Модуль ЦАП Lynx D35 или «о пользе сепаратизма».

Последний из разработанных и реализованных мною звуковых цифроаналоговых преобразователей, Lynx7V3 показал очень хорошие результаты и по опыту длительной эксплуатации как мною самим, так и многими, повторившими его, позволил сделать вывод о достаточно полной реализации возможностей примененной элементной базы.

В результате поиска путей и возможностей по дальнейшему совершенствованию устройства, были выбраны несколько направлений, от которых теоретически ожидалось возможное повышение качества работы устройства. После проведения ряда макетных работ и отсеивания не оправдавших надежды или чрезмерно затратных путей, мое внимание было сосредоточено на следующих направлениях:

- 1) дальнейшее снижение помех в цифровой части схемы.
- 2) оптимизация пересинхронизатора по критерию снижения взаимных помех триггеров и внешних помех от них.
- 3) снижение схемотехническими методами апертурной неопределенности регистров микросхем ЦАП
- 4) оптимизации схемотехники аналоговых цепей и выбора элементной базы. Рассмотрим каждое из направлений более подробно.
- 1) Вопросам, связанным с конструированием цифровых устройств с малыми внешними помехами посвящено огромное количество «наставлений по применению» и монографий. Практически во всех последних моделях моих ЦАП требования, предъявляемые к конструктиву цифровых устройств на основе высокоскоростных LCI, выполнены в максимально возможной (без существенного удорожания устройства) мере. Это применение многослойных ПП со сплошным секционированным по функциональным частям схемы земляным слоем, установка индивидуальных LC фильтров для каждой цифровой микросхемы, трассировка связей на плате без резких неоднородностей дорожек, использование квазиволноводных структур многослойной ПП для передачи наиболее критических и/или высокочастотных сигналов, использование защитных резисторов во всех цифровых цепях передачи сигналов с малым временем нарастания. Кроме того, существенное внимание уделено выбору соответствующей элементной базы. По возможности, следует избегать применения микросхем с избыточным быстродействием, при использовании ПЛИС отдавать предпочтение наиболее медленным грейдам и устанавливать режим малой скорости нарастания для их выходных буферов.
- 2) От качества работы пересинхронизатора в существенной степени зависит величина апертурной неопределенности (джиттера) сигнала команды преобразования ЦАП, от которого в существенной мере может зависеть результирующее качество звучания устройства с высоким разрешением. В большинстве конструкций применяются 8-разрядные регистры типов АС574 или АВТ574. Триггеры этих микросхем имеют очень низкие собственные значения апертурной неопределенности (менее 0.6...1пс) и обеспечивают отличные результаты при работе в пересинхронизаторах. Единственным доступным путем некоторого снижения джиттера является разделение питания триггеров для того, чтобы помехи, создаваемые в шине питания каждым из триггеров, не воздействовали на другие. При абсолютно однородной и одинаковой по отношению к внешнему выводу питания микросхемы, помехи были бы совершенно одинаковыми и не влияли бы на работу триггеров, но поскольку таких условий в реальной микросхеме не наблюдается, возможно определенное взаимодействие триггеров по цепи питания и влияние их помех на апертурные параметры других триггеров кристалла. Способ решения данного вопроса очевиден – это применение индивидуальных триггеров с собственными фильтрами питания. Однако, использование по одному триггеру из состава приборов типа АС74 на каждую линию пересинхронизации не является удачным решением, сильно увеличивая физические размеры пересинхронизатора, и, как следствие, время распространения тактового сигнала до входов триггеров и снижая помехоустойчивость устройства. Выход был найден в применении одноэлементной логики – малые габариты элементов и один триггер в корпусе дают очень удачное сочетание физических и электрических параметров. Питание каждого триггера подается через свой LC-фильтр, что гарантирует практически полную развязку от взаимовлияния на частотах выше 30...50МГц.
- 3) Апертурная неопределенность собственных регистров микросхем ЦАП не может быть изменена путем выбора элементной базы, но, тем не менее, ее можно уменьшить чисто

схемотехническими методами, как-то применение малошумящих стабилизаторов для питания цифровой части микросхем ЦАП и разделение питания по каналам, а также фильтрация помех индивидуальными LC-фильтрами рядом с выводами цифрового питания ЦАП.

4) Это направление наиболее спорное и неоднозначное из всех, поскольку в первую очередь работы по нему опираются на субъективные результаты ввиду того, что измерения в аналоговых сигналах параметров, влияющих на аспекты субъективного восприятия, требует крайне высокой метрологической культуры и очень дорогостоящего оборудования, которое, в первую очередь используется совсем для других задач. Как общие рекомендации, можно принять использование сложных полупроводниковых приборов (напр., ОУ) с минимальным количеством дефектов кристалла, т.е. предназначенных для спецприменений и радиационностойких, пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком, резисторов на основе металлической пленки, электролитических конденсаторов с малой собственной нелинейностью и низким емкостным шумом (в частности, с туннельной составляющей проводимости).

Топология печатной платы в аналоговых цепях оказывает заметное влияние на помехозащищенность цепей. В частности, очень положительным фактором для звука оказалась реализация части сигнальных проводников в виде квазиволноводных линий, это резко уменьшило уровень наведенных помех от цифровой части и из эфира. Крайне существенным фактором является применение выходных Т-фильтров ВЧ-помех, эта простейшая мера существенно улучшает качество работы практически любого устройства с применением ОУ.

Организация питания аналоговых цепей оказывает весьма существенное влияние на работу устройств. Исторически сложилось так, что параллельные стабилизаторы считаются неким обязательным атрибутом звуковых устройств высокого качества. Однако при более внимательном подходе становится ясным, что отличия одного типа от другого принципиальны только в одном моменте — параллельный стабилизатор всегда потребляет неизменный ток от выпрямителя и тем самым исключает модуляцию током нагрузки токов выпрямительных элементов и снимает проблему коррелированных с сигналом помех от переключения выпрямительных элементов. С точки зрения же остальных параметров параллельные стабилизаторы уступают последовательным, и, если решить проблему модуляции тока выпрямителей током сигнала, то можно использовать преимущества последовательных устройств в энерговооруженности, КПД, коэффициенту стабилизации.

Критерии выбора типов элементов для аналоговых цепей были подробно рассмотрены в статьях про Lynx24, Lynx27, Lynx7V3, они являются некоторой «постоянной величиной», связанной с физическими законами, действующими в мире и одинаковы для всех рассмотренных выше и рассматриваемых в дальнейшем устройств.

С учетом вышесказанного, на основе отлично зарекомендовавшей себя конструкции ЦАП Lynx7V3, был разработан новый преобразователь Lynx D35, принципиальная схема которого приведена на рис.1

Цифровая часть нового ЦАП полностью аналогична таковой ЦАП Lynx7V3, со всеми ее особенностями и свойствами, в частности, применением ЦФ типа SM5842 и ПЛИС для формирования настраиваемых таймингов загрузки данных в ЦАП с целью снижения помех от цифровых сигналов и минимизации глитча и глитч-подобных выбросов. Об эффективности данного способа снижения искажений и помех на выходе ЦАП, работающих без УВХ, было подробнее рассказано в статьях про Lynx 27 и Lynx 7V3. Как и во всех предыдущих моделях, используется гальваническая развязка цифровой части от аналоговой, существенно снижающая уровень помех, наводимых на аналоговые цепи.

Регистр пересинхронизации существенно отличается по своему схемотехническо-конструктивному построению от предыдущих устройств. За основу регистра приняты 6 дискретных быстродействующих одноэлементных триггера типа 74АНС1G79. Собственный джиттер таких триггеров составляет порядка 0.6...1 пс при напряжении питания 5В. Тактовые входы триггеров синхронизируются от генератора 786Fs типа GXO7551, GXO-U108 или GXO-U100 (плата рассчитана на установку прибора любого из указанных типов). Все выводы триггеров отделены от внешних цепей собственными защитными резисторами, эта мера гарантирует надежное срабатывание триггеров по фронтам тактового сигнала и высокую помехозащищенность регистра. Каждый триггер снабжен индивидуальным LC- фильтром питания, исключающего взаимодействие элементов по этой цепи. Кроме того, питание всего



регистра из 6 триггеров фильтруется общим LC- фильтром. Таким образом достигается высокая степень фильтрации ВЧ-помех в питании регистра.

В качестве стабилизатора питания применяется стандартная ИС типа 7805 производства КЕС. Стабилизаторы этой фирмы отличает весьма низкий уровень собственного шума и отличная стабильность при работе на нагрузку емкостного характера.

Собственно цифро-аналоговое преобразование осуществляется в микросхемах ЦАП типа AD1862. ЦАП этого типа практически безальтернативны при построении устройств высокого разрешения с нейтральным звучанием, не обладающих собственным «голосом». Это свойство «точности» AD1862 является их «фирменным» знаком и практически не встречается у микросхем ЦАП других производителей. Чаще всего окраска и/или характер звука, вносимые собственно преобразователем, связаны со спектральной структурой искажений и помех на его выходе и практически не устранимы никакими ухищрениями в последующем тракте. Следует, однако, заметить, что иногда такая окраска/характер могут быть и приятными для слухового восприятия, хотя лично мне любая повторяемая окраска не нравится, источник обязан выдавать максимальное количество достоверной информации, а «красиво» уменьшить это количество можно успеть всегда ©.

О свойствах и критериях выбора микросхем ЦАП подробно рассказано в статье про Lynx7V3, поэтому останавливаться дополнительно на этом вопросе не стану, отмечу лишь, что многочисленные эксперименты с большим количеством AD1862 показали практически полную идентичность грейдованных и безгрейдовых микросхем по уровню искажений и шума после калибровки линейности ХП. Поэтому в ЦАП возможно применять ЛЮБЫЕ, но ОРИГИНАЛЬНЫЕ микросхемы. Последнее весьма важно, ибо контрафактные приборы, широко поставляемые ныне из КНР (мне довелось собственными глазами видеть AD1862NZ-J выпуска, судя по маркировке 2007 года и бессвинцовые, чего не бывает в принципе) отличаются довольно высоким уровнем искажений на малых уровнях, неустраняемым никакими подстройками и в 3...100 раз бОльшим уровнем глитча по сравнению с оригинальными приборами.

В качестве преобразователей І/U в ЦАП Lynx D35, в отличие от всех предыдущих конструкций, применены ОУ с ООСН типа ОР42 в военном исполнении, либо в индустриальном исполнении с дополнительной классификацией по радиационной стойкости (для применения на объектах атомной энергетики). Данные ОУ с ПТ на входе характеризуются высокой перегрузочной способностью входа, достаточно хорошими скоростными свойствами и очень высокой линейностью. Двухчастотный тест (9кГц + 10 кГц с пиковым уровнем суммарного сигнала, равным полной шкале) на интермодуляционные составляющие пары AD1862 + OP42 показал самые лучшие результаты из всех испытанных ОУ. Однако такие результаты получаются только при соблюдении ряда условий. Обязательные среди них - защита входа ОУ от самых высокочастотных составляющих помех с выхода ЦАП (ее осуществляют блокирующие конденсаторы С40 и С79 – керамические однослойные группы NP0) и дополнительное замыкание пели ООС по высоким частотам (С30, С67). Емкость этих конденсаторов подбирается экспериментально до получения гладкой ПХ при смене любых кодов на входе ЦАП. Восстанавливающий фильтр с многопетлевой ООС аналогичен таковому для ЦАП Lynx7V3 (о преимуществах такой структуры по сравнению с фильтром Саллена-Келли рассказано в предыдущих статьях), однако выполнен, так же, как и каскад І/U на основе ОУ ОР42. Поскольку данные ОУ обладают недостаточно мощным выходом, то для исключения возможности роста искажений при работе на сложные нагрузки, выходы ОУ умощнены однотактными ЭП с активными нагрузками, работающими в классе А при токе покоя порядка 12мА. ЭП выполнены на транзисторах сборок МАТ01, обладающих удачным конструктивом и параметрами. Применение дополнительного выходного каскада с постоянным потребляемым током позволило снизить актуальность проблемы модуляции помех переключения выпрямительных элементов источника питания НЧ-составляющими полезного сигнала (см. выше). На выходе устройства в обязательном порядке применяется фильтр ВЧ-помех, причем конденсатор фильтра составлен из двух параллельных – полистирольного емкостью 100пФ и керамического NP0 емкостью 22...56пФ, работающего на частотах выше 50...100МГц.

Питание аналоговой части ЦАП выполнено с поканальным разделением. Это позволило оптимизировать структуру трассировки применительно к использованию последовательных стабилизаторов и снизить тепловые градиенты по плате устройства. Основа стабилизаторов – очень удачные малошумящие двуполярные стабилизаторы M5230 производства Mitsubishi. Для

общего питания выходы стабилизаторов умощнены внешними транзисторами, ввиду малого допустимого выходного тока самих микросхем, а питание цифровой части микросхем ЦАП осуществляется непосредственно от M5230. В схемах стабилизаторов приняты меры по гарантированному обеспечению их устойчивости, поскольку при некоторых сочетаниях свойств и величин емкостей и сопротивлений нагрузки, M5230 могут самовозбуждаться. К сожалению, ряд разработчиков не учитывают эти особенности M5230, заставляя их работать на мегафарадные наборы разнородных емкостей, обладающих непонятными свойствами, что приводит микросхемы к генерации и соответствующей деградации звука. С подобными «примерами» мне приходилось встречаться довольно часто. Не могу не отметить выражение безмерного удивления таких «разработчиков», когда после простейшей операции в их стабилизаторе, звучание питаемого устройства по-настоящему преображается ©.

Из общих особенностей устройства отметим, что ЦАП имеет два равнозначных входа — один для однофазных сигналов ТТЛ / КМОП уровней (X2), второй — дифференциальный стандарта RS485 (X1). Первый используется при установке ЦАП в одноблочный проигрыватель и соединении его с сервопроцессором линией передачи сигналов длиной не более 250...300мм, второй — при использовании ЦАП в виде внешнего блока и длине линии связи до 3...5м. Выбор входа осуществляется соответствующей перемычкой на колодке «DF MODE» (X3). Коммутация входов и тактового сигнала осуществляется мультиплексором в ПЛИС. На разъемы входных сигналов выводятся тактовые сигналы с частотой 384Fs или 256Fs, с помощью которых осуществляется синхронизация считывающего устройства. Выводы разъемов X1 и X2 совместимы с таковыми у предыдущих моделей ЦАП.

Режимы работы ЦФ устанавливаются перемычками на колодке X3. В Таблице 1 указаны соответствующие перемычкам функции ЦФ. Установка требуемых режимов может осуществляться как перемычками (лог. 1 соответствует отсутствие перемычки), так и управляющими сигналами ТТЛ/КМОП уровней от внешних устройств.

Таблица 1

Колодка управления режимами ЦФ и ПЛИС ЦАП Lynx D35					
Вывод колодки Х3	Вывод ЦФ Вывод ПЛИС	Функциональное назначение	Режим		
2	55	Выбор формата входных данных	лог.0 = RJ(48,64) лог.1 = I2S48		
4	54	Выбор входа	лог.0 = TTL лог.1 = RS485		
6	3	Выбор тактовой частоты ЦФ	лог.0 = 256 * Fs лог.1 = 384 * Fs		
8	5	Выбор длины входных данных 1	лог.1 = 16 разрядов		
10	21	Дизеринг	лог.0 = включен лог.1 = выключен		
12	19, 20	Заглушение	лог. $0 =$ сигнал есть лог. $1 =$ сигнал отключен		
14	18	Выбор постоянных времени фильтра деэмфазиса 2	лог.0 - для частоты дискретизации 44.1 кГц		
16	17	Выбор постоянных времени фильтра деэмфазиса 2	лог.0 - для частоты дискретизации 44.1 кГц		
18	10	Выбор длины входных данных 2	лог.1 = 16 разрядов		
20	15, 16	Деэмфазис	лог. $1 =$ включен лог. $0 =$ выключен		
22	11	Выбор длины выходных данных 1	лог.0 = 20 разрядов		
24	12	Выбор длины выходных данных 1	лог.1 = 20 разрядов		
26	13	Синхронизация таймингов ЦФ от тактовой частоты	лог.0 = нормальный режим лог.1 = синхронный режим		
28	74	Инверсия выходного сигнала	лог. 0 = не инвертированный лог. 1 = инвертированный		

Конструктивно ЦАП выполнен на четырехслойной двухсторонней печатной плате из материала FR толщиной 1.5 мм размерами 205 х 100 мм с нормированной величиной

диэлектрической проницаемости. Топология «земляного» слоя и сигнальных цепей оптимизирована по критерию наименьших помех в преобразованном сигнале и минимального излучения в окружающее пространство. Для передачи ответственных, с точки зрения помехозащищенности, сигналов в структуре платы сформированы плоские квазиволноводные линии. Использование такого решения для передачи тактового и аналогового сигналов было проверено практически в ЦАП Lynx28 и Lynx7V3 и дало отличные результаты.

Элементная база ЦАП Lynx D35 во многом сходна с таковой для Lynx 7V3. В цифровой части применены SMD резисторы и конденсаторы типоразмера 0805. Здесь лучше применять обычные плоские резисторы ввиду их малой собственной индуктивности (примерно втрое ниже, чем у MELF). Электролитические конденсаторы блокировки цифрового питания и питания цифровой части ЦАП – алюминиевые SMD производства Elna или Panasonic. В цепях питания и блокировки ЦАП и ОУ применены конденсаторы типов Elna Cerafine и Nichicon Muse. В ходе экспериментов выяснился интересный момент – если в питании устройств с параллельными стабилизаторами лучшие субъективные результаты дает применение конденсаторов Black Gate FK, то при работе такого же устройства от стабилизатора последовательного типа лучшие результаты дают Elna Cerafine. Дополнительно «аналоговые» питания блокированы фольговыми полистирольными конденсаторами LCR Components EXFS/HR в непосредственной близости от выводов питания микросхем. В восстанавливающем фильтре применяются MELF резисторы типоразмеров ММА0204 и ММВ0207 производства ВС Components и выводнЫе фольговые полистирольные конденсаторы LCR Components EXFS/HR точностью ±1%.

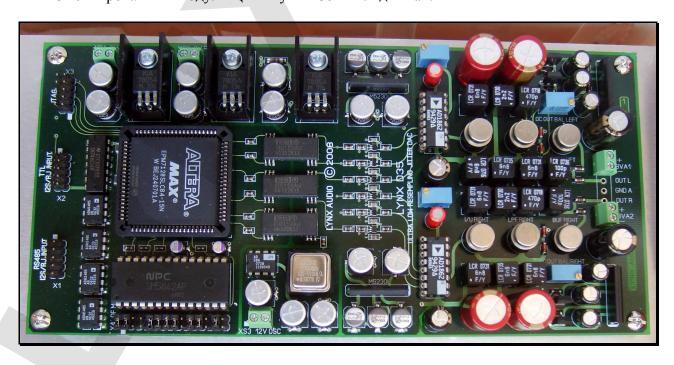
При работе с микросхемами многоразрядных параллельных ЦАП следует иметь ввиду, что даже небольшой перегрев их выводов при пайке может существенно и необратимо ухудшить линейность ХП этих приборов, поэтому ЦАП желательно устанавливать в контактные панельки. Для обеспечения высокой надежности контакта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

Питания устройства осуществляется от 5 независимых стабилизированных источников:

- 1. +9 B 200...250 мA (питание ЦФ и ПЛИС)
- 2. +9 В 50...70 мА (питание регистра пересинхронизации)
- 3. +12 В 30 мА (питание тактового генератора)
- 4. +18 В 50...60 мА (питание положительного плеча аналоговой части левого канала)
- 5. -18 В 50...60 мА (питание отрицательного плеча аналоговой части левого канала)

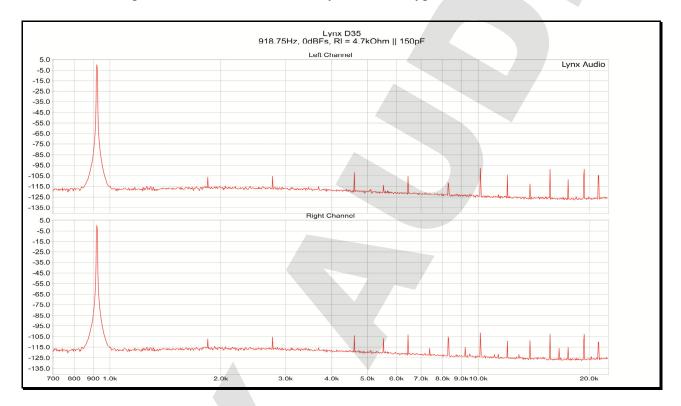
Последние 2 источника первичного питания соединяются вместе и образуют в точке соединения «аналоговую» землю на самой плате ЦАП на «земляном» слое. В качестве источника питания очень хорошо работает плата выпрямителей и первичных стабилизаторов, разработанная для ЦАП типа Lynx7V3.

Смонтированный модуль ЦАП Lynx D35 выглядит так:

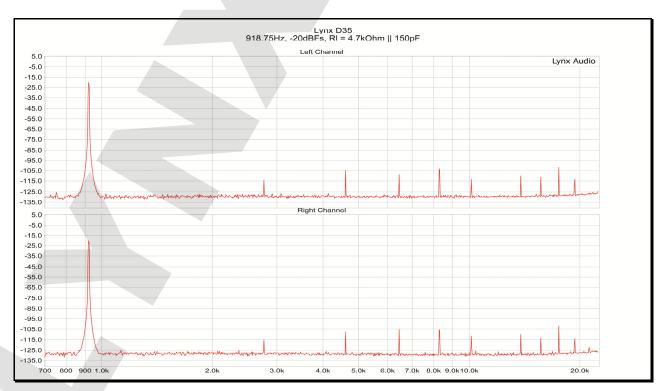


Спектры выходного сигнала для уровней 0 дБ, -20 дБ, -40 дБ, -60 дБ и -80 дБ, снятые с помощью измерительного РСІ АЦП на основе микросхемы АК5395 (с дополнительной калибровкой и программной компенсацией искажений АЦП на сигнале частотой 918.75 Гц от образцового аналогового генератора с уровнем собственных искажений -125 дБ, так, что разрешающая способность АЦП на данной частоте составляла -117 дБ) приведены ниже. Частота дискретизации измерительного АЦП выбрана таким образом, что ее отношение к частоте дискретизации ЦАП составляло иррациональное число. Это позволяет исключить т.н. «искажения наложения», заметно влияющие на результаты измерений.

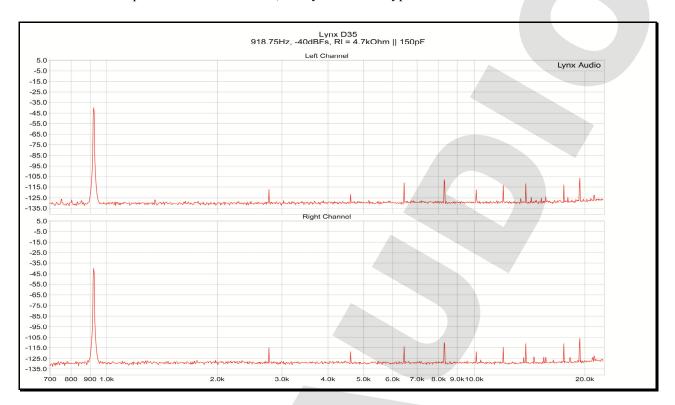
Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx D35 для уровня 0dB



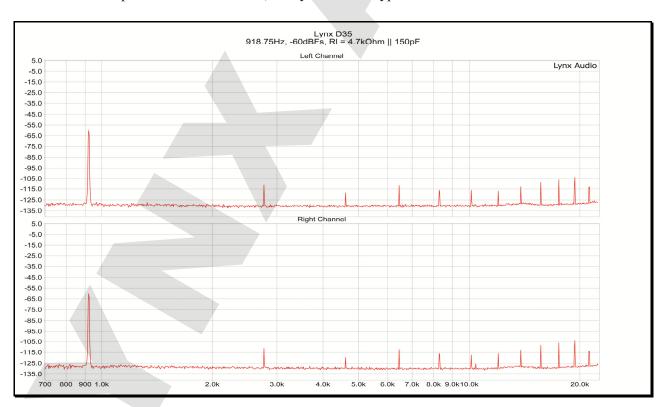
Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx D35 для уровня -20dB

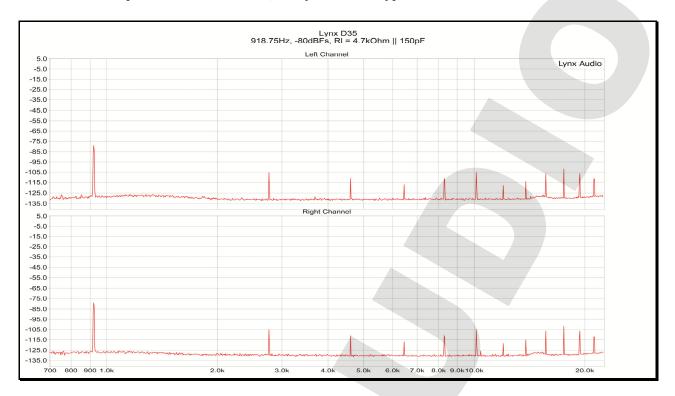


Сспектр выходного сигнала ЦАП Lynx D35 для уровня -40dB



Спектр выходного сигнала ЦАП Lynx D35 для уровня -60dB





Авторский экземпляр ЦАП Lynx D35 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	-116
3) относительный уровень гармонических искажений и помех		
в полосе частот 48кГц для тестового отсчетно – коррелированного		
16-разрядного сигнала частотой 918.75гц полной шкалы, дБ	ниже	-97
4) относительный уровень интермодуляционных составляющих, дБ	ниже	-97
5) Уровень помех в полосе 100МГц на аналоговых выходах, дБ	ниже	-84
6) Динамический диапазон преобразования на уровнях -9020дБ, дБ	более	106

Звучание ЦАП Lynx D35 по своим характеристикам близко к таковому ЦАП Lynx7V3 по отчетливости и точности передачи сцены, при этом обладает несколько более проработанным низкочастотным регистром и спокойным характером высокочастотной части звукового диапазона. В звучании ЦАП сохранены нейтральность и «незаметность в тракте», особенно мною ценимые и свойственные лишь достаточно ограниченному числу схемотехнических и конструктивных решений.

В заключение хотелось бы искренне поблагодарить за помощь и поддержку всех тех, кто прямо, косвенно или опосредовано имел отношение к созданию рассмотренного выше устройства и написанию данного материала: моих товарищей и коллег Сергея Жукова (г. С.-Петербург), Андрея Савинкина (г. Караганда), Андрея Попцова (г. С.-Петербург), Дмитрия Корнеева (г. Москва), Алексея Шалина (г. Воронеж), компании «Платан», «Вест-Эл», «Элкомаг» «Элтех», «Гамма», «ЭФО», «Самоделка.ру», а также моих жену, маму и сына за постоянное внимание, тепло и заботу, без которых невозможно было бы успешное творчество.

Дмитрий Андронников (Lynx Audio) Санкт – Петербург, Март - сентябрь 2008 г.