

Модуль ЦАП Lynx D60.

Лет 10 тому назад, или чуть более того, назад мне случайно попала в руки микросхема ЦАП малоизвестной тогда у нас японской компании Asahi Kasei. Судя по описанию в справочном материале, этот ЦАП не представлял собой ничего особенного и во многом напоминал продукцию небезызвестной Cirrus Logic, никогда не отличавшуюся качеством звучания. По некоторому стечению обстоятельств мне срочно нужно было изготовить простой ЦАП, без особых изысков - гарантированно работающую в неумелых руках надежную и простую в изготовлении конструкцию. Именно на основе той самой микросхемы – AK4394 и был быстро изготовлен ЦАП с SPDIF входом (приемник – DIR1701). Разумеется, я не ожидал чудес от столь посредственной конструкции, и каково же было моё удивление, когда звучание этого ЦАПа при работе от проигрывателя Sony 559 оказалось во многом сравнимо со значительно более серьезными изделиями, стоившими весьма приличных денег (PS Audio Ultralink + Sony 559 и Meridian 508), не говоря уже о разных вариантах ЦАП на основе микросхем Cirrus Logic. Несколько экспериментов по сравнению ЦАП на основе микросхем CS и примерно аналогичных АК показали, что звучание ЦАП Asahi Kasei сильно отличается от звучания ЦАП Cirrus Logic, не обладая визгливостью, яркой синтетичностью и утомительностью последнего, но при этом сохраняя высокое разрешение, четкость проработки деталей и хорошую прорисовку сцены. Кроме того, для себя я отметил спокойный и ровный характер звучания микросхем AK4394 и AK4395, которые тогда имелись в моем распоряжении, и взял на заметку продукцию этой компании, как весьма и весьма удачную...

Прошло 10 лет, и на выставке High End 2011 в славном баварском граде Мюнхене среди немалого количества плохо-, средне- и хорошо- звучащих аппаратов – источников сигнала моё внимание привлек универсальный CD-SACD проигрыватель Esoteric K-01, выделявшийся из общей массы исключительно естественным, наполненным и сбалансированным звучанием. Я несколько раз заходил на стенд Esoteric, и каждый раз при включении этого аппарата, даже, несмотря на всю неудачность выставочных инсталляций, слышал его замечательный «голос». Более подробное знакомство с изделием позволило выяснить, что цифроаналоговое преобразование в этом аппарате осуществляется «топовыми» микросхемами Asahi Kasei – AK4399. И тут я вспомнил события десятилетней давности, когда недорогие ЦАПы этой фирмы показали превосходный результат среди доступных тогда микросхем дельта-сигма преобразователей с встроенными выходными фильтрами. По моему возвращении домой, мы внимательно изучили справочные материалы на последние ЦАП Asahi Kasei, и после небольшого обсуждения приняли решение сделать универсальный ЦАП, использующий такие ЦАП. Первоначально рассматривались два варианта микросхем – это ЦАП AK4397 и AK4399, но ряд не очень существенных, на первый взгляд, параметров однозначно убедил нас в выборе 4399-х.

В связи с широким распространением в последнее время компьютерных вариантов хранилищ фонограмм, очевидно, что модуль ЦАП желательно оснастить набором стандартных и специализированных входов, позволяющих ему работать с разнообразными источниками сигнала – как широко распространенными SPDIF, AES/EBU и Toslink, так и с альтернативными приемниками данных – непосредственно IIS, либо (через соответствующие адаптеры) – USB, Firewire и т. д. ЦАП должен обладать возможностью работы как в ведущем режиме с генерацией мастерклока с низким джиттером собственным генератором, так и в ведомом, принимая восстановленный мастерклок от приемника SPDIF. С учетом этих моментов было решено разместить SPDIF приемник на одной плате с ЦАП, выполнив его на микросхеме AK4115. Ранее у меня был небольшой опыт применения приемников Asahi Kasei (конкретно AK4112), и впечатления от работы этих приемников были неплохими, во всяком случае, явно лучше, чем от CS8414. В свою очередь, AK4115 обладает гораздо лучшими параметрами, чем более старые приемники, в частности, очень низким для приемников с аналоговой ФАПЧ значением джиттера (порядка 70пс) и, что немаловажно, не требует применения внешних конденсаторов для цепи фильтров управителя ФАПЧ и очень проста в управлении в режиме “parallel mode”. В процессе экспериментов с AK4115 подтвердилось очень хорошее качество его работы, субъективно звучание тестового ЦАП при работе с данной микросхемой оказалось не хуже, чем при работе с DIR9001, но при этом AK4115 поддерживает прием данных с частотой дискретизации до 216кГц. Кроме того, эти приемники обладают рядом интересных функций – это автоматический деэмпфазис, осуществляемый фильтром непосредственно в самом приемнике и возможность выбора режима работы ФАПЧ либо с постоянной кратностью мастерклока (напр., 128fs), либо с постоянной частотой мастерклока (24.576 МГц или 22.5792 МГц - в зависимости от сетки). Наличие собственной функции деэмпфазиса позволяет упростить управление микросхемой ЦАП, используя её деэмпфазис только при работе от IIS входов, а выбор режима формирования мастерклока ФАПЧ – оптимизировать тактовую частоту ЦАП в зависимости от типа воспроизводимого материала. Поскольку в “parallel mode” AK4115 способен работать с одним из 4-х входов, то именно таким и было принято количество SPDIF-совместимых входов. Количество IIS входов первоначально также предполагалось четырем, но по габаритным соображениям и разумной достаточности мы ограничились тремя, причем каждый из входов можно независимо от других

конфигурировать на переключение базы частоты дискретизации (44.1/48 кГц), отключение выдачи мастерклока и его частоту (768fs или 384fs). Также для IIS входов независимы сигналы заглушения и деэмпфазиса, для работы используются данные об этих режимах, поступающие от выбранного входа.

При проектировании устройства пришлось задуматься над тем, какой использовать режим управления ЦАП АК4399. При параллельном управлении упрощается сам процесс управления, но теряется возможность использовать функции переключения типа цифрового фильтра (максимальная «прямоугольность» или минимальная задержка) и определения «нулевой» последовательности. Исходя из этого, мы решили управлять режимами АК4399 по SPI, что потребовало некоторого усложнения проекта ПЛИС устройства и его оптимизации.

ЦАП АК4399 имеет выход по напряжению, первичные преобразователи ток - напряжение и ФНЧ у него встроенные. Но очень похоже, что их проектировали весьма тщательно – искажения ЦАП достаточно низкие, а следов помех от ФНЧ на переключаемых конденсаторах практически нет. Обращает на себя внимание необычно большая величина тока, потребляемого по цепи аналогового питания – до 90(!)мА. Это очень большая величина, нехарактерная для других ЦАП с выходом по напряжению. Видимо, аналоговые каскады на выходе микросхемы работают с большими токами покоя, что определяет как их высокую собственную линейность, так и хорошие частотные свойства, а это немаловажно при работе с сигналами с большим уровнем высокочастотных составляющих. В ходе исследования свойств этого ЦАП выяснилось, что его звучание очень критично к организации аналогового питания. Оно резко ухудшается при использовании стабилизаторов с невысокой собственной линейностью, в частности, параметрических параллельных стабилизаторов на стабилитронах даже с невысоким дифференциальным сопротивлением. Наилучший результат дало применение последовательных компенсационных стабилизаторов на основе высоколинейных ОУ, причем отдельных как по каналам, так и для питания и для опорного напряжения.

При проектировании аналоговых цепей устройства особое внимание было уделено обеспечению максимальной линейности схемы и хорошей нагрузочной способности по выходу. Для обеспечения максимально «комфортной» работы ответственного узла – вычитателя дифференциальных сигналов, на него подаются сигналы, уже прошедшие низкочастотную фильтрацию независимую для каждого из дифференциальных выходов ЦАП. На выходе вычитателя используется дополнительный буфер, исключающий влияние внешней нагрузки на работу выходного каскада этого узла. Для обеспечения аналоговых цепей «чистым» питанием применены высоколинейные компенсационные стабилизаторы с апериодической реакцией и шунтирование линий питания высококачественными конденсаторами большой емкости. Такое построение цепей питания, в отличие от всевозможных суррогатных «электронных конденсаторов», гарантирует высокую собственную линейность источников питания, что в результате дает очень чистое, детальное и одновременно живое и естественное звучание.

Принципиальная схема ЦАП Lynx D60, разработанная с учетом всех рассмотренных выше моментов приведена на [схеме 1](#). SPDIF приемник DD1 типа АК4115 осуществляет прием звукового потока от одного из 4-х входов, выбираемых его внутренним мультиплексором. Дифференциальный вход задействован для работы с AES/EBU сигналом и оснащен разделительным трансформатором L1. Три однофазных входа могут использоваться либо для непосредственного приема SPDIF сигнала, либо для приема сигнала с выходов оптических приемников. Режим работы приемника устанавливается сигналами на разъеме XS1 “AK4115 MODE”. В режиме приема SPDIF сигналов тактовые генераторы, обеспечивающие тактовый сигнал в ведущем режиме работы устройства полностью выключены, что достигается снятием напряжения питания с генераторов с помощью специальной схемы коммутации. Такое решение позволяет применять ЛЮБЫЕ кварцевые генераторы на соответствующие частоты, поскольку от них не требуется ни наличия выхода с тремя состояниями, ни полного гашения генерации в неактивном режиме. Объединение выходов генераторов обеспечиваются внешними буферными элементами и коммутаторами питания генераторов. При работе устройства с IIS входами, SPDIF приемник переводится в «спящий режим» и полностью прекращает генерацию тактовых сигналов, тем самым исключая интерференционные помехи между тактовыми частотами.

Сигналы IIS входов через буферные входные элементы DD13 – DD15 подаются на ПЛИС, в которой реализована коммутация сигналов шины IIS как от внешних входов, так и от SPDIF – приемника, выработка всех необходимых сигналов автоматического управления генераторами и микросхем ЦАП и приемника, измерение актуальной частоты дискретизации потока, подаваемого на ЦАП и вывод данных о текущей частоте на внешнее устройство индикации. Каждый из трех входов IIS имеет независимую конфигурацию частотной базы, разрешения выдачи частоты мастерклока, кратности частоты мастерклока и дополнительной кратности входных частот дискретизации. Эти данные устанавливаются для каждого IIS входа индивидуально. В ведущем режиме работы ЦАП один из генераторов тактовой частоты всегда включен. Неработающий генератор полностью обесточивается коммутатором питания и принципиально не создает помех активному генератору. Управление

коммутатором питания генераторов и буферными элементами на их выходах осуществляется сигналами с выходов ПЛИС.

В новом ЦАП, как и в трех предыдущих моделях, не применяется гальваническая развязка аналоговой и цифровой частей устройства из-за большого количества проблем, вызываемых таким решением и неоднозначными результатами его применения. С целью снижения проникновения помех из цифровой части в аналоговую, для передачи данных используется буферная микросхема 74LVC8T245, которая имеет независимые питания сторон А и В при передаче данных. Одна сторона микросхемы питается от +5В цифрового питания, вторая от +5В питания ЦАП. Кроме этого для минимизации помех приняты и конструктивные меры, реализованные в соответствующей топологии печатной платы.

Микросхема АК4399 используется в режиме «последовательного» управления. Необходимые последовательности для его организации формируются в ПЛИС в зависимости от управляющих сигналов. Проект ПЛИС и схема устройства разработаны таким образом, что в рабочем режиме полностью отключены все вспомогательные генераторы, которые включаются только на время выполнения команды по изменению режима устройства. При работе от SPDIF входа возможно только переключение типа цифрового фильтра (наибольшая «прямоугольность» - наименьшее время задержки) и инверсия сигнала, а при работе от IIS входов – дополнительно можно выбрать один из 8 форматов входных данных (4 варианта RJ, 2 варианта LJ, 2 варианта I2S). От микросхемы ЦАП используется своеобразная обратная связь – согласно данных детектора «нулевых» последовательностей осуществляется коммутация реле блокировки выхода. Питание АК4399 осуществляется от 4 малощумящих высоколинейных стабилизаторов на ОУ DA18 и DA19 типа LME49720, транзисторах VT5 – VT8 и ИОН DA20 типа ADR381. Для исключения нештатных режимов, для микросхемы ЦАП после любых переключений режимов генерируется сигнал сброса и только после него записывается новая конфигурация. Кроме того, на время переключения, записи конфигурации и переходных режимов, аналоговый выход устройства блокируется контактами реле на «землю».

Независимые ФНЧ для каждого из 4-х выходов ЦАП реализованы по схеме с многопетлевой ОС, обеспечивающей минимальное значение синфазной составляющей сигнала на входах ОУ и минимальное проникновение ВЧ – составляющих во входные цепи и цепи ООС ОУ. Для фильтров использованы ОУ DA10, DA11, DA14, DA15 типа LME49710. Вычитатели дифференциальных сигналов выполнены на высоколинейных ОУ DA12 и DA16 типа LT1468 с дополнительной буферизацией выходов повторителями на ОУ с ТОС, либо просто буферными микросхемами.

Питание аналоговых цепей осуществляется от компенсационных последовательных стабилизаторов типа «ИОН – ФШ – ОУ», обладающие очень низким уровнем собственных шумов, высокой собственной линейностью и апериодической переходной характеристикой.

Внешний вид двух вариантов собранной платы ЦАП Lynx D60 приведен на рис. 1 и рис. 2

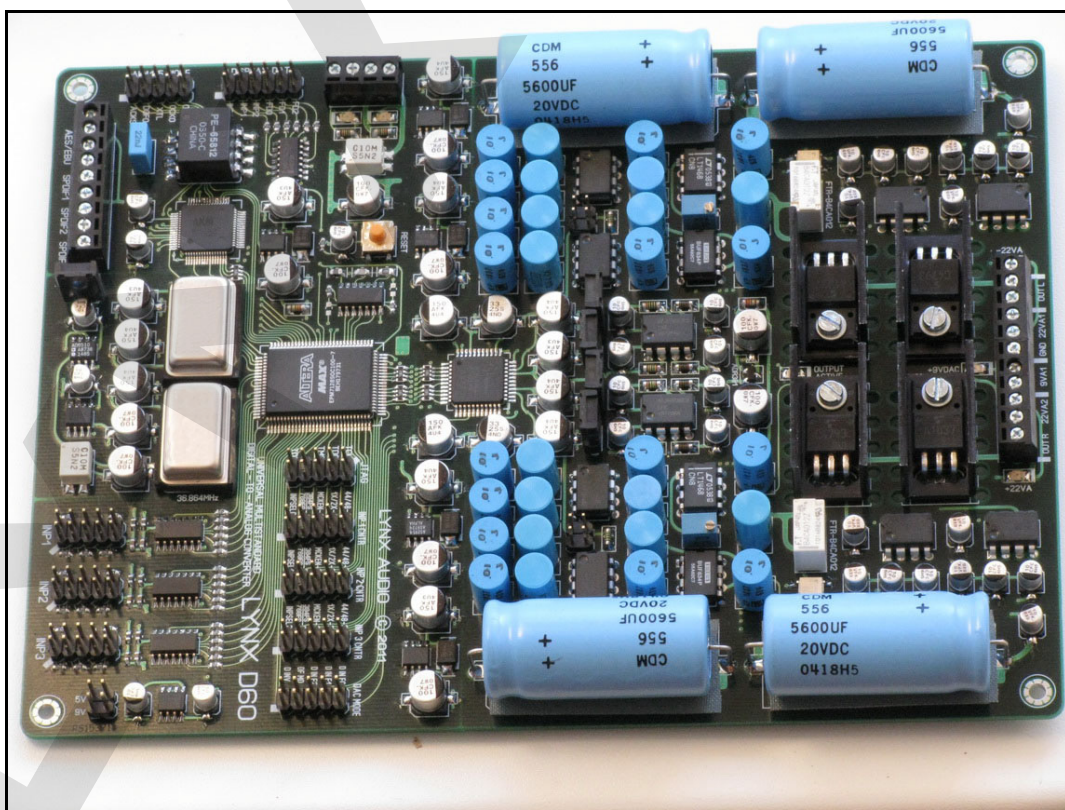


Рис. 2

Вид платы ЦАП Lynx D60 с ОУ в корпусах DIP8

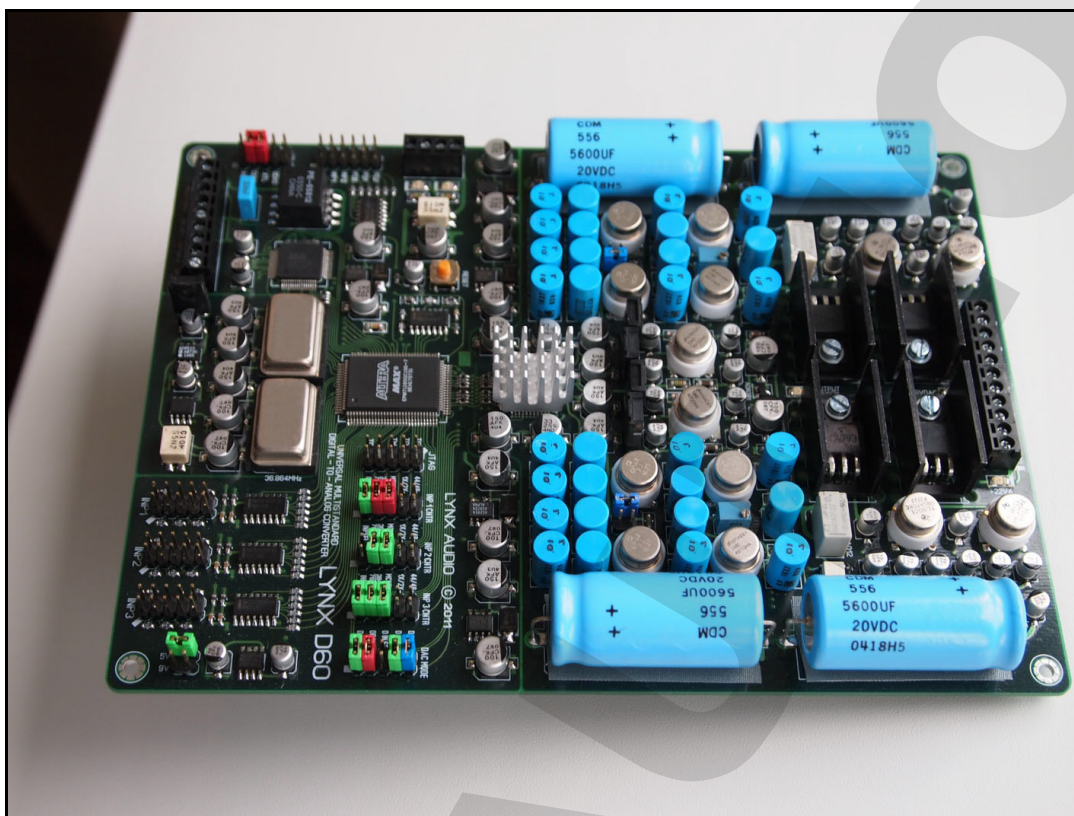


Рис. 3

Вид платы ЦАП Lynx D60 с ОУ в корпусах TO-99 и охладителем для АК4399

ЦАП выполнен на четырехслойной печатной плате 190 x 140 мм толщиной 1.5мм. Применение многослойной ПП позволило в значительной мере избавиться от принципиально неустранимых недостатков одно- и двухслойных плат при их использовании в устройствах с высоким быстродействием цифровых компонентов и широким динамическим диапазоном аналоговых, создать оптимальную топологию земли, сигнальных цепей и цепей питания с минимальным уровнем взаимных помех и реализовать полную экранировку тактовых цепей, тем самым обеспечивая защиту цепей тактовых сигналов с низким уровнем фазового шума от воздействия внешних помех с одной стороны, и резко снизить уровень наводок ВЧ-помех от этих сигналов на аналоговые цепи – с другой.

Плата спроектирована таким образом, что допускает применение различных типов компонентов. Предусмотрена возможность установки любых типов генераторов в корпусах DIL14, DIL8 и SMD 7.5 x 5мм (в т.ч. с неуправляемым выходом), полипропиленовых конденсаторов в аналоговых фильтрах и шунтах питаний – ERO и EMZ типа KP1837 и Wima FKP2, ОУ аналоговых цепей в корпусах DIP8 или TO-99, транзисторов стабилизаторов питания генераторов и ЦАП – в корпусах TO-126 и TO-92MOD, трансформатора типа PE65812 или PE65612. Электролитические конденсаторы аналогового питания могут быть либо аксиальные с размерами корпуса до 40 мм в длину и до 20мм в диаметре (на фото – Cornell Dubilier серии 556), либо SMD с диаметром корпуса 16мм (напр., Panasonic FK 2200мкФ x 25В).

В цифровой части в основном применяются пассивные компоненты типоразмера 0603, только некоторые имеют типоразмеры 0805 и 1206. В аналоговых цепях используются резисторы MELF 0204 и 0207. Электролитические конденсаторы - Panasonic FK SMD типа. Керамические конденсаторы шунтирования питаний АК4399 – 0.1мкФ NP0 производства Murata. АК4399 при работе выделяет значительное количества тепла (до 1Вт) и её корпус желательно снабдить небольшим охладителем, позволяющий снизить температуру кристалла на 15...25 С.

От источников питания ЦАП потребляет следующие токи:

1. +9VOSC – не более 100 мА
2. +9VD – не более 600 мА
3. +9VDAC – не более 150 мА
4. 22VDC1 – не более 200 мА
5. 22VDC2 – не более 200 мА

Схема источника питания ЦАП Lynx D60 стандартная (см. [схему 2](#)). Она содержит два нестабилизированных источника с большой емкостью фильтрующих конденсаторов для питания аналоговых цепей и три стабилизированных источника для питания цифровой части ЦАП (+9В),

собственно микросхемы ЦАП (+9В) и генераторов. Еще один стабилизированный источник (+5В) предназначен для питания системы управления и индикации. Для уменьшения помех все выпрямители выполнены на диодах Шоттки и снабжены ограничителями амплитуды тока заряда конденсаторов фильтра. Для источника питания применяется двухсторонняя плата. Вид собранной платы источника, в котором применены конденсаторы Cornell Dubilier серии 361 приведен на рис.3. Плата допускает установку электролитических конденсаторов диаметром 16 и 18 мм, стабилизаторов в корпусах TO-220 и выпрямительных диодов в корпусах SMA и SMB.

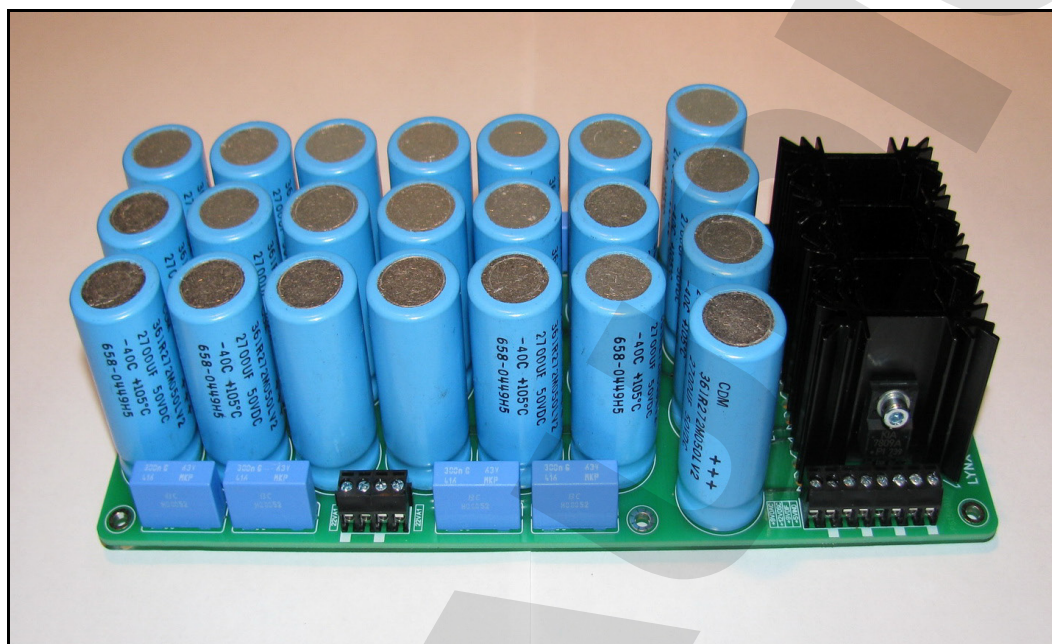


Рис. 3

Вид платы источника питания для ЦАП Lynx D60

На рис. 4...9 приведены спектрограммы выходного сигнала частотой 1 кГц разных уровней и суммарного сигнала частот 19 кГц и 20 кГц с пиковым уровнем -0.5 дБ от полной шкалы.

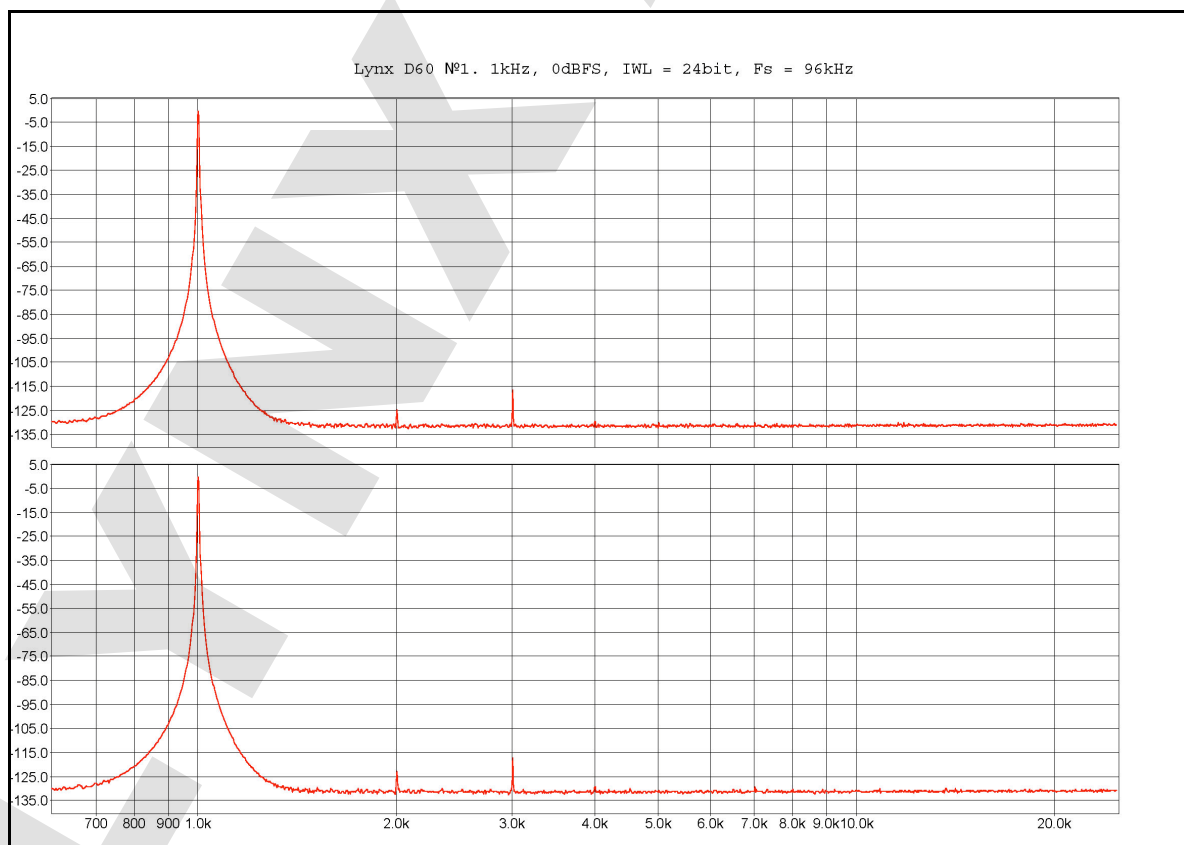


Рис. 4 Спектр выходного сигнала уровнем 0дБ

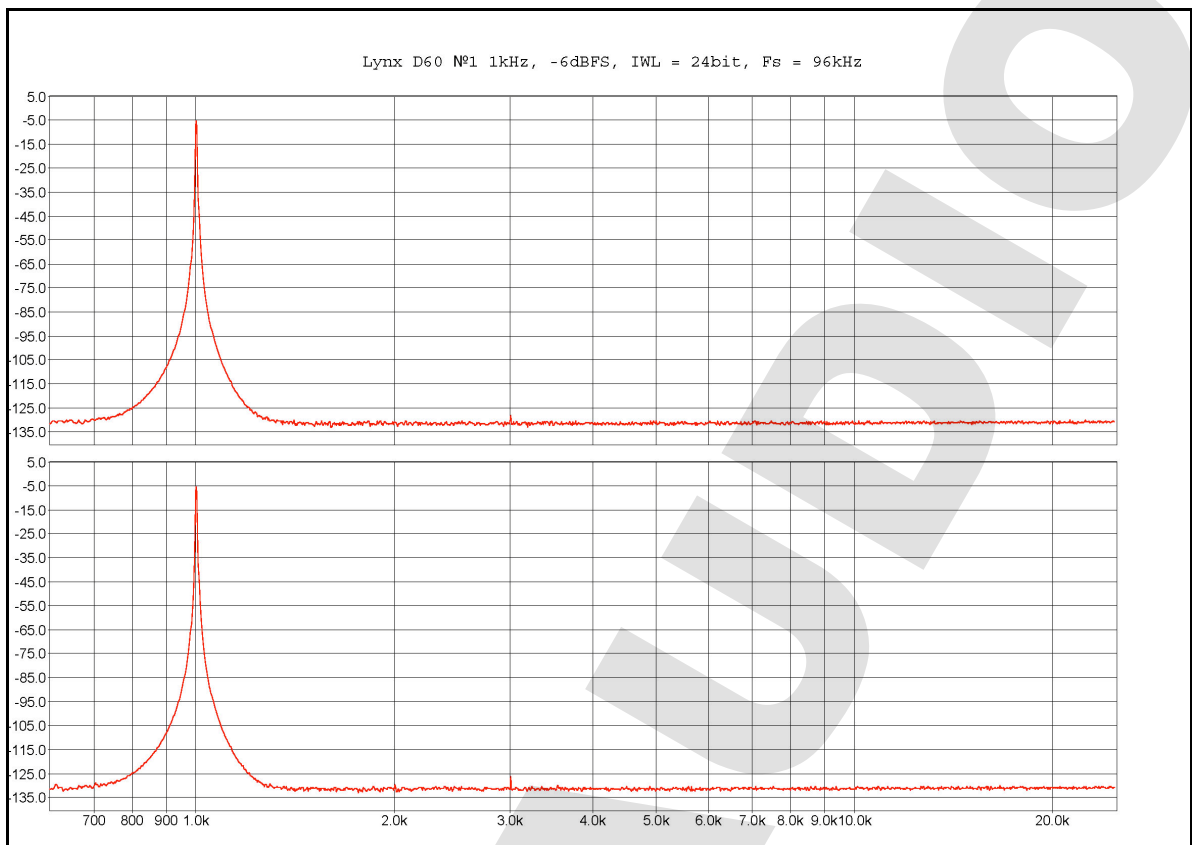


Рис. 5 Спектр выходного сигнала уровнем -6дБ

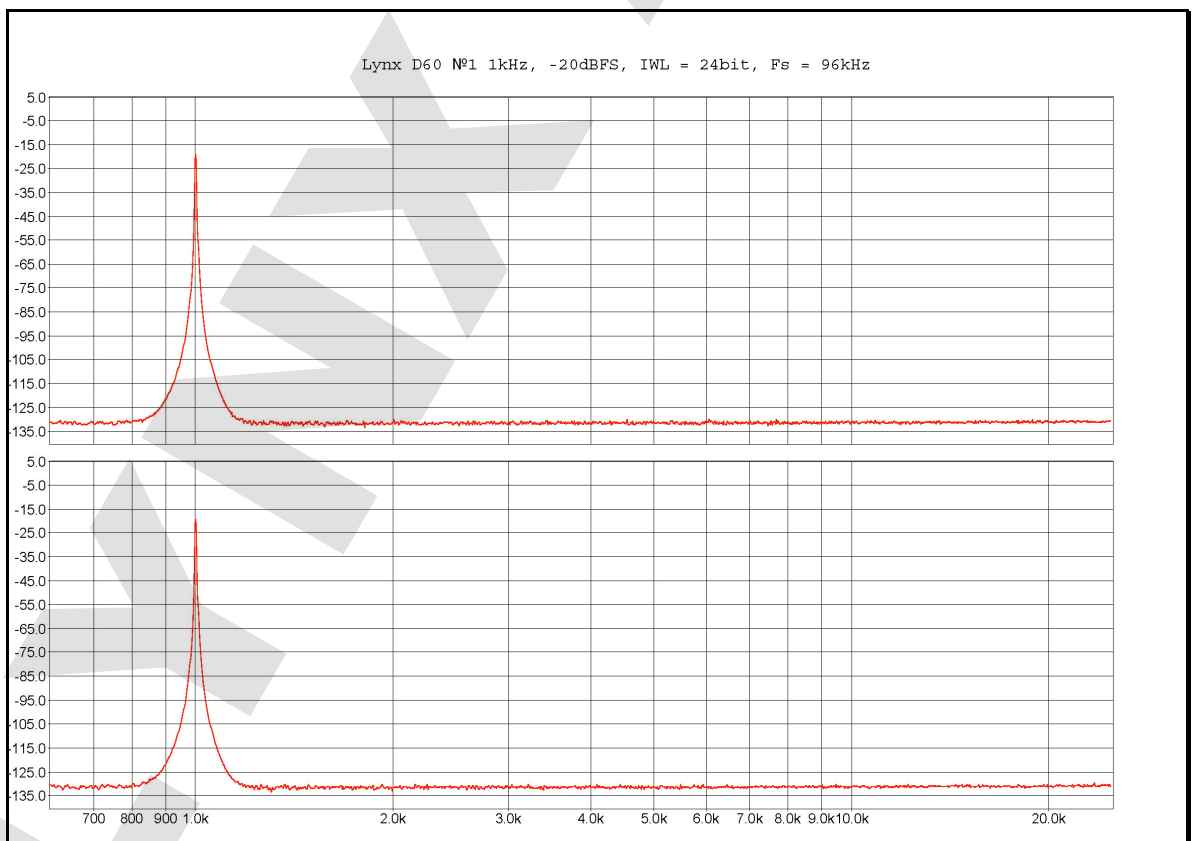


Рис. 6 Спектр выходного сигнала уровнем -20дБ

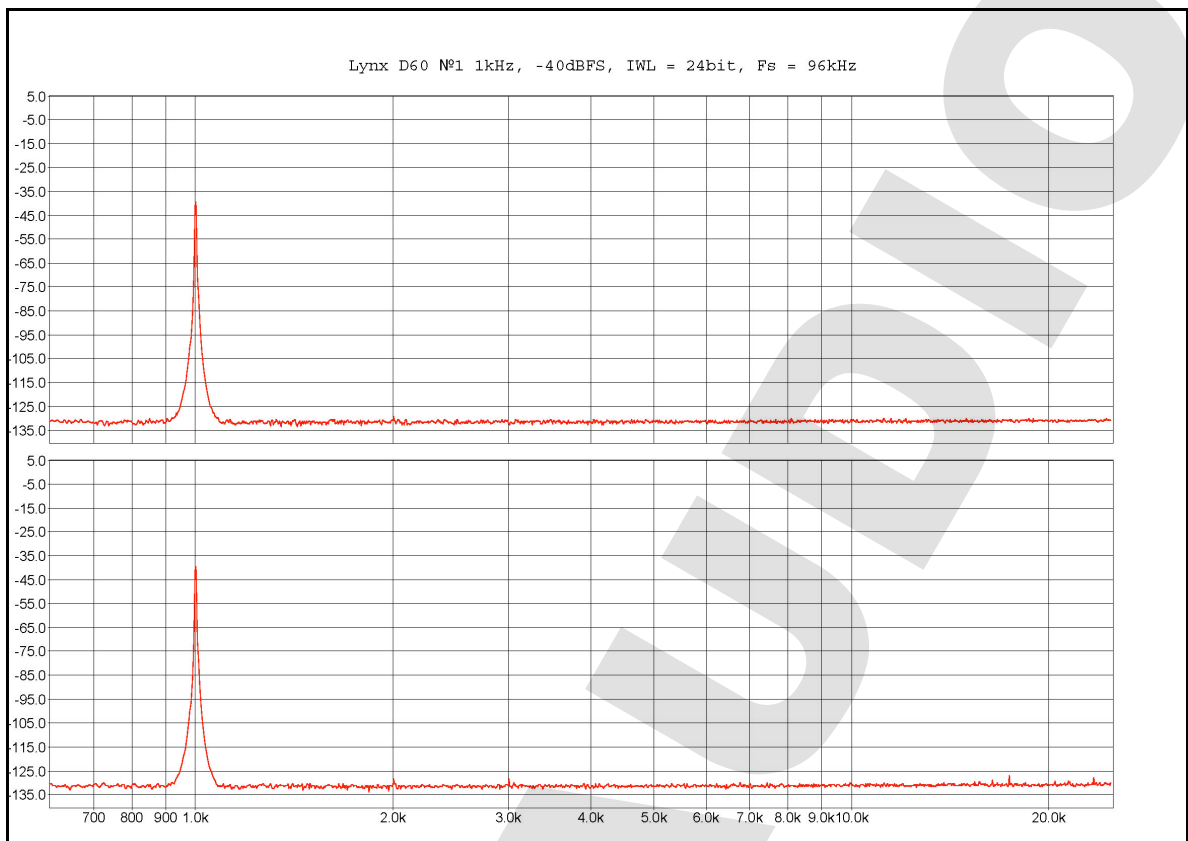


Рис. 7 Спектр выходного сигнала уровнем -40дБ

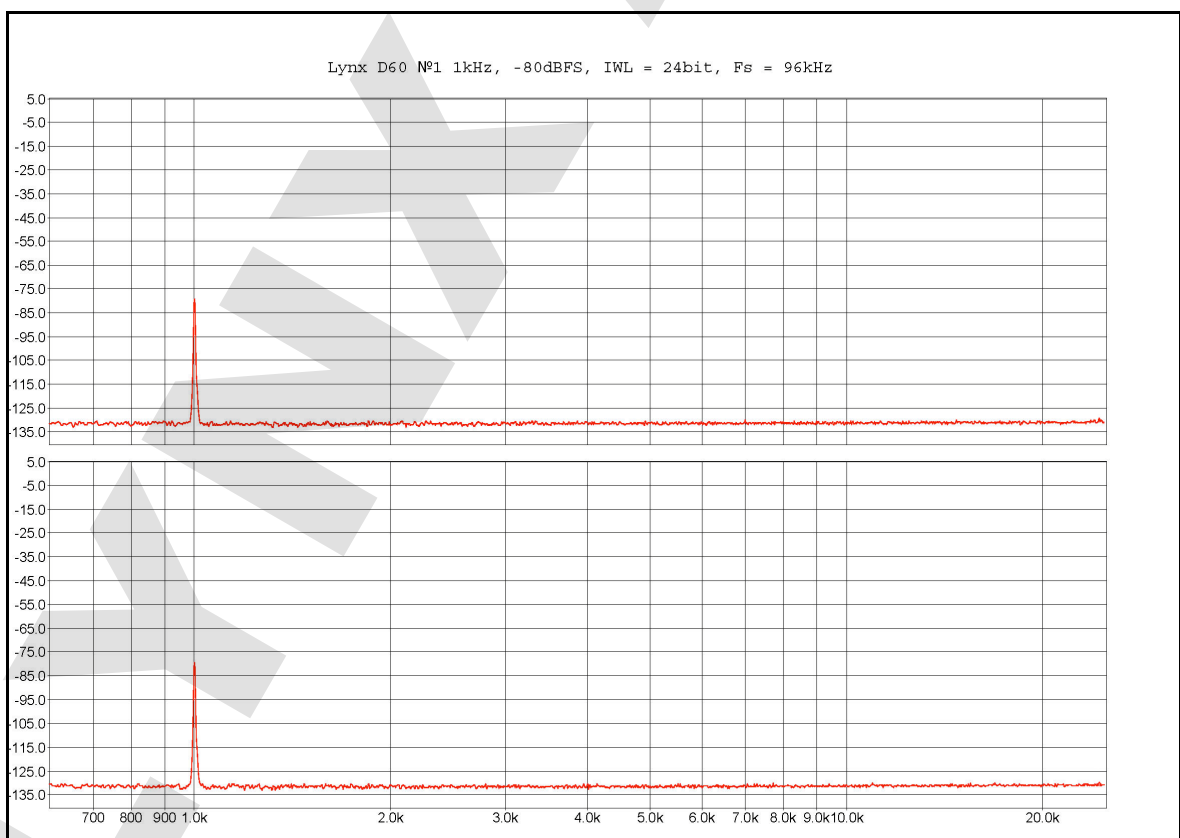


Рис. 8 Спектр выходного сигнала уровнем -80дБ

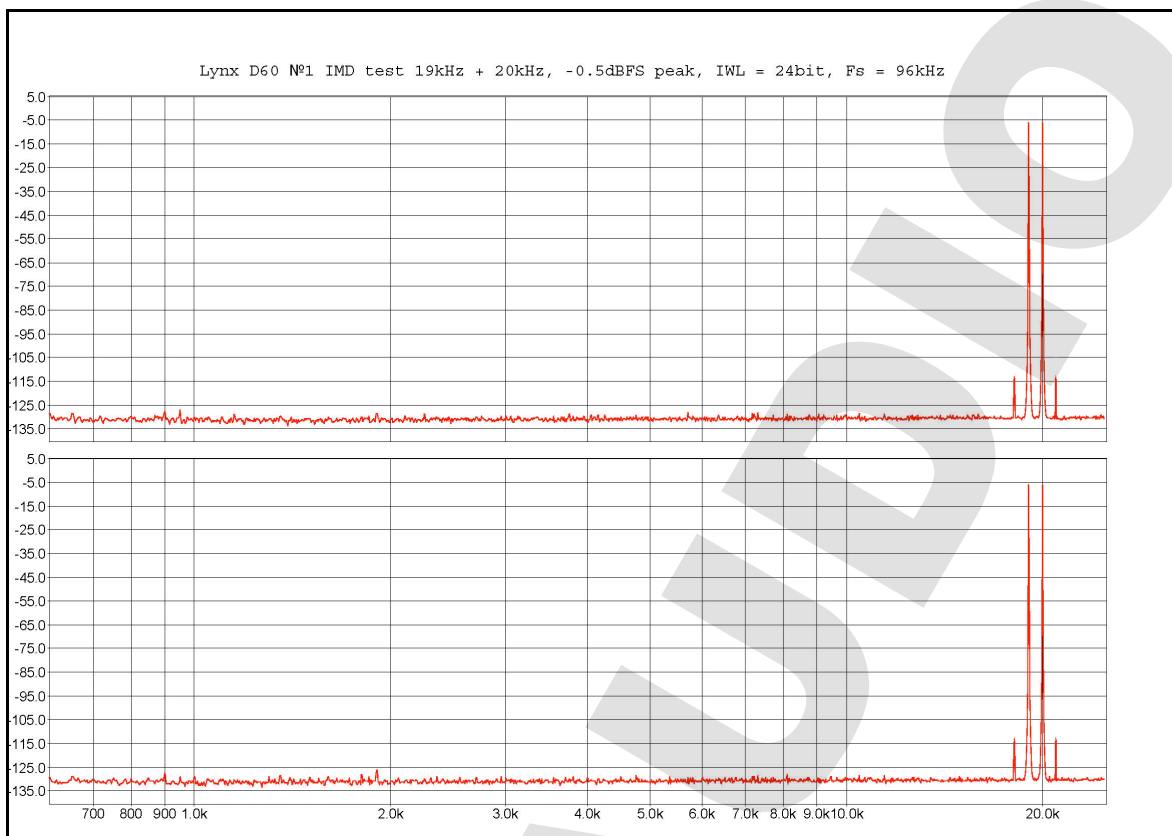


Рис. 9 Спектр выходного двухчастотного сигнала 19 кГц + 20 кГц пиковым уровнем -0.5дБ

Описание назначения выводов разъемов внешних подключений модуля и сигналов управления приведено в [этой](#) таблице.

Первый и второй экземпляры ЦАП Lynx D60 обладают следующими техническими характеристиками:

- | | |
|--|------------|
| 1) номинальное выходное напряжение, соответствующее полной шкале преобразования, В (RMS) | 1.98 |
| 2) относительный уровень шумов на выходе (при нулевом входном сигнале), дБ | ниже -130 |
| 3) относительный уровень гармонических искажений и помех в полосе частот 48 кГц для 24 - разрядного сигнала частотой 1000 Гц полной шкалы, дБ | ниже -117* |
| 4) относительный уровень гармонических искажений и помех в полосе частот 48 кГц для 24 - разрядного сигнала частотой 1000 Гц уровнем -6 дБ от полной шкалы, дБ | ниже -128* |
| 5) относительный уровень интермодуляционных составляющих, дБ | ниже -115* |
| 6) Уровень помех в полосе 100 МГц на аналоговых выходах, дБ | ниже -82 |
| 7) Динамический диапазон преобразования, дБ | более 128 |

(*) уровни искажений измерялись с помощью селективного микровольметра

По впечатлениям от прослушивания ЦАП получился очень музыкальным. Он обладает прозрачным светлым и сочным звучанием и при этом очень четко формирует звуковую картину. Звучание устройства тембрально правильное, очень достоверно передающее звуки и послезвучия натуральных инструментов, таких как скрипка, саксофон, акустическая гитара и др. D60 слушали и профессиональные музыканты и музыковеды. По их словам, совершенно точно определяется на общем фоне инструментов тот, на котором они играли при записи данной фонограммы. Также было подмечено,

что для этого устройства характерны тембральная и пространственная достоверность звучания и точная передача масштаба музыкальных инструментов, обеспечивающие реализм восприятия фонограммы. ЦАП полностью раскрывает потенциал не только CDDA, но и форматов высокого разрешения, и все огрехи которые происходили при записи, от него скрыть невозможно.

Lynx D60 легко справляется как со сложными классическими произведениями в исполнении больших и малых составов, так и с эстрадной музыкой. Длительное прослушивание не вызывает утомления, устройство может быть использовано и для детального аналитического разбора музыкальной записи, и для легкого фонового воспроизведения любых музыкальных жанров.

В заключение хотим выразить признательность нашим друзьям и коллегам, чья доброжелательность, своевременные советы и поддержка способствовали успешному процессу создания данного устройства, нашим семьям, чья любовь и терпение сделали возможным само творчество и компаниям – поставщикам электронным компонентов и продавцам аукциона eBay, своевременно и точно выполнивших наши заказы при заказе деталей.

Дмитрий Андроников (Lynx Audio)

Сергей Жуков (Lynx Audio)

Мюнхен - С.-Петербург - Москва – Малая Вишера
май - сентябрь 2011 г.