

## С передискретизацией и цифровой фильтрацией... (Блок ЦАП Lynx 7)

Прошло немногим более полугода с момента появления на сайте "Музыкальный Петербург" моей статьи "Без передискретизации и цифровой фильтрации" (правда в существенно отредактированном и усеченном виде).

Вновь взяться за перо меня побудил ряд событий, вопросов и писем, произошедших и полученных мною за последнее время. Более двухсот с вопросами, отзывами и мнениями по теме ЦАП наглядно показывают, что в России есть явный интерес к данному направлению при существенном недостатке информации основополагающего теоретического характера. Указанный информационный вакуум, по всей видимости, не исчезнет и в обозримом будущем, ибо популярно изложить теорию цифровой обработки сигналов весьма и весьма трудно, особенно учитывая нелюбовь наших "мастеров на все руки" к теории. Не стану и я взваливать на себя сию непосильную задачу, адресовав всех интересующихся теорией к учебнику Баскакова "Радиотехнические цепи и сигналы" и монографии Рабинера и Голда "Теория и практика цифровой обработки сигналов".

К сожалению, познания в цифровой технике большинства наших коллег по аудиомиру сформированы убогими по форме и содержанию статьями в насквозь продажных изданиях типа "Аудио Магазин" весьма неквалифицированными и самовлюбленными авторами, работающими под звучными псевдонимами типа лордов, килров и т.д. Увы, подобные "лорды", едва научившись копать в "инете" и пользоваться англо-русским словарем, и довольно слабо разбираясь в теме, начинают учить жизни всех окружающих, забывая совсем о том, что среди читателей могут совершенно случайно оказаться не только "лохи"...

Посему, большинство пришедших ко мне писем я оставил без ответа, в первую очередь те, в которых речь шла о "волшебных" проводах, припоях и красках для CD. Были и откровенно рекламно-пропагандистские письма различных кандидатов технических наук (из Москвы), явно оплаченные Texas Instruments / BurrBrown и Cirrus Logic. И очень мало (около десятка) было действительно серьезных отзывов, перешедших в интереснейшие дискуссии, продолжающиеся и по сей день.

Позволю себе завершить на этом лирическое предисловие и вернуться к нашим баранам, т.е. ЦАПам.

Самое критическое звено ЦАП без передискретизации - аналоговый восстанавливающий фильтр. От качества его исполнения, примененных компонентов и точности номиналов во многом зависит результирующее качество ЦАП.

Существенное влияние на качество воспроизведения оказывает вид характеристики фильтра. С точки зрения подавления помех ультразвукового диапазона наиболее подходящим является инверсный фильтр Чебышева. К сожалению, фазо-частотная характеристика такого фильтра существенно нелинейна, да и групповое время задержки непостоянно. Поэтому применение такого фильтра приводит к существенному ухудшению передачи фазовых и временных соотношений в сигнале, что для аппаратуры высокой верности неприемлемо. Фильтр Баттерворта имеет меньшую крутизну спада АЧХ, но более близкую к линейной фазовую характеристику, хотя и недостаточно, как показали эксперименты. Линейно-фазовые фильтры (Бесселя) не обеспечивают требуемое затухание в полосе задержания даже при высоком порядке (10-14).

В принципе, проблемы с линейностью ФЧХ можно решить, применив специальный фазовый корректор. Но это удорожает конструкцию, появляются дополнительные активные и пассивные элементы в цепи сигнала, и, в результате, получаемый выигрыш в качестве очень незначителен. Кроме того, большое количество активных и пассивных элементов фильтра приводит к непредсказуемости характера звучания аппарата и плохой повторяемости звуковых свойств от изделия к изделию.

Указанные недостатки оказались слишком серьезными, чтобы мириться с ними, поэтому был проведен ряд экспериментов и теоретическая проработка, итогом которых явилась конструкция алгоритм фильтрации сигнала в цифровом виде с 8-ми кратной передискретизацией.

Принципиальная схема сигнальной части аппарата приведена на рис.1. В ней сохранена конструкторско-технологическая идеология предыдущих моделей: применяется гальваническая развязка цифровой и цифро-аналоговой частей; используются дорогие высококачественные активные и пассивные элементы. Каждый функциональный узел питается от отдельного источника с двух- или трехступенчатым стабилизатором.

Применение цифрового фильтра вносит свои особенности.

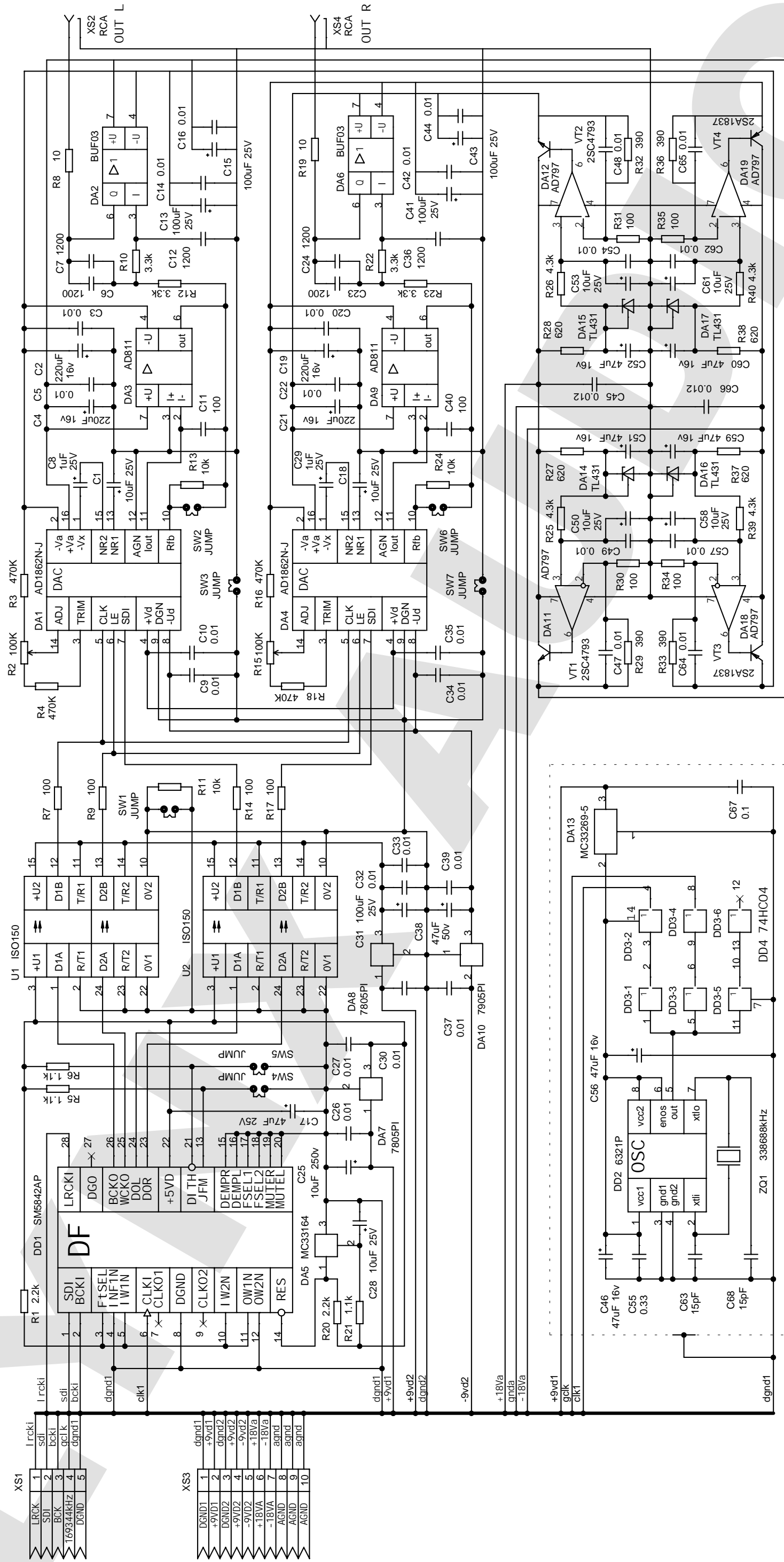
Во-первых, поскольку цифровые фильтры крайне чувствительны к джиттеру и фазовому шуму тактового сигнала, то применение собственного качественного генератора становится обязательным. Во-вторых, малая нагрузочная способность выходов цифрового фильтра исключает возможность непосредственного использования скоростных оптронов с рабочим током 10-20 мА; вместо них применимы иные средства гальванической развязки. В-третьих, питание генератора и цифрового фильтра должны быть как можно более "чистыми" - здесь необходима, как минимум двухступенчатая стабилизация.

Входной сигнал формата Sony I2S поступает от сервопроцессора на входы цифрового фильтра DD1 типа SM5842 фирмы NPC. Выбор этого фильтра обусловлен тем, что в настоящее время он является единственным однокристалльным цифровым фильтром, производящим операции умножения без округления (с внутренней разрядностью 32). Внешними установками фильтр инициализирован на прием 16-и разрядного входного сигнала и выдачу 20-и разрядных данных на ЦАП. Для расширения возможностей оптимизации качества звучания предусмотрено включение подмешивания псевдослучайного сигнала (dither) (SW5) и переключение режима внутренней синхронизации (SW4). Оба переключения можно производить "на ходу".

Начальный сброс при подаче питания формирует специализированный генератор "сброса" на микросхеме DA5 типа MC33164-P5. Питание фильтра осуществляется от стабилизатора DA7 типа 78M05, входное напряжение которого также стабилизировано, но более высоковольтным стабилизатором 78M09 (на схеме не показан). Сигнала с выхода цифрового фильтра (данные левого и правого каналов, такта сдвигового регистра и общей загрузки) через микросхемы гальванической развязки U1 и U2 типа ISO150 подаются на входы ЦАП. Применение развязок типа ISO150 вызвано невозможностью непосредственной стыковки SM5842 и оптронов типа 6N137. Кроме того, ISO150, по сравнению с оптронами обеспечивают меньшее время задержки (20 нс вместо 50 нс у оптронов) и, что существенно, меньшую дисперсию этого времени (5-7 пс вместо 30-100 пс) и искажение длительностей (1.5 нс вместо 10-15 нс). К сожалению ISO150 существенно дороже оптронов и стоит около 16 USD за штуку.

Выходы развязок подключены к цифровым входам ЦАП через защитные резисторы R7, R9, R14, R17, предотвращающие паразитный тиристорный эффект. Сигналы такта сдвигового регистра (CLK) и общей загрузки (LE) - общие для обоих ЦАП, соответствующие их входы соединены вместе. "Земли" аналоговой и цифро-аналоговой частей имеют гальваническую связь через высокоомный резистор R11, предотвращающий "наведенную" разность потенциалов между землями, но не увеличивающий проникание импульсных помех.

Собственно ЦАП выполнен на лучшей, по моему мнению, на сегодняшний день микросхеме AD1862NJ (DA1, DA4). По сравнению с типовой схемой включения, данная конструкция дополнена элементом подстройки - резисторами R2 и R15, позволяющими, при наличии тестового диска, реализовать минимально возможный (близкий к теоретическому пределу для данной разрядности ЦАП) уровень искажений и монотонность преобразования. Кроме микросхемы AD1862, такой настройки нет более ни у одного интегрального ЦАП широкого применения.



8x oversampling DAC "LYNX 7"

Цифровая часть ЦАП и выходные каскады ISO150 питаются от собственных стабилизаторов DA8 (+5 В) и DA10 (-5 В) типов 78M05 и 79M05. Входные напряжения этих стабилизаторов, также стабилизированные микросхемами 7809 и 7909 (на схеме не показаны). Все "цифровые" питания шунтированы полипропиленовыми конденсаторами емкостью по 0.01 мкФ на каждый вывод питания каждой микросхемы.

Выходной ток ЦАП преобразуется в напряжение микросхемами DA3 и DA9 типа AD811. Выбор усилителя с токовой обратной связью обусловлен несколькими причинами. Во-первых, обладая полосой пропускания около 100 МГц и скоростью нарастания 2500 В/мкс, подобный усилитель имеет гладкую переходную характеристику (без выброса) и время установления всего 25 нс. Во-вторых, входной каскад усилителя с токовой ОС представляет из себя не дифференциальный каскад, а двухтактный каскад с общей базой, обладающей крайне высокой линейностью при любых уровнях входного сигнала. В-третьих, для обеспечения широкополосности и возможности работы на согласованную нагрузку, выходной каскад AD811 работает в режиме А с током покоя 14 мА. Кроме того, микросхема AD811 обладает низким уровнем шумов (спектральная плотность - не более  $1.9 \text{ нВ}/(\text{Гц})^{1/2}$ ) и искажений (на нагрузке 100 Ом и выходном напряжении  $\pm 1 \text{ В}$  - не более -116 дБ в полосе 25 кГц). Спектр искажений - мягкий, быстро спадающий с увеличением номера гармоники.

Для упрощения настройки линейности ЦАП предусмотрена возможность изменения коэффициента преобразования с 3 В/мА (нормальный режим) до 13 В/мА (тестовый режим) путем размыкания переключателей SW2 и SW6. Аналоговое питание ЦАП и преобразователей ( $\pm 12 \text{ В}$ ) шунтировано полипропиленовыми емкостями по 0.01 мкФ и электролитами Elna Cerafine по 220 мкФ.

Выходные буферы, совмещенные с ФНЧ 2-го порядка (частота среза - 100 кГц) образованы микросхемами DA2, DA6 и элементами R10, R12, C7, C6, C12 и R22, R23, C23, C24, C36. В качестве активных элементов используются широкополосные повторители BUF04 или BUF03. Последние, несмотря на несколько больший шум, предпочтительнее, ибо имеют входной каскад на полевом транзисторе (однотактный) и работают при токе покоя 20 мА. Они требуют установки дополнительного радиатора площадью не менее 3-5 см<sup>2</sup>. К сожалению, BUF03 сняты с производства вот уже как почти 6 лет и найти их - большая удача. Питание буферов шунтировано полипропиленами по 0.01 мкФ и электролитами Elna Cerafine по 100 мкФ. Выходы буферов и являются выходом аналогового сигнала левого и правого каналов.

Все аналоговые цепи схемы питаются от дискретных стабилизаторов на ОУ DA11, DA12, DA18, DA19, транзисторах VT1-VT4 и источниках опорного напряжения DA14-DA17. Применение малощумящих быстродействующих ОУ типа AD797 и прецизионных ИОН типа TL431 обеспечивает уровень шумов питания на два порядка меньше, чем интегральные стабилизаторы, а также очень низкое ( $\sim 0.01 \text{ Ом}$ ) и постоянное в полосе частот до 100 кГц выходное сопротивление стабилизаторов. Входное напряжение их - стабилизировано микросхемами типов LM317T (+18 В) и LM337T (-18 В) (на схеме не показаны).

Генератор тактовой частоты 169344 кГц с малым уровнем фазовых шумов реализован на специальной микросхеме DD2 SM6321P, включающей в себя усилительный каскад с высоким входным сопротивлением и делитель частоты на 2. Кварцевый резонатор ZQ1 - на частоту 33688 кГц производства С-Петербургского завода "Морион". Резонаторы "Мориона" выгодно отличаются от импортных аналогов высокой стабильностью параметров, большей добротностью и кратковременной стабильностью (она определяет уровень джиттера собственного генератора). Малый ток кристалла, обеспечиваемый микросхемой SM6321P определяет хорошую долговременную стабильность и низкий уровень фазовых шумов. Для исключения влияния нагрузки на работу генератора, его выход буферизирован элементами DD3.1 - DD3.4, причем выходы частоты на сервопроцессор и цифровой фильтр разделены. Генератор помещен в двойной глухой

экран (медь - пермаллой), который, как снижает уровень помех самого генератора, так и защищает генератор от внешних наводок. На плате генератора размещен его индивидуальный стабилизатор питания на микросхеме DA13 типа MC33269-5. Входное напряжение питания - стабилизированное, +9 В, то же самое, что и для стабилизатора питания цифрового фильтра.

В схеме рассматриваемого ЦАП отсутствует входной приемник сигнала SPDIF. На мой взгляд, указанный стандарт передачи данных дефективен изначально, и попытки исправить его какими-либо средствами изначально пусты и малорезультативны. Гораздо логичнее либо встроить подобную плату ЦАП внутрь соответствующего проигрывателя CD, либо вытащить из проигрывателя наружу 5 проводников в экранах (один - земля, три - сигналы шины I2S, один - тактовый сигнал 169344 КГц). Самый радикальный "upgrade" двойки "транспорт-конвертор" с напихиванием внутрь килограммов "Black Gate" не давал и толики того эффекта, который дает замена передачи данных по SPDIF на I2S. Правда есть один большой недостаток - вокруг I2S не устроить шаманские камлания со сменой цифровых кабелей и якобы анализ якобы изменений звука. Качество звучания аппаратов, связанных по синхронной шине с выделенной синхронизацией, не зависит (и субъективно, по личным и чужим впечатлениям, и объективно, по измерениям) от типа соединительного кабеля (конечно же, в пределах, пока кабель способен передать полосу 15-20 МГц)...

Вся схема ЦАП успешно размещается на печатной плате (двухсторонней) размерами 240x80. Будучи собранным без ошибок из заведомо исправных деталей, устройство начинает работать сразу и требует лишь минимальной настройки. Она сводится к тому, чтобы при воспроизведении с тестового диска дорожки с записью 100 Гц с уровнем -70 дБ и ниже резисторами R2 и R15 (предварительно разомкнув переключки SW2 и SW6) установить вид сигнала наиболее близкий к синусоидальному. Все "ступеньки" преобразованного сигнала должны быть одинаковой амплитуды, - и чем меньше уровень сигнала, тем нагляднее будет настройка.

В рабочем состоянии переключки SW2 и SW6 замкнуты, выходное напряжение соответствует стандартному 2 В (RMS) / 0 дБ.

Режим работы цифрового фильтра (переключки SW4, SW5) можно изменять непосредственно "на ходу", не останавливая воспроизведения. На мой взгляд, наиболее удачный результат получался при включенном подмешивании псевдослучайного сигнала и выключенном режиме синхронизации (обе переключки замкнуты).

В заключении хотелось бы отметить, что в конструкции применены весьма дорогостоящие компоненты. В принципе, возможна их замена на более широкодоступные и дешевые. Естественно, результирующее качество несколько пострадает. Насколько допустима деградация качества - каждый конструктор решает сам для себя. Невозможно, как это часто просят сделать, дать конкретные рекомендации по звучанию - все люди разные, и слух с мозгом у всех тоже разный. Достигнув некоего минимального уровня качества, далее каждый творит для себя сам, создавая свой звук, на основе личного опыта, характера, увлечений.

Дмитрий Андронников  
Санкт-Петербург, 1998