

Лунх РА21. Великая симметрия сил природы.

Усилитель, предлагаемый вниманию, относится к классу так называемых «цирклотронов» - симметричных усилителей с выходным каскадом на элементах одного типа проводимости.

Если для ламповых двухтактных схем с выходными трансформаторами вопросы асимметричности элементов выходного каскада имели значение только в смысле различий величин параметров примерно одинаковых элементов, то в дальнейшем, с появлением полупроводниковых приборов и усилителей с бестрансформаторным выходом, проблема симметрии двухтактных схем стала одним из краеугольных камней. Первоначально казалось, что решение лежит на поверхности – нужно всего лишь создать и использовать транзисторы обратной структуры, как бы взаимно дополняющие, комплементарные. Но, как и всегда в действительности, проблема оказалась гораздо сложнее, чем представлялась изначально. Как выяснилось, абсолютно комплементарных транзисторов не существует по определению – просто из-за различных свойств носителей в полупроводниках разного типа проводимости.

И снова, даже с появлением весьма близких по некоторым параметрам биполярных и полевых транзисторов разных типов проводимости, полностью симметричных усилителей не получилось... Главным выводом можно считать понимание того, что истинной симметрии схемы можно ожидать лишь при применении в двух плечах двухтактного усилителя одинаковых элементов, работающих в одинаковых режимах. Для бестрансформаторных схем таким свойством будет обладать лишь схема мостовая схема, или, иными словами цирклотрон.

Принцип действия и схемы ламповых цирклотронов были запатентованы в начале 50-х годов прошлого века в США (пат. №2705285 и №2828369). Но особого распространения эти устройства не получили – для них требовались более сложные и дорогостоящие источники питания, чем для обычных двухтактных каскадов, а упрощение конструкции выходного трансформатора в эпоху расцвета их производства принципиальным моментом не являлось. Кроме того, для возбуждения ламп цирклотронов требовался сложный драйвер с очень большой амплитудой выходного напряжения при малом уровне искажений. И зачастую низкий уровень искажений самого цирклотрона многократно перекрывался искажениями в драйверном каскаде. По этим и ряду других причин ламповые цирклотроны не стали массовыми устройствами, а так и остались довольно ограниченной группой усилительных устройств.

В нашей стране в 70...80-е годы прошлого века симметричные усилители – цирклотроны на полупроводниковых приборах были описаны в нескольких публикациях в журнале «Радио» [1]-[3] и были достаточно популярны у радиолюбителей. Общим недостатком указанных устройств являлось то, что для их нормального функционирования требовалась достаточно эффективная система термостабилизации выходного каскада. Кроме того, существенными оказывались ограничения качественного характера, в частности, достаточно жесткий спектр искажений. Ну и, конечно же, отсутствие защиты нагрузки от неисправностей в усилителе или источнике сигнала (при реализации систем со связью по постоянному току) существенно снижало круг тех, кто был готов повторить такие усилители.

Впоследствии схема усилителя была модернизирована [4] – с переводом выходного каскада на полевые транзисторы. В данном варианте, благодаря уникальным свойствам примененных транзисторов с горизонтальной структурой типа КП904, обладающих отрицательным ТКС канала, а также весьма малыми и стабильными емкостями затвор-исток и затвор-сток, удалось реализовать достаточно простое устройство с отличными параметрами и хорошим звучанием. Такому усилителю не требовалась специальная термостабилизация, транзисторы сами ограничивали ток покоя при нагреве. Однако, малая крутизна характеристики КП904 не позволила получить значительной выходной мощности при раскачке выходного каскада от ОУ с питанием $\pm 15\text{В}$. В принципе, увеличить крутизну (а, соответственно, и выходную мощность усилителя) можно, соединив транзисторы выходного каскада по несколько штук в параллель (для КП904 это не требует никаких дополнительных усилий), но, учитывая, что КП904 в 1986 году стоили по 90 руб. за штуку (что составляло немного больше половины месячной зарплаты

инженера), такое решение в те годы было очень проблематичным. Кроме того, этой схеме присущи и другие недостатки. Во-первых, это применение в усилителях напряжения весьма неудачных ОУ 574УД1. По сути, данные приборы являют собой сильно ухудшенную копию неудачных (по признанию фирмы-разработчика, выпускавшей их весьма короткий срок) приборов типа AD513. Нагрузочная способность их выходов крайне мала, напряжение смещения и термодрейф велики, искажения быстро растут при увеличении амплитуды выходного напряжения более 3...5В. Во-вторых, предложенная схема не является полностью симметричной. Дело в том, что одно плечо работает, как инвертирующий усилитель, а второе – как неинвертирующий. Это означает, что глубина ООС и её тип в разных плечах различны. То есть полной симметрии свойств усилителя не получается.

Прошли годы, в мире очень многое изменилось. Сменились поколения электронных приборов, технологические процессы, номенклатура, цены и т.д. МДП транзисторы с горизонтальной структурой были признаны бесперспективными для ключевых устройств (в которых применяется 99% мощных МДП транзисторов, выпускаемых в настоящее время) и их выпуск в мире был практически полностью прекращен. Но от этого свойства транзисторов никуда не делись – они всё также обладают отрицательным ТКС канала, очень небольшими и слабо меняющимися в зависимости от режима междуэлектродными емкостями и высокой линейностью проходной характеристики. За последние 25 лет было разработано и освоено в производстве большое количество несравненно более совершенных ОУ, чем 574УД1, стали доступными высококачественные конденсаторы и высоковольтные диоды Шоттки.

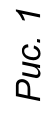
Соответственно появилась возможность вернуться к теме полупроводниковых цирклотронов на другом, более высоком технологическом уровне. Рассматриваемый усилитель Lynx PA21 разработан на основе устройств, описанных в [1] – [4], но лишен органических недостатков, присущих их схемным решениям и элементной базе. При проектировании была поставлена задача создания максимально симметричного усилителя мощности, обладающего малым уровнем искажений и хорошим субъективным звучанием. Кроме того, устройство должно обеспечивать защиту акустических систем при любых неисправностях усилителя или источника сигнала с гальванической связью со входом усилителя.

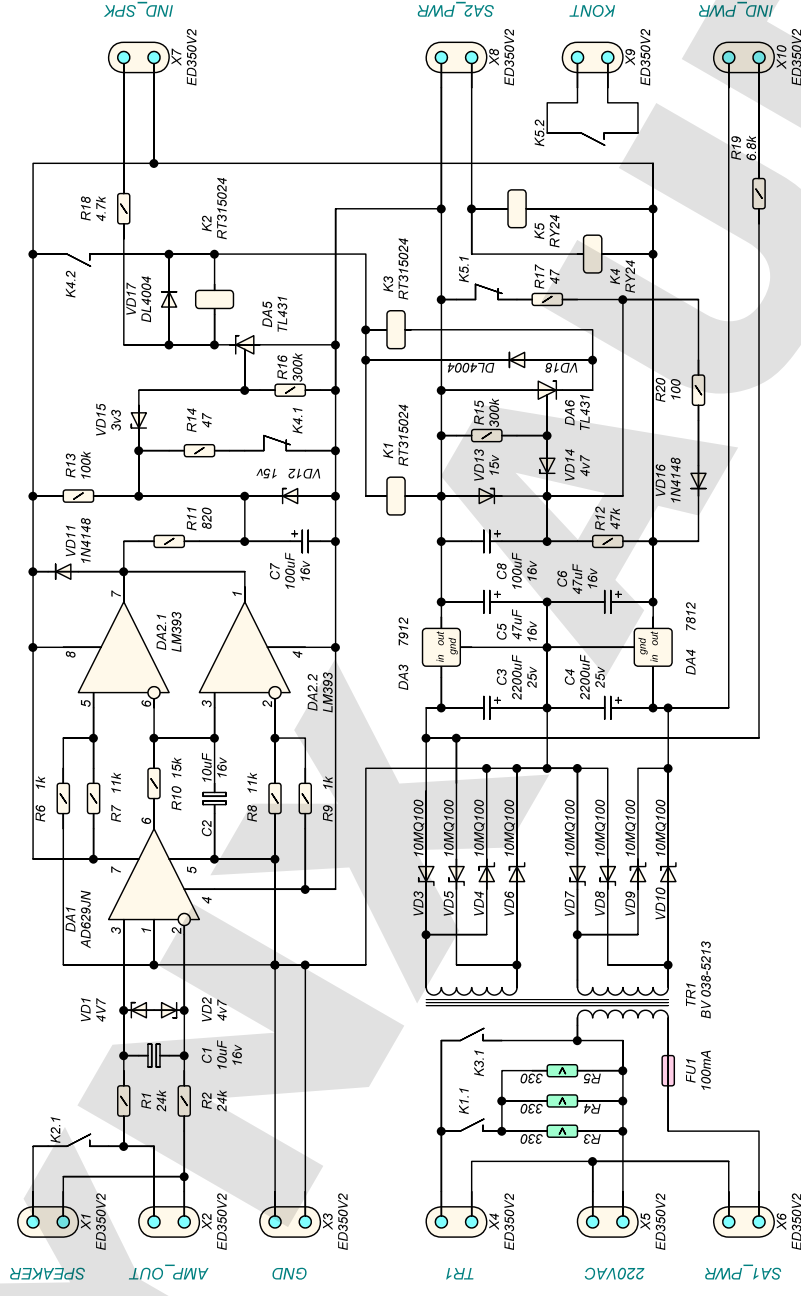
Принципиальная схема усилителя приведена на рис.1, схема одноканального устройства защиты АС и софтверта – на рис.2, двухканального – на рис.3

Выходной каскад усилителя выполнен по схеме цирклотрона, в каждом плече работают по 4 включенных параллельно транзистора типа КП904(VT5-VT8 и VT9-VT12). Выходной каскад вместе с двумя независимыми источниками питания образует мостовую схему. Выпрямители питания каждого плеча выполнены на мощных диодах Шоттки с шунтирующими конденсаторами для снижения помех от коммутации диодов. На плате усилителя установлен только один конденсатор фильтра большой емкости на каждый выпрямитель. Для увеличения емкости фильтра предусмотрены клеммы подключения внешних батарей конденсаторов. Возбуждение цепей затворов транзисторов выходного каскада осуществляется от драйверов на ОУ DA2 и DA3 типа OP42 (возможно применение других типов – об этом далее) с дополнительным транзисторным буфером на выходе. Применение умощняющего каскада на выходах ОУ позволило существенно снизить искажения на высоких частотах, улучшить устойчивость драйверов при работе на входную емкость ПТ и снижает нагрузку на верхнее плечо выходного каскада ОУ за счет тока цепи, задающей смещение выходных транзисторов. Оба плеча цирклотрона выполнены в виде идентичных инвертирующих усилителей, охваченных глубокой ООС. Питание драйвера выбрано $\pm 18В$ – максимально возможное для большинства типов ОУ.

Смещение транзисторов выходного каскада задается с помощью регулируемого ГСТ на транзисторе VT13, ток которого создает стабильное падение напряжения при протекании через резисторы R31 и R32. Ток покоя устанавливается с помощью потенциометра R38, задающего ток ГСТ.

Оба плеча усилителя мощности получают противофазные входные сигналы от фазоинвертора на дифференциальном усилителе DA1 типа THS4131. Приборы этого типа





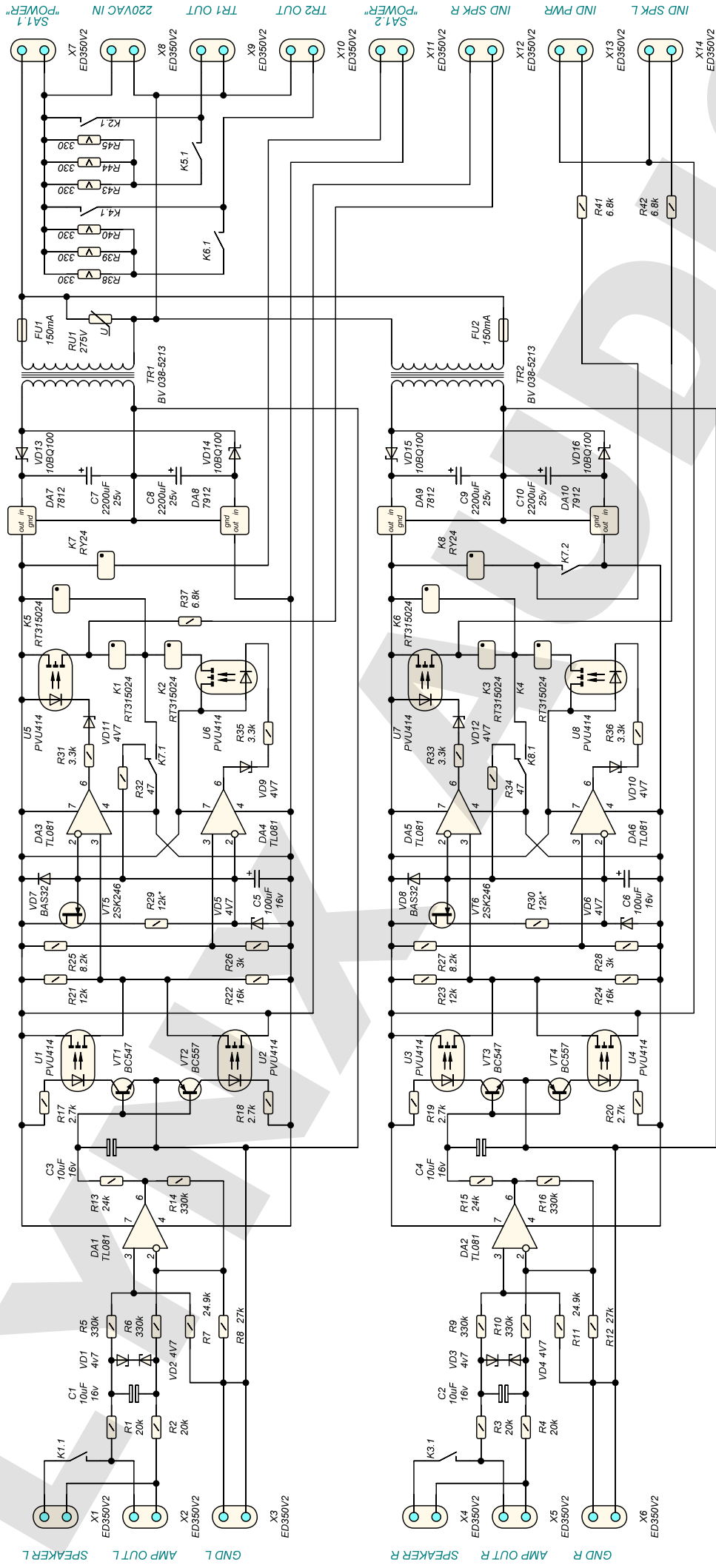


Рис. 3

обладают очень низкими собственными искажениями и дают на выходе строго симметричные сигналы в широком диапазоне частот (до нескольких МГц). В процессе проектирования были испытаны различные типы фазоинверторов (трансформаторы с симметричными выходными обмотками Lundahl LL7905, Hashimoto HL-10K, каскад с разделенной нагрузкой, дифференциальный каскад, инвертор на ОУ), но безусловно лучшие результаты, как объективным параметрам, так и по субъективной оценке звучания, были получены с дифампами THS4131. Для облегчения теплового режима микросхемы фазоинвертора и снижения термодрейфа, питание этого каскада выбрано немного пониженным по сравнению с номинальным. Установка нуля на выходе усилителя осуществляется регулировкой смещения в фазоинверторе с помощью потенциометра R4, заведенная на вход каскада.

Для защиты нагрузки усилителя от постоянного тока и задержки подключения АС после включения питания были разработаны два варианта системы защиты. Особенность работы систем защиты с мостовыми усилителями заключается в том, что нагрузка таких усилителей не связана с общим проводом и её потенциал относительно общего провода может быть различным. Кроме того желательно обеспечить небольшую емкость, нагружающую оба выходных провода усилителя к «земле», и, по возможности – достаточно высокое активное сопротивление, чтобы не нарушались режимы работы системы подачи смещения в выходном каскаде. Первый вариант (рис. 2) предназначен для работы с одним каналом усилителя мощности в случае моноблочного исполнения. Детектор дифференциального постоянного напряжения выполнен на основе специализированного дифференциального усилителя DA1 типа AD629 и «оконного» компаратора. В качестве пороговых элементов реле времени применены стабилизаторы TL431. Устройство, кроме задержки подключения нагрузки и её защиты от постоянного тока, также обеспечивает ограничение пускового тока первичной обмотки сетевого трансформатора и соответствующее ограничение пускового тока заряда конденсаторов фильтров при включении усилителя.

Второй вариант системы защиты (рис.3) выполняет те же самые функции, но предназначен для работы в однокорпусном двухканальном усилителе и отличается по схеме. В нем специализированный дифференциальный усилитель заменен обычным ОУ с соответствующими внешними цепями, а в качестве оконного компаратора использованы транзисторы с оптронными ключами в коллекторных цепях, как это было сделано в системах защиты усилителей Lynx11... Lynx17. Времена задержки подключения АС и ограничения пускового тока задаются конденсаторно-компараторным реле времени.

Все системы защиты питаются от собственных автономных источников питания, не связанных с питанием усилителей мощности, что гарантирует надежную защиту акустических систем в любых ситуациях.

Внешний вид собранных плат усилителей мощности и одноканальных модулей защиты показан на рис. 4 и рис. 5 соответственно, вид платы усилителя и выходных транзисторов, смонтированных на радиаторе корпуса Pesante Dissipante 3U – на рис.6, а общий вид усилителя (с двухканальной системой защиты) в процессе монтажа в корпус – на рис.7. Платы усилителей мощности имеют размеры 170 x 92.5 мм и предназначены для установки на радиаторы-боковые стенки корпусов высотой от 3U. Размеры радиаторов зависят от допустимой температуры устройства и выбранного тока покоя. Так, использование корпуса Pesante Dissipante 3U глубиной 400мм (http://www.modushop.biz/ecommerce/cat143_l2.php?n=1) позволяет при токе покоя 0.75А получить температуру корпуса и радиаторов не более 42...45°C при работе усилителя в течение 10 часов и более.

Платы усилителей мощности рассчитаны на установку, в основном, выводных деталей. SMD компоненты применяются лишь в цепях затворов выходных транзисторов (резисторы MELF типоразмера 0204, защитные стабилитроны и диоды), ограничительные резисторы в цепях коллекторов повторителей буферов и резисторы ограничения тока заряда конденсаторов в выпрямителях питания драйверов и фазоинвертора.

В процессе работы над усилителем было опробовано довольно большое количество различных ОУ для драйверных каскадов: AD845, AD843, OPA627, LT1122, OP42, AD744,

LME49710, AD847, AD825, EL2044, NE5534, LF356, OPA827, OPA132, OPA604, OP176, дискретные Burson Audio HD Audio Opamp.

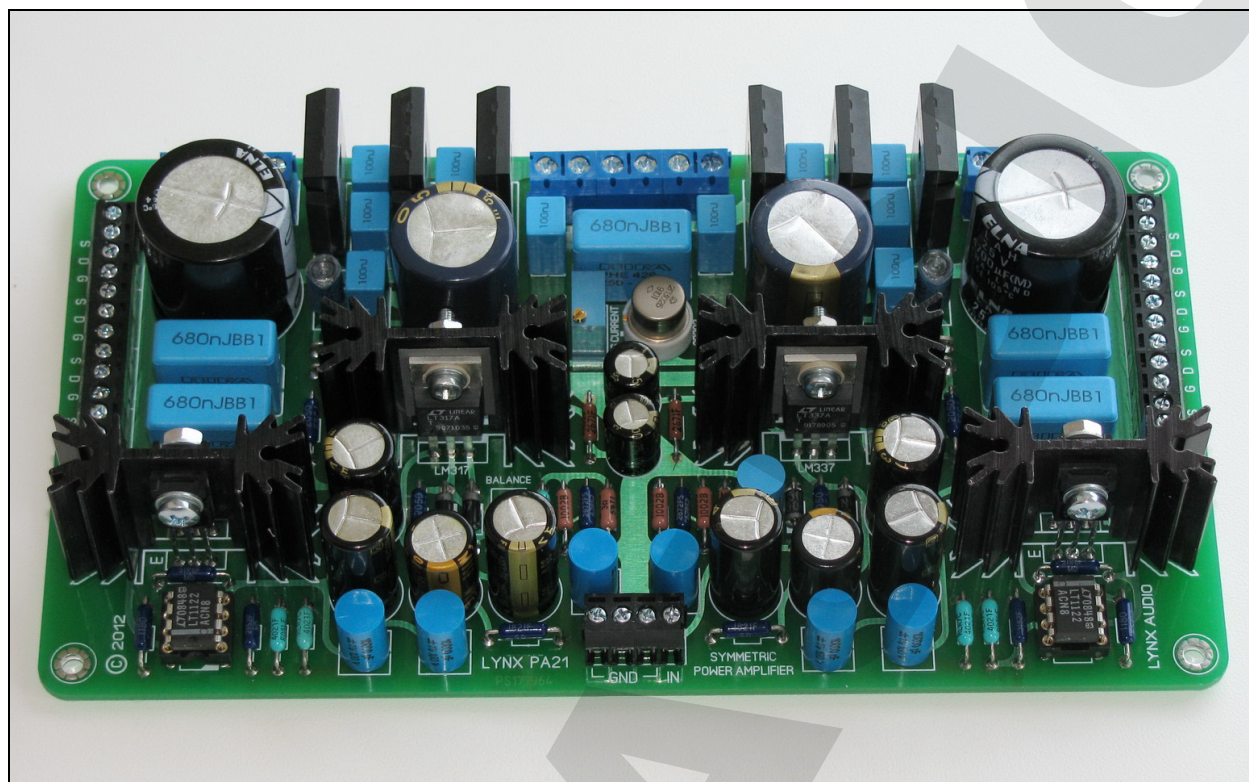


Рис. 4 Смонтированная плата усилителя мощности Lynx PA21

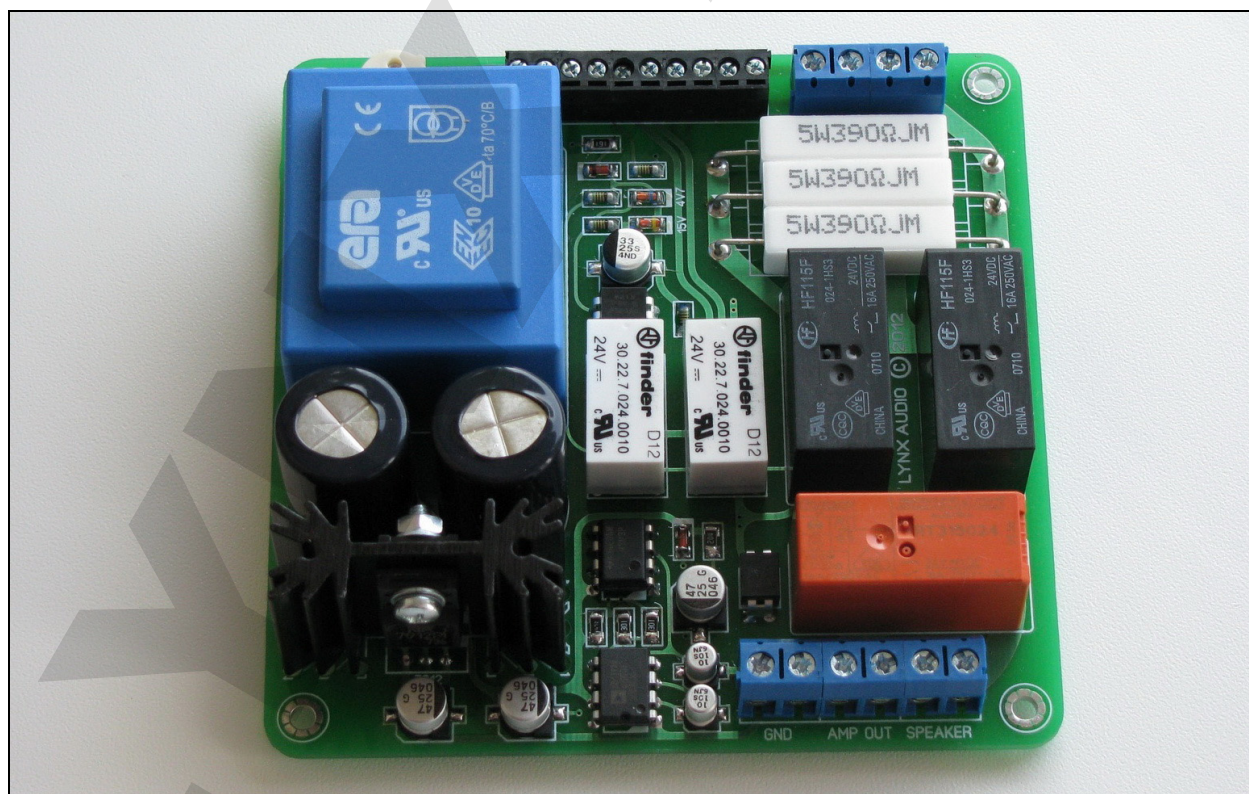


Рис. 5 Смонтированная плата одноканальной защиты Lynx PR21s

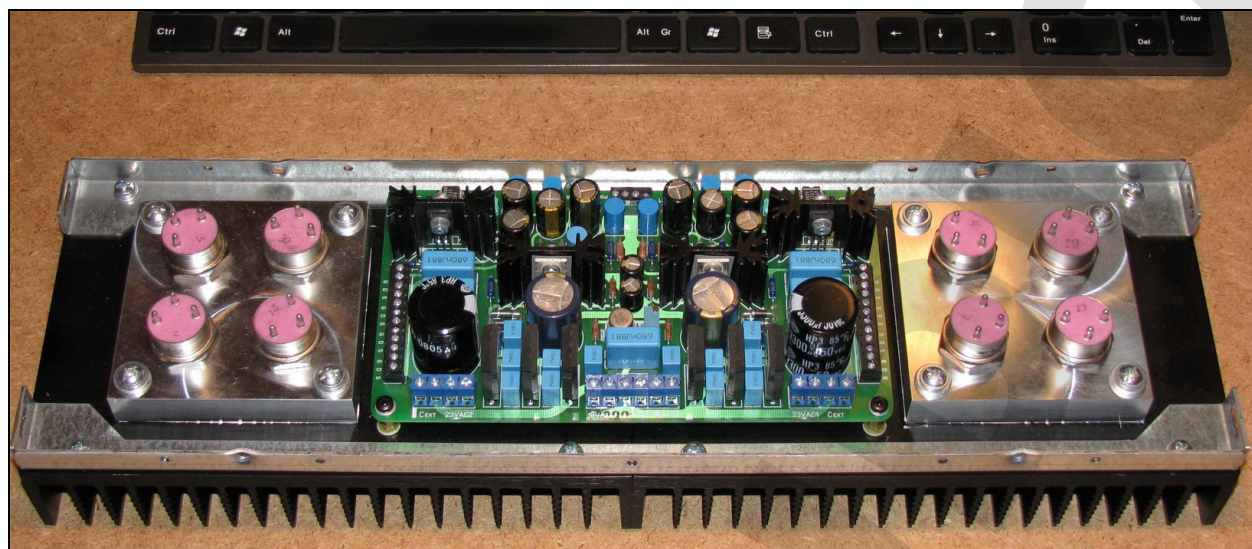


Рис. 6 Усилитель мощности Lynx PA21 в процессе монтажа



Рис. 7 Усилитель Lynx PA21 в процессе монтажа в корпус

Наилучшие результаты показали LT1122, AD845, OP42, LME49710, AD744 и OPA627. Наихудшими для данного устройства оказались AD847, EL2044, LF356, OPA604, OP176. Вообще непригоден оказался дискретный Burson, – мало того, что их термодрейф выходит за все разумные пределы, но с ним усилитель оказался неустойчивым и пришлось «для успокоения» вводить корректирующие цепи (кстати, как и для ОУ AD847, EL2044, AD843, AD825), а суммарные искажения при номинальной выходной мощности - почти втрое выше, чем при использовании LT1122. Да и по субъективным оценкам звучания это был самый худший вариант.

Транзисторы КП904 я подбирал в четверки с точностью около 20% по крутизне и начальному току стока. Благодаря эффекту «взаимовыравнивания» токов такой точности подбора более чем достаточно. В процессе работы, через 15...20 минут после включения токи стоков транзисторов становятся практически одинаковыми.

В усилителях мощности применены выводные резисторы Dale RNC55, поверхностные MELF Vishay MMA0204, пленочные конденсаторы EMZ KP72 (возможно использовать Wima FKP2) и Kemet/Rifa PHE426, электролитические конденсаторы Panasonic FM, NHG, Hitachi HP3 или аналогичные. Внешние батареи конденсаторов – Kemet/Rifa PEN200. При необходимости коррекции усилителя, выполнить её достаточно просто - на плате предусмотрены площадки для установки корректирующих конденсаторов типоразмера 1206.

Для подключения АС к выходам усилителей мощности используются реле типа RT315024 (Тусо/Schrack), для систем софтстарта – HF115F (Hongfa), во вспомогательных цепях – RY24 или любые аналогичные, качество контактов здесь не имеет значения.

Монтаж устройства выполнен проводом Huber + Suhner типа Radox 125 и Tchernov Cable Mounting Wire. Припой – Tchernov Audio SFS-AG. Разъемы RCA – CMC805, выходные – Furutech FP-800B. Транзисторы буферных каскадов усилителя и стабилизаторы напряжения питания, как схемы усилителя, так и схемы защиты устанавливаются на радиаторы Wakefield 637-10ABP. В качестве монтажного шасси использована плита из композитного материала «дюростон» толщиной 10мм

При конструировании «цирклотронов» следует особое внимание уделять качеству трансформаторов питания. Они должны обладать малыми и симметричными емкостями вторичных обмоток по отношению к экрану и друг другу, иметь малое поле рассеяния и работать на линейном участке характеристики намагничивания (по крайней мере, без глубокого захода в насыщение). Для реализации таких требований была разработана специальная конструкция силовых трансформаторов, для накопления опыта реализованная у нескольких производителей.

Авторский экземпляр усилителя обладает следующими техническими характеристиками:

- | | |
|---|-------------|
| 1. Номинальный малосигнальный диапазон воспроизводимых частот при неравномерности АЧХ не более +/-1дБ, Гц | 0....150000 |
| 2. Скорость нарастания выходного напряжения (с входным фильтром), В/мкс | 40 |
| 3. Номинальная выходная мощность на нагрузке 4 Ома, Вт: | 45 |
| 4. Максимальная выходная мощность на нагрузке 4 Ома, Вт: | 55 |
| 5. Уровень гармонических искажений при мощности -3дБ от номинальной, дБ, не более: | -88 |
| 6. Уровень шумов на выходе, дБ, не более | -120 |
| 7. Уровень фона на выходе, дБ, не более | -120 |
| 8. Входное сопротивление кОм, | 5 ±0.2 |

Спектры выходного сигнала контрольного образца усилителя для различных уровней выходной мощности приведены на рис. 8 – рис. 12. (собственный уровень искажений тестового генератора составляет -120дБ, практически совпадает с рис. 8)

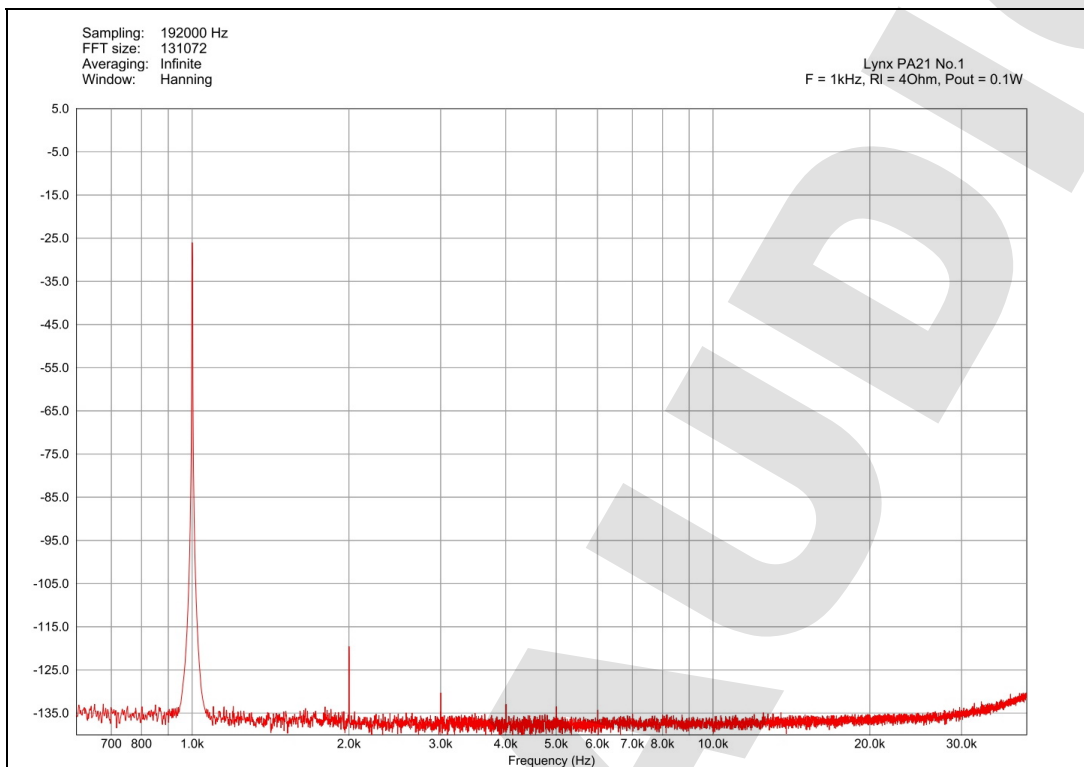


Рис. 8 Спектр сигнала на выходе усилителя Lynx PA21 при выходной мощности 0.1Вт

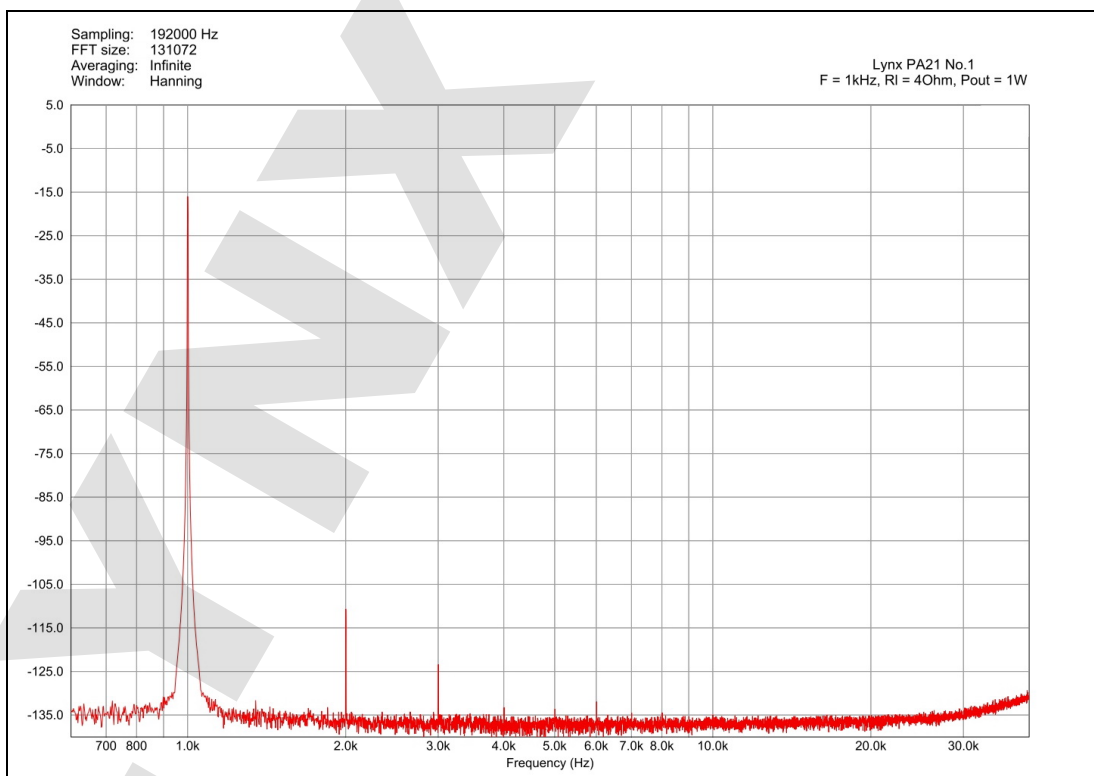


Рис. 9 Спектр сигнала на выходе усилителя Lynx PA21 при выходной мощности 1Вт

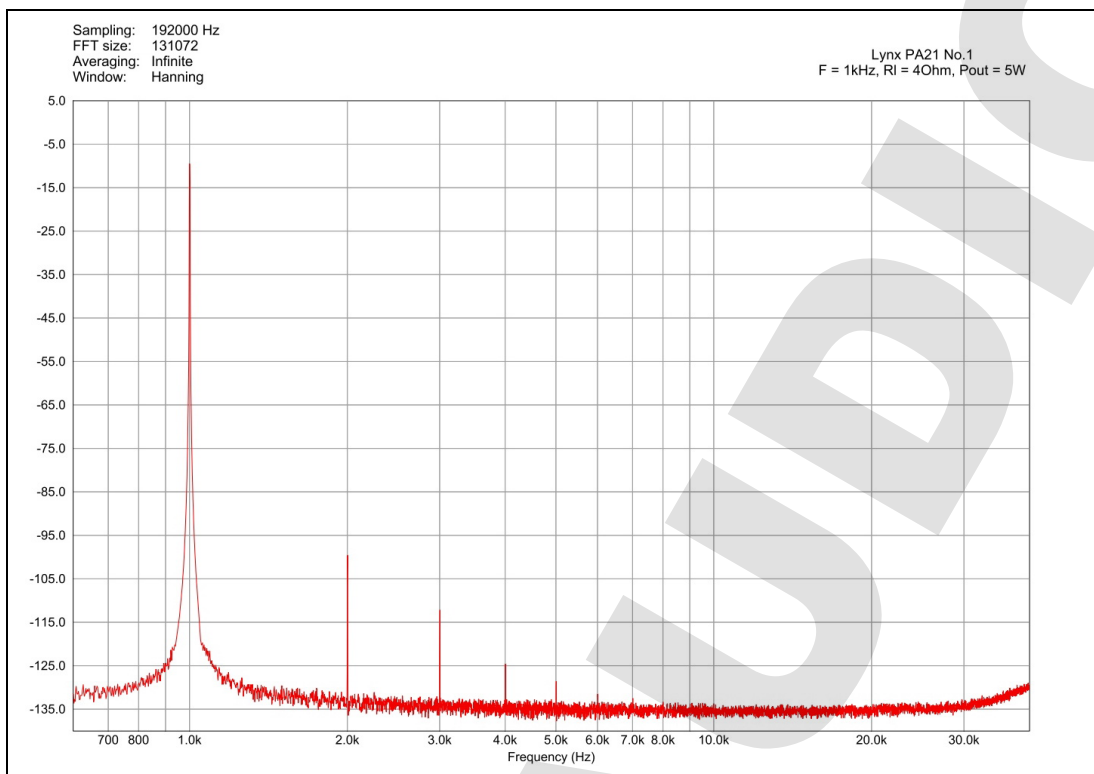


Рис. 10 Спектр сигнала на выходе усилителя Lynx PA21 при выходной мощности 5Вт

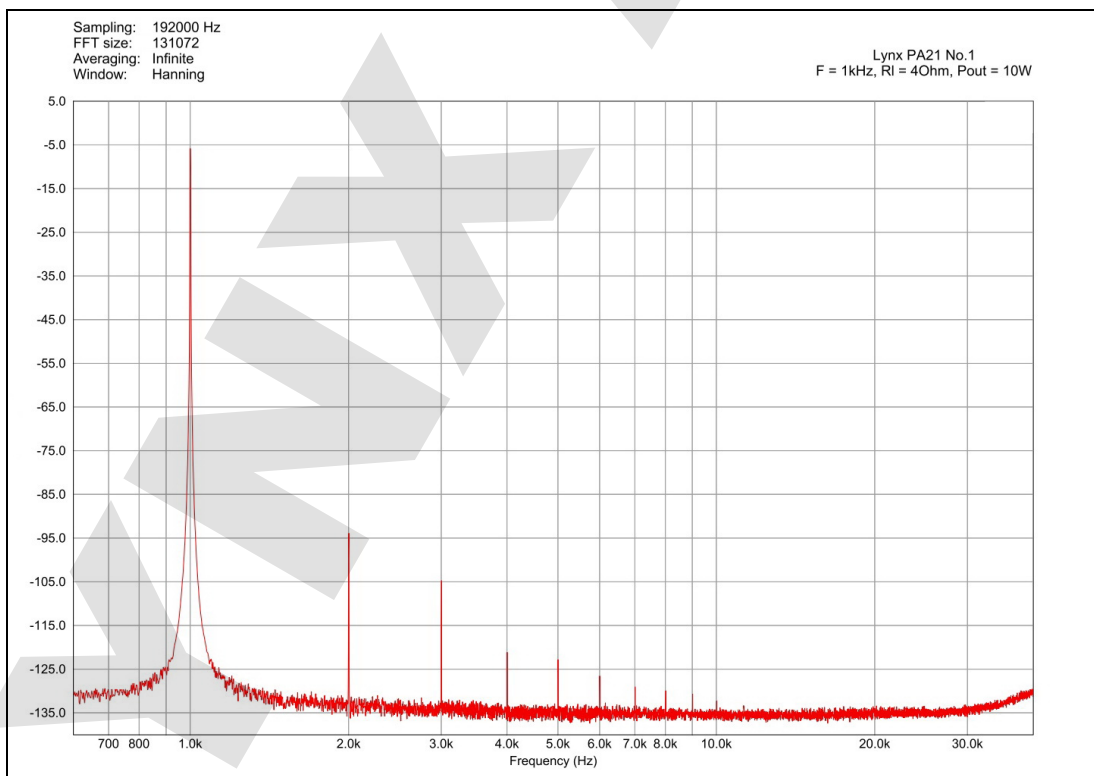


Рис. 11 Спектр сигнала на выходе усилителя Lynx PA21 при выходной мощности 10Вт

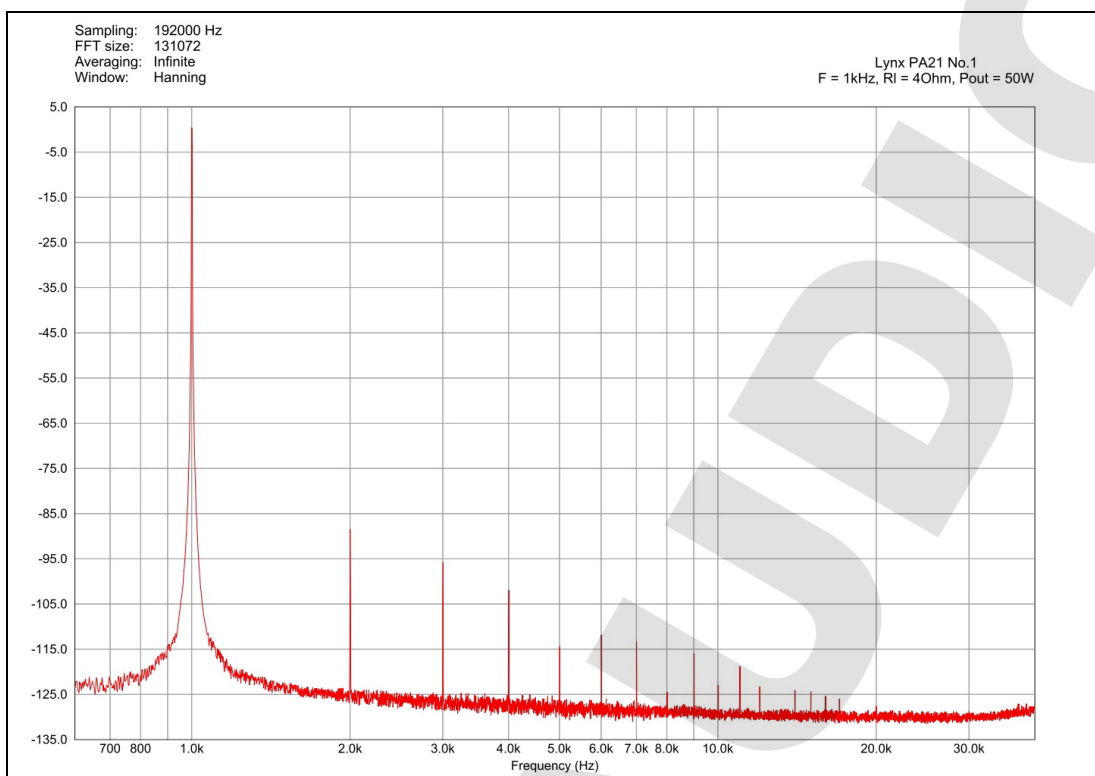


Рис. 12 Спектр сигнала на выходе усилителя Lynx PA21 при выходной мощности 50Вт

Следует отметить, что достоверное измерение параметров усилителя, ни один из выходных проводов которого не связан с общим проводом, является достаточно сложным процессом, связанным с выполнением ряда противоречивых требований как методологических, так и чисто технических.

Прослушивание данного усилителя (драйверные ОУ – LT1122, источник – ЦАПы Lynx D60, Lynx D48 предварительный усилитель – Lynx P45, АС – Dynaudio Contour 1.3 и Focal Diablo Utopia) доставило массу удовольствия и приятных минут. Звучание усилителя очень точное, при этом удивительно спокойное и деликатное. Отлично передаются самые тонкие тембральные оттенки как голосов исполнителей, так и инструментов и естественных звуков. Даже при самой маленькой громкости прослушивания прекрасно слышны все нюансы исполнения и записи фонограммы. С этим усилителем просто забываешь о его существовании, остается только МУЗЫКА и СЛУШАТЕЛЬ.

Дмитрий Андронников (Lynx Audio)

Санкт-Петербург, Москва, Мюнхен,
апрель – декабрь 2012 г.

Литература

1. Сырицо А. Мощный усилитель НЧ. – «Радио», 1978, №8
2. Сырицо А. Интегральные ОУ в усилителях мощности НЧ. – «Радио», 1982, №11
3. Сырицо А. Усилитель мощности на интегральных ОУ. – «Радио», 1984, №8.
4. Якименко Н. Полевые транзисторы в мостовом УМЗЧ. – «Радио», 1986, №9.