигнала и КФ преобразователя. По всей видимости, слуховой аппарат человека достаточно хорошо определяет изменение статистических характеристик сигналов, поскольку большинство слушателей совершенно безошибочно определяют разницу в звучании параллельных и дельта – преобразователей, причем не в пользу последних даже при худших значениях уровня искажений у параллельных приборов.

Принципиальная электрическая схема ЦАП Lnx24 приведена на следующем рисунке:

Во многом она напоминает схему Lynx20, но есть и ряд существенных отличий, обусловленных иной элементной базой и полученным в ходе эксплуатации Lynx20 и Lynx23 опытом. Основная обработка цифрового потока производится в ЦФ DD2 (SM5847) совместно с ПЛИС DD1, которая обеспечивает оптимальные условия работы ЦФ. Для формирования крутых фронтов/спадов входных сигналов, необходимых для корректной работы ПЛИС, входные сигналы транслируются через формирователи микросхемы DD4, обладающие гистерезисными свойствами триггеров Шмита. Сигналы синхронной звуковой шины подаются на буферные формирователи через IDC – совместимую колодку XS11. На эту же колодку выводятся (через буферные формирователи той же микросхемы DD4) тактовые сигналы с частотами 384Fs, 192Fs и 96Fs, с помощью которых осуществляется синхронизация считывающего устройства. Выводы колодки XS11 с 1 по 10 совместимы с таковыми у ЦАП Lynx20DE. Подключение к внешним считывающим устройствам желательно осуществлять либо индивидуальными экранированными проводниками, либо плоским шлейфом. Длина соединения не должна превышать 200...300мм, в противном случае следует применить передачу сигналов в дифференциальном виде, например с помощью LVDS, RS485 или ЭСЛ приемопередатчиков.

При разработке этого ЦАП было решено отказаться от управления режимами работы ЦФ через ПЛИС и возможности организации приема управляющих сигналов по последовательному порту ввиду того, что такое управление оказалось практически невостребованным. Благодаря этому удалось заметно сократить требуемый объем ресурсов ПЛИС и применить иной прибор, характеризующийся меньшим уровнем помех, наводимых в шины питания и окружающее пространство. В новом устройстве применяется ПЛИС серии MAX7000S (EPM7128) с самым низким «грейдом» быстродействия, поскольку логические элементы таких ПЛИС при прочих равных условиях создают меньше помех. Реально уровень помех в питании (в диапазоне частот до 10ГГц) от EPM7128 с грейдом 15нс ниже такового от ПЛИС с грейдом 10нс на 2...3дБ. Текущий проект записывается в ПЛИС по стандартному интерфейсу JTAG через разъем XS12.

Режимы работы ЦФ и формат входной шины (RJ, I2S-48, I2S-64) устанавливаются соответствующим набором переключателей на колодке XS10 (установленная переключатель соответствует подаче на управляющий вход ЦФ лог.0). Указанные переключения могут производиться и с помощью логических сигналов ТТЛ или 5В – КМОП уровней, подаваемых от системы управления на нужные выводы колодок. Ниже приведена таблица соответствия переключателей управляющим входам ЦФ:

Таблица 1

№ замыкаемых контактов	Реализуемая функция или параметр	Значение параметра	
		разомкнуто	замкнуто
1 - 2	Значение тактовой частоты ядра фильтра	192Fs	256Fs
3 - 4	Формат входных сигналов фильтра	Не использовать!	рабочий
5 - 6	Установка разрядности входных данных 1	Установить необходимую разрядность входных данных согласно справочными данными на ЦФ SM5847	
7 - 8	Установка разрядности входных данных 2		
9 - 10	Управление внутренней синхронизацией фильтра	Синхронизация от тактовой частоты	Синхронизация от входной шины
11 -12	Установка коэффициента деления тактовой частоты (DV2)	Выбрать согласно рекомендациям справочных данных на ЦФ SM5847	
13 - 14	Режим деэмфазиса	включен	выключен
15 - 16	Выбор коэффициентов фильтра деэмфазиса	Для Fs = 32кГц	Для Fs = 44.1кГц
17 - 18	Режим заглушения	Сигнал заглушен	Сигнал есть
19 - 20	Режим дизеринга	выключен	включен
21 - 22	Выбор коэффициента передискретизации	8x	4x
23 - 24	Установка коэффициента деления тактовой частоты (DV1)	Выбрать согласно рекомендациям справочных данных на ЦФ SM5847	
25 - 26	Формат входной шины	I2S	Right - justified
27 - 28	Количество импульсов записи данных в регистр ЦАП на периоде дискретизации	64	48

Питание цифровой части устройства осуществляется от стабилизатора +5В на DA1 типа M5237L и VT1 через индивидуальные LC- фильтры. Выбор микросхемы M5237 обусловлен ее хорошими шумовыми свойствами (в 5-вольтовом стабилизаторе его шумовое напряжение примерно в 7...10 раз ниже, чем у стандартных стабилизаторов 7805) и доступностью. Применение в качестве регулирующего транзистора прибор структуры р-МДП позволяет немного уменьшить возможное проникновение помех от цифровой части в первичный источник и наоборот за счет большой величины динамического сопротивления канала ПТ.

Выходные сигналы управления микросхемами ЦАП от ПЛИС подаются на быстродействующие развязки U1 и U2 (ADuM 1401CRW), которые, как и в предыдущих конструкциях, служат для изоляции

цифровых цепей от аналоговых и цифроаналоговых с целью снижения некоррелированных помех в выходном аналоговом сигнале. Тактовый генератор и регистр пересинхронизации изолированы от “цифровой” части схемы и размещены на “аналоговой” стороне. Питание генератора осуществляется от собственного малошумящего стабилизатора, в качестве которого применен прецизионный ИОН типа AD586 с возможностью организации фильтра шумов, которая и использована в этом случае. Для лучшего подавления низкочастотных составляющих шума емкость конденсатора фильтра увеличена в 10 раз по сравнению с рекомендованной в справочных материалах. Генератор тактового сигнала частотой 33.8688МГц (768Fs) – такой же, как и в Lynx20, производства английской фирмы Gollodge. Этот генератор при его питании от очень “чистого” источника обеспечивает величину джиттера, не превышающую 5...7пс (в зависимости от экземпляра). Регистр пересинхронизации – 74ABT574, по сути, не имеет альтернативы с точки зрения собственной апертурной неопределенности, ее величина (0.8...1пс) примерно вдвое ниже, чем у ближайшего аналога 74AC574. Регистр, “аналоговая” сторона развязок и цифровая часть микросхем ЦАП питаются от собственного стабилизатора на DA2 и VT2 (аналогичный стабилизатору питания “цифровой” части) через индивидуальные LC -фильтры для каждой микросхемы.

Аналоговые цепи обоих каналов полностью идентичны. В каждом канале используется один удвоенный ЦАП типа AD1865N-K(J). Его преобразователи получают прямые и инвертированные данные в “дополнительном до двух” коде, тем самым обеспечиваются противофазные приращения токов на их выходах. Выходные токи преобразуются в соответствующие напряжения каскадами на ОУ с ТОС типа AD811, отлично зарекомендовавшими себя ранее. На входе преобразователей ток – напряжение установлены емкости C7, C35, C51, C74, которые совместно с выходным сопротивлением токового выхода ЦАП образуют ФНЧ первого порядка с частотой среза порядка 500...600кГц, снижающий уровень ВЧ- составляющих на входах преобразователей. Эта мера позволила несколько снизить (хотя и несущественно, из-за очень высокого собственного быстродействия ОУ преобразователей) интермодовый пьедестал устройства.

Выходные противофазные сигналы поступают на вычитающий ФНЧ, который и формирует из двух противофазных сигналов один, а также осуществляет восстанавливающую фильтрацию. Частота среза фильтра выбрана равной 40 кГц, что, с одной стороны, достаточно для эффективной фильтрации ВЧ - составляющих спектра преобразованного сигнала при 8х передискретизации, а, с другой стороны, на октаву отстоит от верхней частоты спектра полезного сигнала, что гарантирует достаточную линейность ФЧХ. Сам вычитающий фильтр выполнен по схеме с многопетлевой ООС. По сравнению с фильтром Салена-Келли, схема с многопетлевой ООС обеспечивает лучшее подавление ВЧ - составляющих с частотами 300...400 кГц и выше за счет того, что конденсаторы первого звена фильтра включены не в цепь ООС (к выходу ОУ), а заземлены и, таким образом, работа первого звена, воспринимающего наиболее «жесткий» с точки зрения спектра сигнал, не зависит от частотных свойств петли ООС ОУ. Кроме того, схема с многопетлевой ООС позволяет очень просто и красиво реализовать вычитающий фильтр и таким образом совместить в одном каскаде и фильтрацию, и формирование единого сигнала из пары дифференциальных. В этом же каскаде введена балансировка ОУ по постоянному току для того, чтобы можно было скомпенсировать смещение, возникающее в каскадах преобразователей за счет значительных токов смещения ОУ с ТОС и собственного начального выходного тока ЦАП. Схема балансировки построена таким образом, что в качестве ОУ вычитающего фильтра можно применять разные типы микросхем (напр., OPA627, OPA132, AD843, AD845, AD817, LT1363, LM6171). При этом нужно лишь установить соответствующие джамперы на колодки XS13 и XS14 таким образом, чтобы реализовать схему балансировки конкретного ОУ. Расположение переключателей на этих колодках для указанных типов ОУ приведено в таблице:

Таблица 2

Тип применяемого в ФНЧ ОУ	Расположение переключателей XS13 и XS14
AD843, AD845, OPA132, OPA134	
AD817, AD847, LT1363	
OPA627, OPA671	

Сигнал с выхода вычитающего фильтра является выходным сигналом ЦАП, на внешние устройства он подается через T-образный RC – фильтр, который защищает цепь ООС ОУ от высокочастотных помех извне.

Питание аналоговых цепей каждого канала осуществляется от двуполярных стабилизаторов последовательного типа, выполненных на основе микросхем M5230 фирмы Mitsubishi. Эти стабилизаторы отличает низкий уровень шума, достаточно высокие быстродействие, собственная линейность и коэффициент стабилизации. Стабилизаторы напряжений $\pm 15\text{В}$ (DA9, DA15, VT3 – VT6) для питания ОУ выполнены с применением дополнительных внешних транзисторов, поскольку ток, потребляемый ими, превышает максимальное для M5230 значение 30мА. Стабилизаторы напряжений $\pm 5\text{В}$ питания микросхем ЦАП (DA7, DA13) внешних регулирующих транзисторов не имеют.

Конструктивно ЦАП выполнен на 4-х слойной двухсторонней печатной плате из материала FR4 толщиной 2мм размерами 180 x 100мм. Такое решение позволило выполнить «земляные» цепи в виде сплошных полигонов и таким образом как уменьшить излучаемые в окружающее пространство ВЧ-помехи, так и повысить устойчивость системы к воздействию внешних помех.

Элементная база ЦАП Lynx24 близка с таковой для Lynx20. В цифровой части применены SMD резисторы и конденсаторы типоразмера 0805. Для каждой микросхемы цифровой части организован собственный фильтр питания на основе ферритовой бусины и блокирующего конденсатора. Такие индивидуальные ячейки фильтров позволяют существенно уменьшить взаимовлияние микросхем цифровой части и тем самым снизить вероятность возникновения «наведенного» джиттера. Электролитические конденсаторы, используемые для блокировки цифрового питания и питания цифровой части ЦАП – Rubycon Black Gate PK или Sanyo OS-CON SA. В фильтрах питания генератора и фильтре шума ИОН AD586 желательно применять конденсаторы Black Gate, поскольку они обладают минимальным «емкостным» шумом по сравнению с другими типами электролитических конденсаторов.

В цепях питания аналоговой части ЦАП и ОУ желательно применять блокирующие емкости типов Black Gate FK или NX, характеризующиеся не только малым «емкостным» шумом, но и высокой степенью собственной линейности. Дополнительно «аналоговые» питания заблокированы фольговыми полипропиленовыми конденсаторами Wima FKP2 в непосредственной близости от выводов питания микросхем.

В вычитающем ФНЧ применяются SMD резисторы типоразмера 1206 и выводные фольговые полипропиленовые конденсаторы Wima FKP2 точностью 2.5%. Такой точности вполне достаточно для реализации ФНЧ второго порядка.

При работе с микросхемами многозарядных параллельных ЦАП следует иметь в виду, что даже небольшой перегрев их выводов при пайке может существенно и необратимо ухудшить линейность ХП этих приборов, поэтому ЦАП желательно устанавливать в контактные панельки. Для обеспечения высокой надежности контакта с выводами микросхем лучше использовать панельки цангового типа AMP или Scott SA.

Регулирующие транзисторы стабилизаторов питания (VT3...VT6) желательно снабдить теплоотводами, обеспечивающими температуру корпусов приборов в установившемся режиме не более 40...50С. Для транзисторов VT1 и VT2 теплоотводы не нужны, если входные напряжения стабилизаторов не превышают 8...9В.

Для питания устройства в наилучшем случае желательно использовать 7 независимых стабилизированных источника:

1. +8...12В 200...250мА (питание ЦФ и ПЛИС)
2. +8...12В 100...130мА (питание регистра пересинхронизации)
3. +9...15В 50мА (питание тактового генератора)
4. +20...24В 100мА (питание положительного плеча аналоговой части левого канала)
5. -20...24В 100мА (питание отрицательного плеча аналоговой части левого канала)
6. +20...24В 100мА (питание положительного плеча аналоговой части правого канала)
7. -20...24В 100мА (питание положительного плеча аналоговой части правого канала)

Последние 4 источника первичного питания соединяются вместе и образуют в точке соединения «аналоговую» землю на самой плате ЦАП.

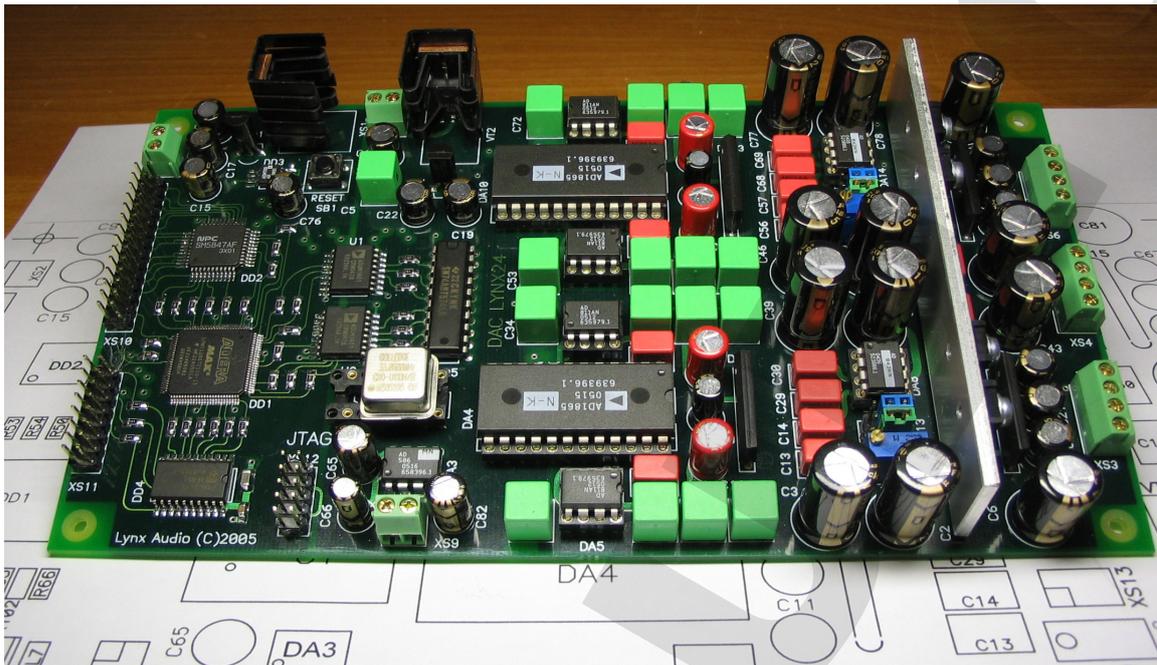
Если от устройства не требуется получение предельных параметров, то систему питания можно заметно упростить, например, применив один первичный источник вместо п.1) и п. 2), два или один двуполярный источник вместо п.4)...п.7)

Электролитические конденсаторы типа Black Gate в таком случае вполне заменимы на близкие по номиналам из следующих типов (по мере ухудшения): Elna Silmic, Sanyo MV-AX, Panasonic FA, Elna RJH, а полевые транзисторы р-типа VT1 и VT2 – на биполярные рnp структуры (исток = эмиттер, сток = коллектор, затвор = база) мощностью рассеяния не менее 800мВт, напр., 2SA1315.

Первичные источники питания могут быть и нестабилизированными, поскольку все необходимые локальные стабилизаторы имеются на плате устройства, а их качество вполне достаточно для работы от нестабилизированных входных напряжений. В этом случае следует применять выпрямители с емкостями

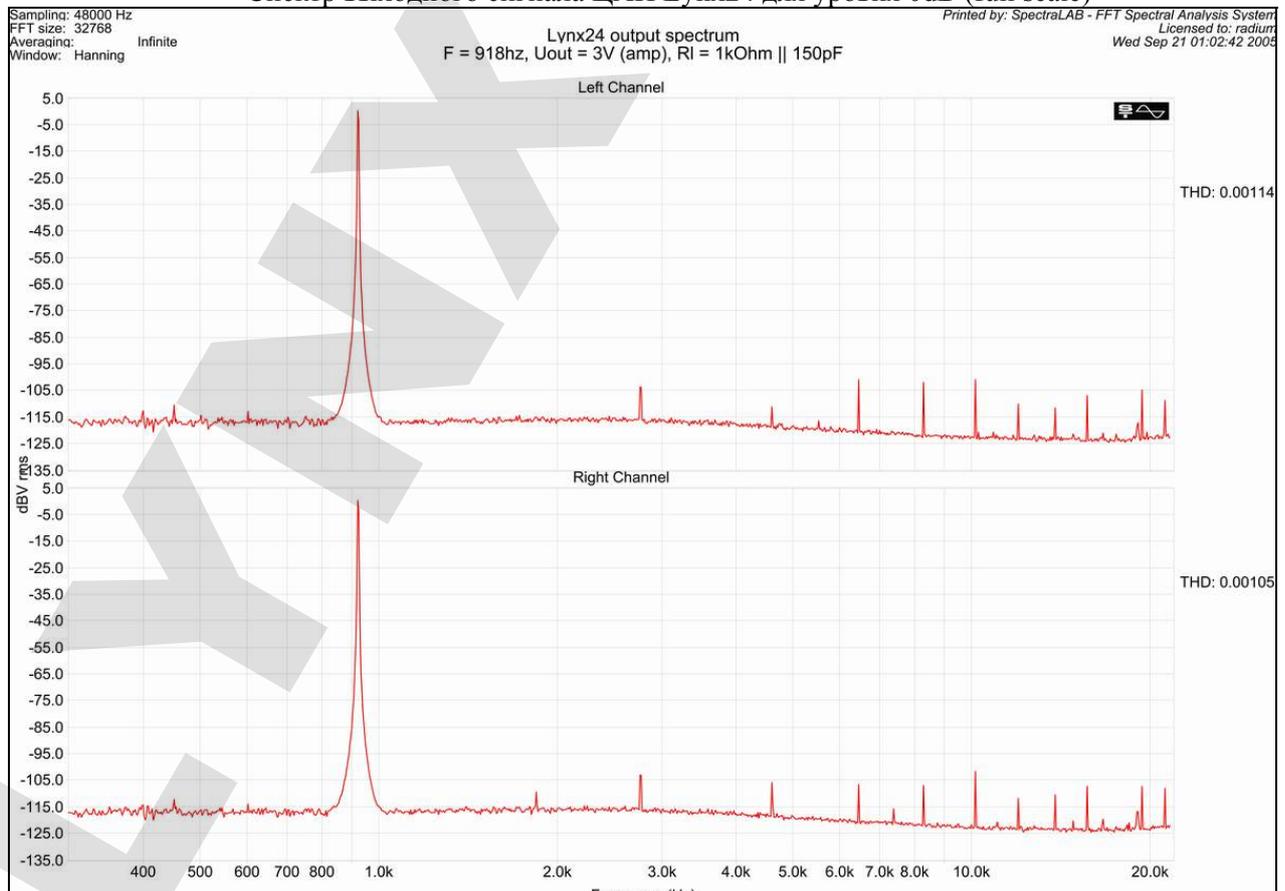
фильтров не менее 2000...3000мкФ для «цифровых» питаний, 5000мкФ для питания генератора и по 4000мкФ для «аналоговых» питаний.

Внешний вид смонтированного модуля ЦАП Lynx24 представлен на рисунке:

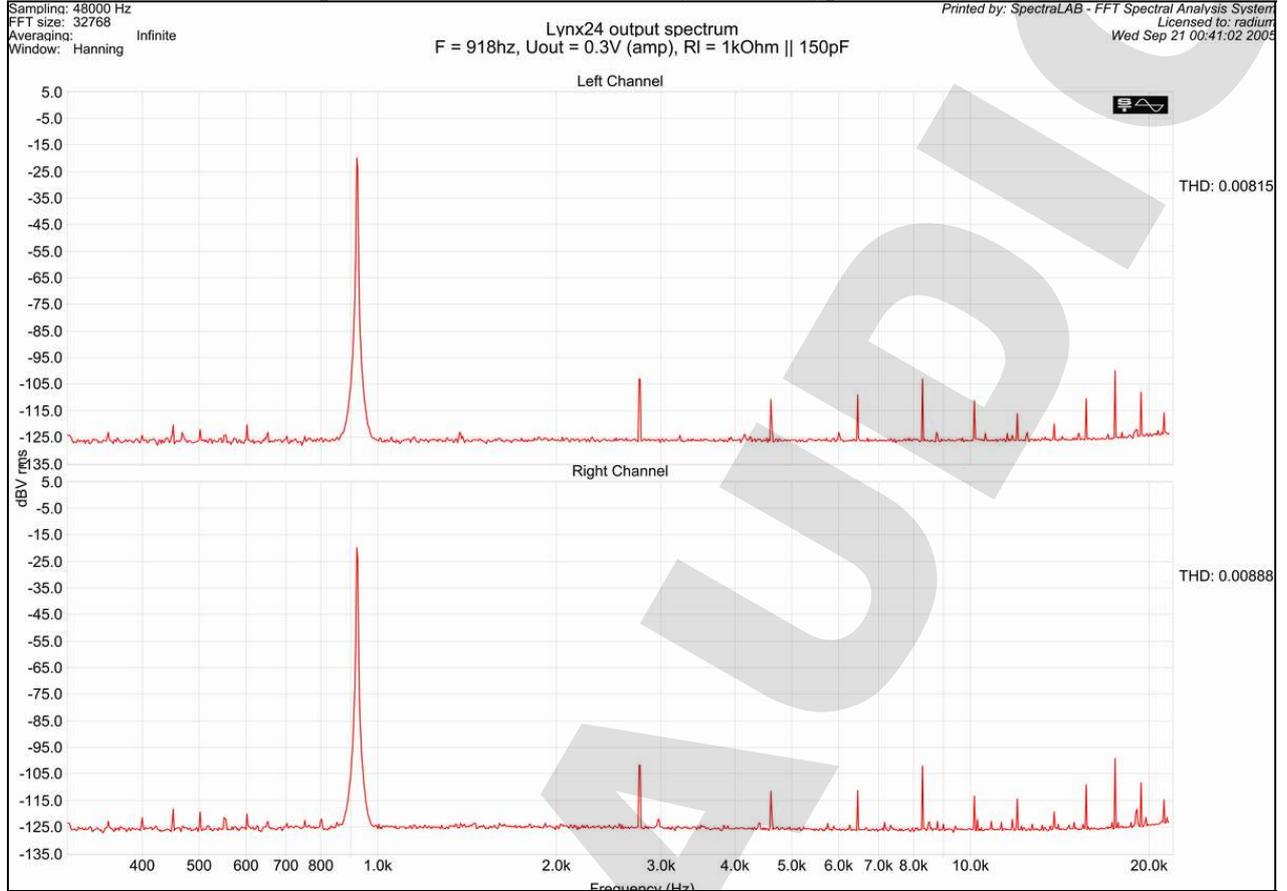


Спектры выходного сигнала для различных уровней (0дБ, -20дБ, -40дБ и -60дБ), снятые с помощью измерительного РСЦ АЦП на основе микросхемы АК5395 (дополнительно была проведена калибровка и программная компенсация искажений АЦП на сигнале частотой 918.75Гц от образцового аналогового генератора с уровнем собственных искажений -125дБ, так, что разрешающая способность АЦП на данной частоте составляла -117дБ) приведены ниже. На всех спектрограммах видно, что реализуемый динамический диапазон составляет не менее 98дБ, определяемых 16-разрядным сигналом на входе устройства.

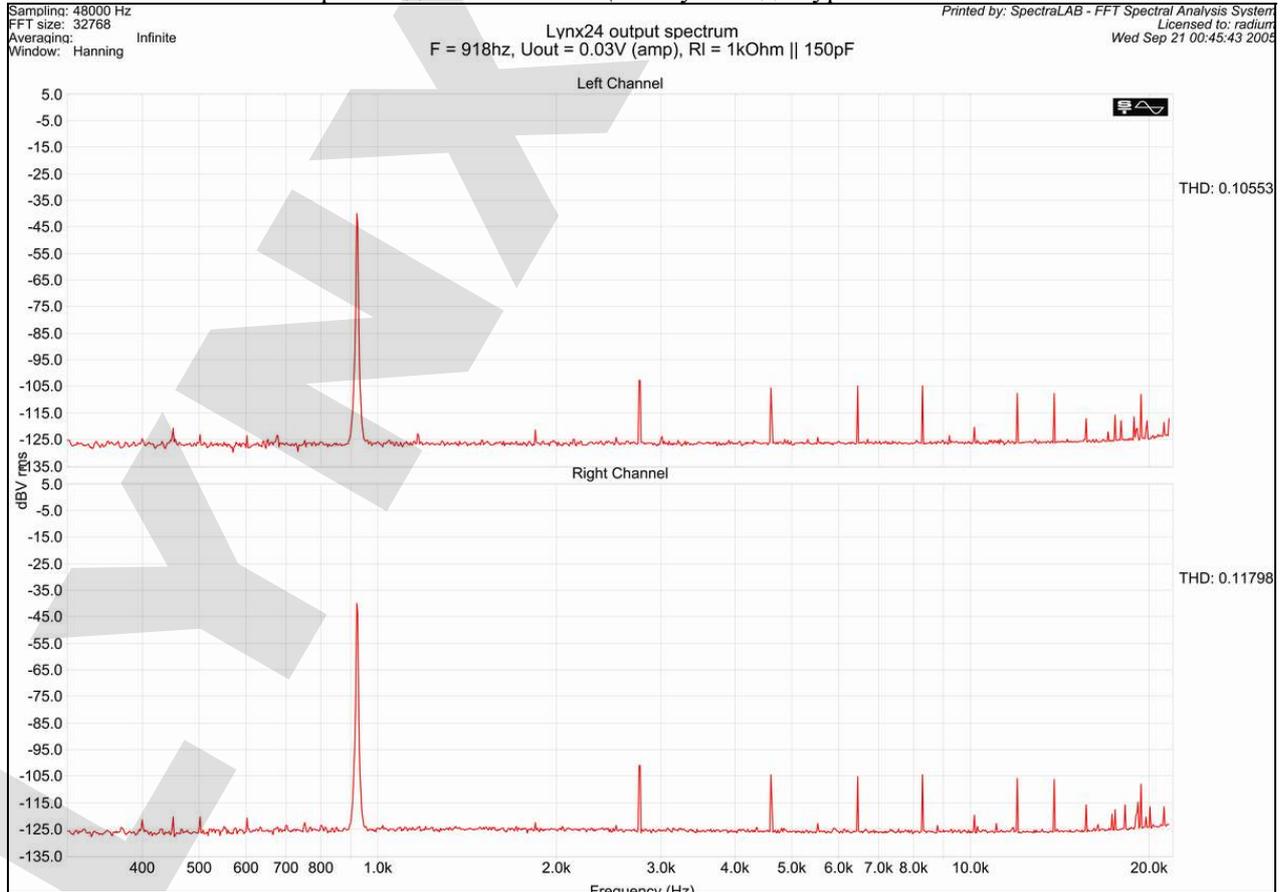
Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx24 для уровня 0дБ (full scale)



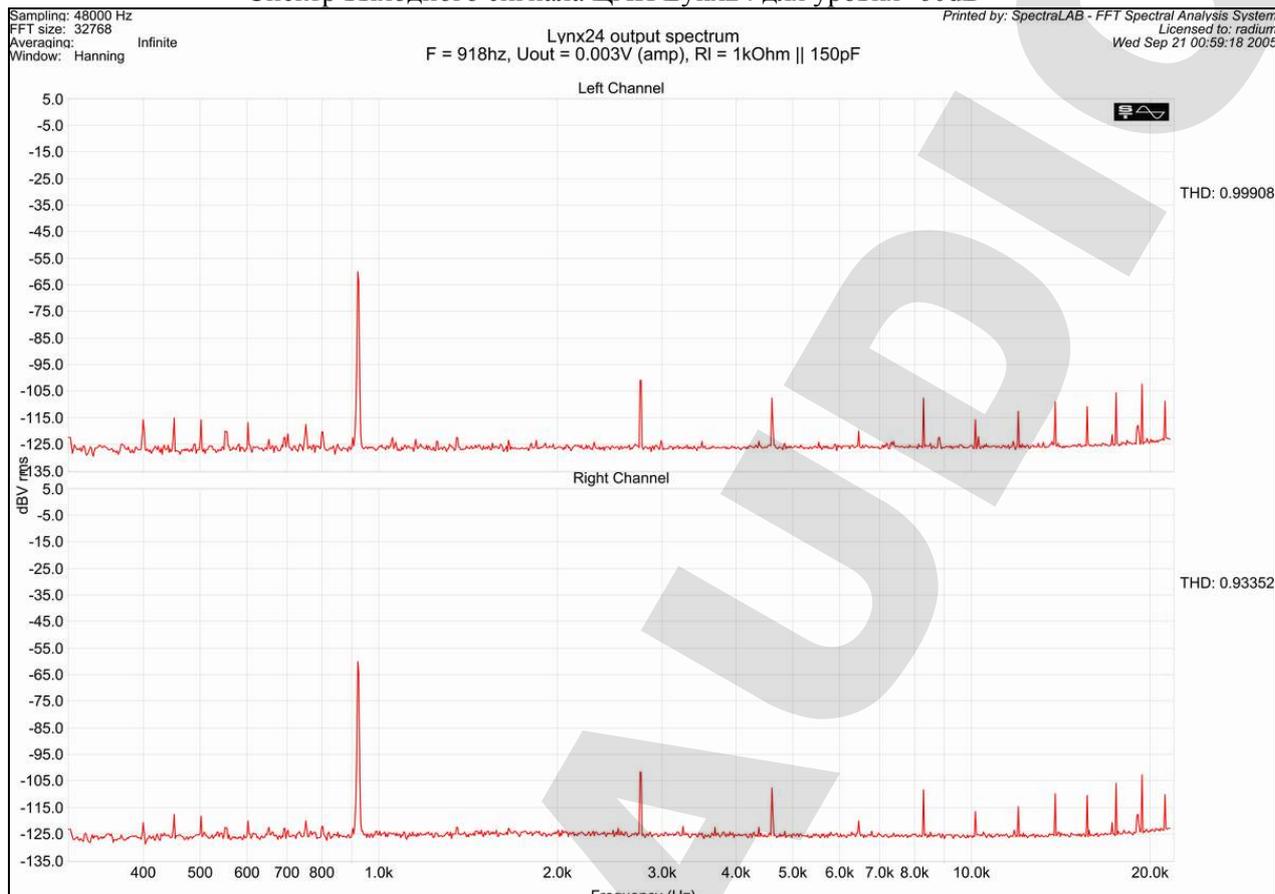
Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx24 для уровня -20dB



Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx24 для уровня -40dB



Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx24 для уровня -60дВ



Авторский экземпляр ЦАП Lynx24 (ЦАП с «грейдом» -К) обладает следующими техническими характеристиками (при частоте дискретизации 44.1кГц):

- | | |
|--|-----------|
| 1) номинальное выходное напряжение, соответствующее полной шкале преобразования, В (RMS) | 2,12 |
| 2) относительный уровень шумов на выходе (при нулевом входном сигнале), дБ | ниже -110 |
| 3) относительный уровень гармонических искажений и помех в полосе частот 45кГц для тестового 16-разрядного сигнала частотой 918гц полной шкалы, дБ | -98 |
| 5) Уровень помех в полосе 100МГц на аналоговых выходах, дБ | ниже -75 |
| 6) RMS джиттер сигнала тактового генератора, пс | менее 6 |

Субъективное звучание ЦАП Lynx24 очень похоже на таковое Lynx20 – нейтральное, прозрачное и чистое, с отличным разрешением и высокой детальностью. Практически полностью отсутствует какая-либо окраска и в результате устройство хорошо выявляет недостатки, как самих записей, так и других звеньев тракта звуковоспроизведения.

Дмитрий Андронников
 Санкт – Петербург,
 Июнь – октябрь 2005г.