

Минимизация шумов предварительных усилителей

О некоторых особенностях проектирования малошумящих усилителей при существенно реактивном импедансе источника сигнала

С. АГЕЕВ, г. Москва

Теперь несколько слов о конструктивном выполнении и подключении УВ.

На плате УВ предусмотрена установка припайкой экрана из жести, закрывающего входную часть УВ (на рис. 15 показаны расположение деталей и контур экрана). Этот экран нужен не только для защиты от электромагнитных помех; громоздкие входные конденсаторы повышают чувствительность к наводкам. Колебания температуры входных конденсаторов и транзисторов, механические воздействия на них тоже создают помехи, сравнимые с полезным сигналом (по этой причине входные транзисторы лучше брать в исполнении для монтажа в отверстие). Входные конденсаторы С4—С7, С104—С107 для повышения вибростойкости целесообразно склеить вместе вязким клеем (можно клеем—расплавом). Крепление УВ должно исключать передачу на него вибраций от ЛПМ, особенно в катушечных магнитофонах. Вместе с тем длина кабеля от ГВ к УВ не должна превышать 20...30 см, чтобы его емкость не сместила резонанс входных цепей слишком близко к рабочей полосе частот.

Так как УВ не инвертирует сигнал и имеет высокоомную входную цепь, паразитная емкость с выхода на вход, превышающая сотые доли пикофара-

ды, приведет к его самовозбуждению (в инвертирующем УВ она создаст динамическую входную емкость). Основную часть паразитной емкости составляет конструктивная емкость между конденсаторами С4—С7 (С104—С107) и С9 (С109), поэтому С9 и С109 вынесены за пределы экранированного отсека.

На рис. 16,а показан рисунок печатной платы со стороны деталей, а на рис. 16,б — со стороны общего провода—экрана.

Необычное расположение "заземляемого" экранирующего слоя с *нижней стороны* платы продиктовано не только обеспечением экранировки, но и удобством пайки "заземленных" выводов компонентов. Это также облегчает поиск случайных замыканий на общий провод — если экранирующий слой находится со стороны деталей, то они заслоняют окружение контактных площадок. Посадочные места под биполярные транзисторы сделаны универсальными, так как цоколевка японских транзисторов отличается от принятой для отечественных серий КТ3107 и европейских ВС560, ВС557. Американские же транзисторы (2N3904, 2N3906, 2N5087, 2N5089), в свою очередь, имеют цоколевку, зеркальную отечественным и европейским! Поэтому при установке транзисторов нужно проверять соответствие их цоколевки отверстиям на плате (размещение

в "ряд" предназначено для европейских и американских, а "треугольником" — для японских транзисторов). На монтажной схеме (см. рис. 15) для корпусов отечественных и европейских транзисторов дан сплошной контур, а для японских — штриховой.

Кроме этого, для многих элементов на плату добавлены "дублиеры" в корпусах для поверхностного монтажа. Предусмотрена также возможность применения биполярных транзисторов (VT1—VT6, VT101—VT106, VT201) со структурой проводимости, обратной указанной на схеме. Это достигнуто за счет введения посадочного места под резистор R210A, устанавливаемый *вместо* R210 (только один из них!). Естественно, при этом нужно также поменять полярность конденсаторов С202—С204 и диодов VD202, VD1—VD11 (VD101—VD111). Эта мера полезна в случае использования УВ совместно с ГВ, имеющими большую индуктивность (выше 200 мГн), когда необходимо еще более снизить входной шумовой ток. Для этого в качестве VT1—VT4 (VT101—VT104) нужно применить один-два транзистора со сверхвысоким параметром $h_{21Э}$ (1500...2500), например, 2SC3112B или 2SD2144KW. Подобные "супербета" транзисторы (со сверхвысоким $h_{21Э}$) выпускаются в основном структуры п-р-п.

Все соединения в малосигнальных цепях должны быть паяными, причем при использовании многожильного провода (например, МГТФ) места пайки должны быть защищены от окисления и разрыва проволочек; для этой цели полезно тщательно залудить конец провода, чтобы припой слегка затек под изоляцию. Для подключения к ГВ лучше всего применить свитые тонкие провода со сплошной фторопластовой или полиэтиленовой изоляцией, затянутые в тонкий экранирующий "чулок". Вместо них допустимо взять эмалированные (обмоточные) провода диаметром

Окончание. Начало см. в "Радио",
2004, № 12; 2005, № 1, 2

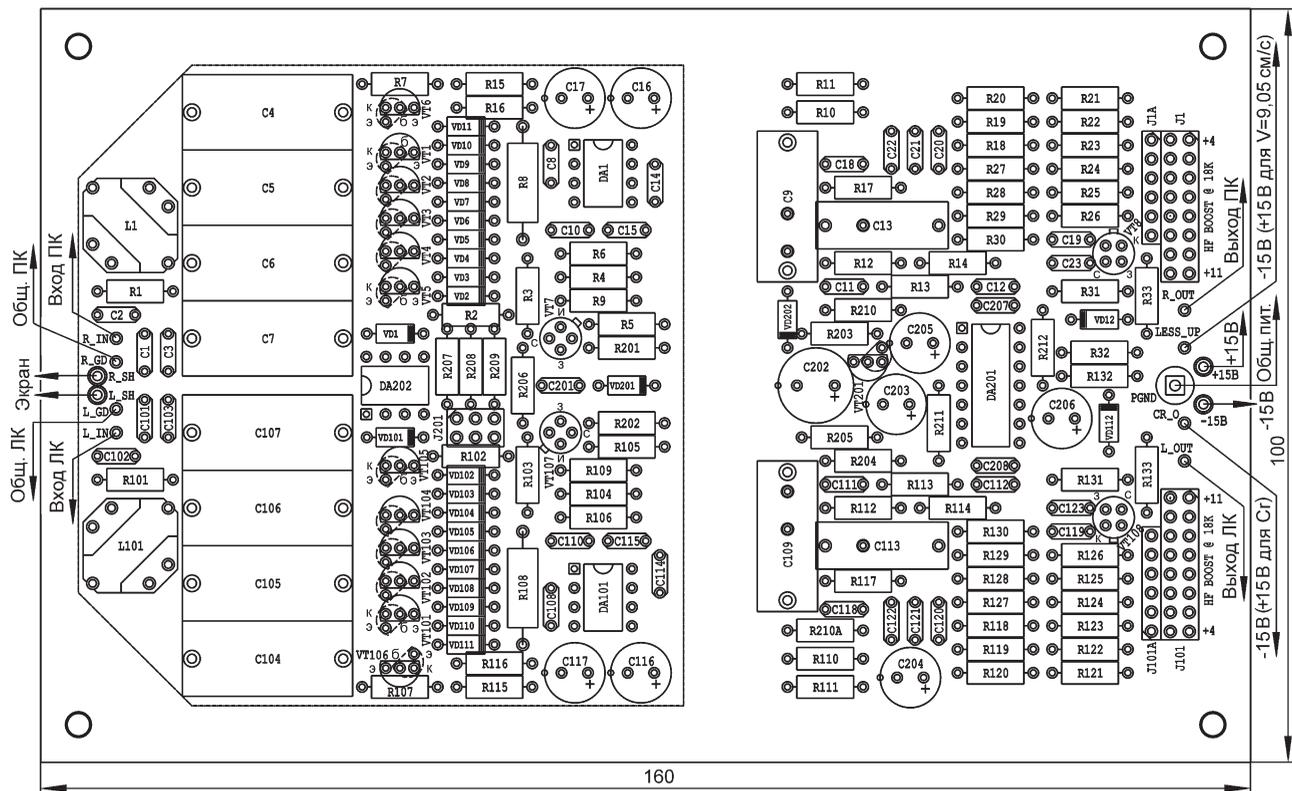


Рис. 15

0,2...0,3 мм в высокопрочной эмали (ПЭВТЛ-2), естественно, тоже аккуратно затянутые на экран. С точки зрения помехозащитности, там, где это возможно, лучше применять одножильные провода. Это связано с тем, что у них меньше диаметр при равном сечении по меди, соответственно уменьшается чувствительность витой пары к наводкам. Потом они механически жестче и менее чувствительны к вибрациям.

Если необходимо коммутировать ГВ, то лучше всего это делать, используя реле. Из отечественных наиболее пригодны РЭС49 (РС4.569.421-05 — РС4.569.421-09), РЭК23 и РЭС79 (ДЛТ4.555.011-04 — ДЛТ4.555.011-07), РЭС60 (РС4.569.435-05 — РС4.569.435-09), РЭС80 (ДЛТ4.555.014-05 — ДЛТ4.555.014-09), а также РПС45 (РС4.520.755-01 — РС4.520.755-05). Указанные исполнения соответствуют реле с золочеными контактами. Подойдут также РЭК11. Герконовые реле (РЭС42—РЭС44, РЭС55, РЭС64, РЭС91) лучше не применять — у них, как правило, из-за ферромагнитных контактов сильно выражено проникание магнитных полей от обмотки (менее выражено оно у РЭВ18 и РЭС645 — с экраном), к тому же у них зачастую мало контактных групп. Коммутацию ГВ предпочтительнее выполнять с использованием "зашелкивающихся" реле (дистанционных переключателей, например, РПС43, РПС45) или так, чтобы при воспроизведении обмотка реле была обесточена. Зарубежная промышленность производит немало подобных реле, выбирать нужно те, которые имеют золоченые контакты и токоведущие цепи из немагнитных материалов (например, gold over silver alloy). Это малосигнальные (теле-

коммуникационные) реле. В качестве примера можно привести Omron G6K, G6H, Nais TQ, TF, TX, AGN, Fujitsu-Takamisawa FTR-B3, FTR-B4 — они несколько отличаются по конструкции и посадочным местам, но на практике равноценны. Очень удобны реле Axisom MT4, имеющие четыре переключающих контакта в корпусе 20×15 мм. Внимание! При разработке схемы коммутации нужно обязательно обеспечить замыкание входа УВ при отключении ГВ (ГУ)!

Еще один малоизвестный, но существенный факт. Если воспроизводящая головка имеет несимметричную по отношению к рабочему зазору и ходу ленты конструкцию полюсных наконечников, то она будет вносить существенные искажения не только АЧХ, но и временных характеристик на низких частотах [17]. Связано это с тем, что для относительно длинных волн записи "точка воспроизведения" их с ленты соответствует геометрическому центру контактирующей с лентой части зеркала ГВ, а для коротких волн "точкой воспроизведения" служит центр рабочего зазора. Для широко распространенных комбинированных "бутербродных" блоков головок касетных магнитофонов смещение рабочей щели ГВ относительно геометрического центра ее полюсных наконечников достигает в среднем 0,4...0,6 мм. Кроме того, при асимметрии полюсов ГВ в дополнение к известному эффекту "змейки" на низкочастотном конце АЧХ наблюдается еще и немонотонность ФЧХ [17], которая может нарушать слитность и "четкость" звучания. При скорости движения ленты 47,6 мм/с это соответствует временному сдвигу в 8...12 мс, причем в сторону запаздывания низко-

частотных составляющих (в естественных условиях картина обратная). Указанное значение временного сдвига в несколько раз превышает среднестатистический порог заметности (примерно 2...3 мс [18]), поэтому для адекватного воспроизведения низкочастотной части спектра фонограмм необходима симметричная ГВ, полностью занимающая основное окно кассеты. Это обстоятельство, кстати, и объясняет нередко наблюдающееся превосходство "двухголовочных" касетных магнитофонов по естественности звучания низкочастотной части воспроизводимой фонограммы над "трехголовочными" (с "бутербродным" блоком головок).

В этой связи любопытно, что в инструкциях по регулировке ЛПМ старых профессиональных магнитофонов иногда был специальный пункт о необходимости установки симметричного огибания ГВ лентой. Однако впоследствии этот секрет (как и многие другие, типа истинной роли большого заднего зазора в записывающих головках), по-видимому, был благополучно утерян.

Немного о применяемых деталях.

Рекомендуемые ОУ: в позиция DA1, DA101 — LF357M (лучше производства National Semiconductor), AD843JN, LM318N, LM318P, при наличии L1, L101 подойдет NE5534P. Этот ОУ должен иметь производство коэффициента усиления на полосу не менее 30 МГц, входную емкость не более 6 пФ и спектральную плотность входного тока шума не более 0,7 пА/Гц^{1/2}. Спектральная плотность ЭДС шума для него не критична, достаточно, чтобы она не превышала 30 нВ/Гц^{1/2}. Из отечественных ОУ без ущерба для качества можно порекомендовать К140УД11

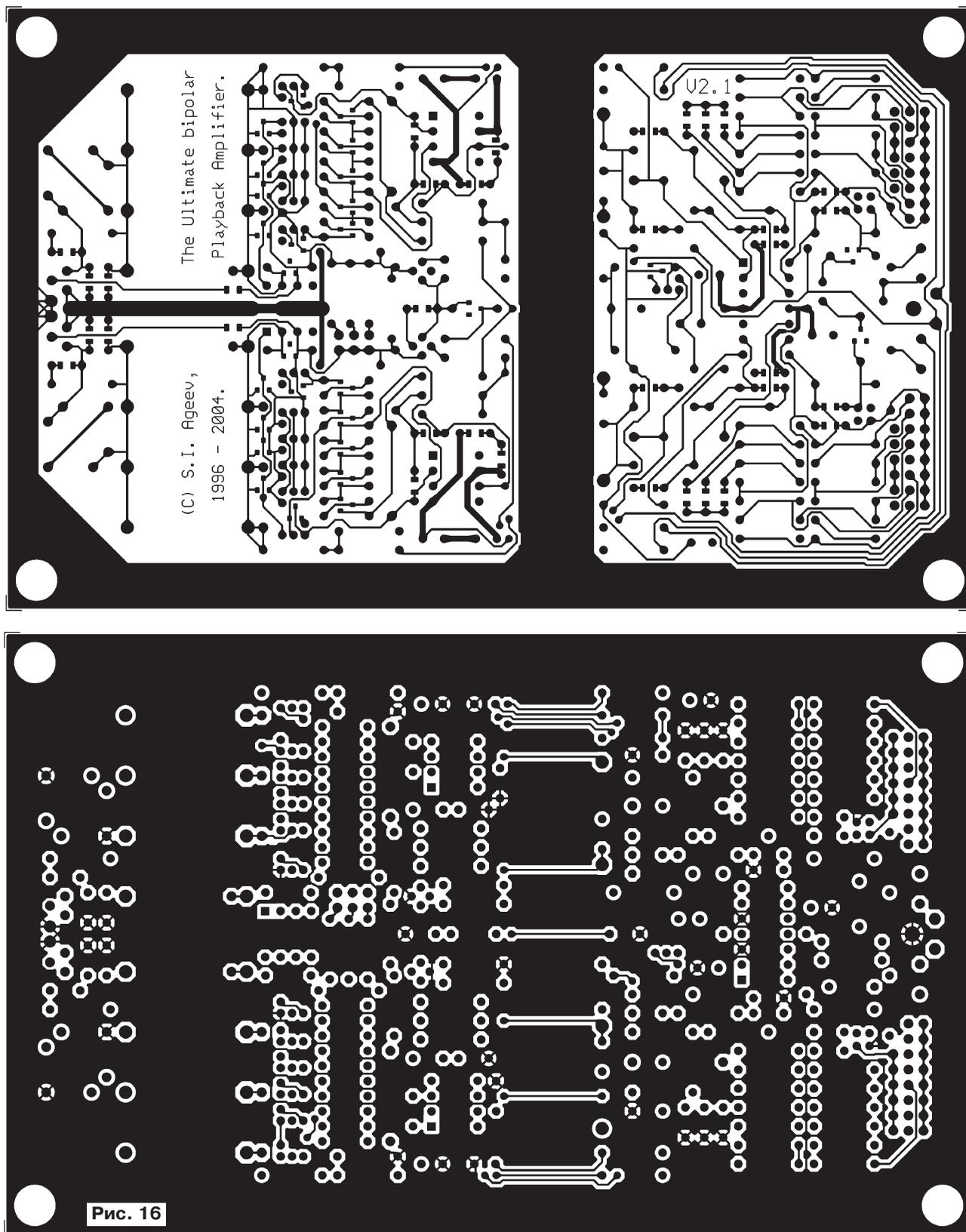


Рис. 16

(аналог LM318) и К(Р)544УД2 (внешний корректирующий конденсатор для него обычно не нужен) [19]. Характеристики УВ можно улучшить, если применить ОУ с внешней коррекцией, такие как μ A725

(К153УД5, LM725, OP06) или AD829, AD8021. Корректирующие цепи при этом рассчитывают на $K_{yc} \approx 30 \dots 50$. ОУ с производением усиления на полосу ниже 25...30 МГц, пусть и сверхлинейные, на

месте DA1, DA101 бесполезны, так как линейность УВ лимитируется входным каскадом. Для повышения полосы действия ООС можно применить современные быстродействующие ОУ с небольшими

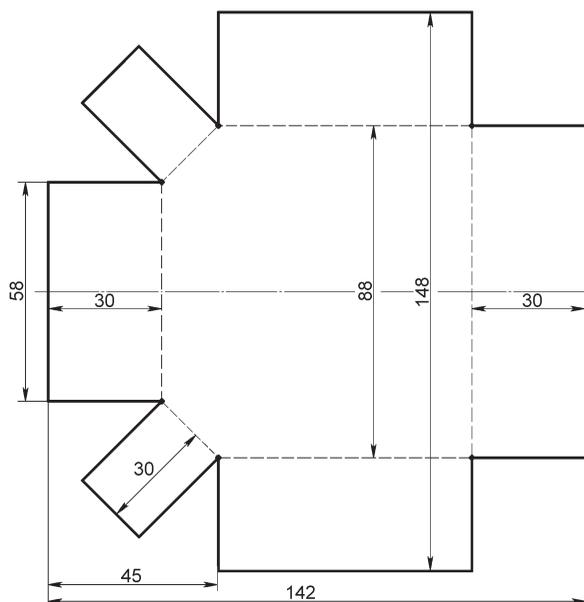


Рис. 17

входными токами, такие как AD8033AR, AD8065AR, THS4601ID, AD8067AR (по мере улучшения), а если R8, R108 не превышает 30...40 кОм — то и более распространенные LT1360CN8, LT1363CN8, LM6171IN, AD829JN, AD8021AR. Естественно, частотная коррекция УВ в целом при этом должна быть приведена в соответствии с характеристиками ОУ; чем больше его произведение усиления на полосу, тем меньший нужен номинал конденсатора С10, С110.

На позиции DA201, помимо LF347N (KF347), подойдут также LT1058CN, ОРА404КР, ОРА4132РА, ОРА4134РА, TLE2074CN, TLE2084CN, AD8513AR (бывают только в корпусе для поверхностного монтажа!), можно применить и AD713JN или TL074CN (лучше производства Texas Instruments).

В качестве транзисторов VT1—VT4, VT101—VT104 рекомендуются или отобранные четверки BC560C (BC557C, BC559C, KT3107K, KT3107L) или, что намного удобнее, один-два 2SA970BL или BC327-40. При подборе транзисторов нужно обеспечить h_{213} не менее 420...450 при токе коллектора 20...30 мкА и напряжении коллектор—эмиттер 1,5...2 В. Разброс тока коллектора в четверке (или паре) при параллельном соединении баз и эмиттеров не должен превышать 20%. Для одиночных транзисторов h_{213} нужно измерять при токе коллектора около 80 мкА, для парных — при токе 40 мкА. Нелишне проверить изменение h_{213} при снижении тока коллектора в 3...5 раз — h_{213} должно слегка уменьшаться, но не более чем на 5...10%, и ни в коем случае не расти. В ином случае транзистор бракуют. Хорошим решением также будет использование транзисторов структуры п-р-п из сборок SSM2210 или MAT02, по одному на канал (при этом надо внести все изменения, о которых рассказано выше). Посадочное место под сборку типов SSM2210, MAT02 или LM394 в корпусе DIP-8 на плате предусмотрено (DA202, см. рис. 15).

В позициях VT5 и VT105 рекомендуются транзисторы 2N4401 или 2SC1815 (тут важно небольшое R_E — не более 50...100 Ом), из отечественных можно использовать параллельно включенные транзисторы из отечественной сборки K159HT1 или серий KT501, KT503 с не очень высоким h_{213} (70...150).

Требования к VT6, VT106 и VT201 менее жесткие, чем к VT1—VT4, VT101—VT104, поэтому туда можно поставить экземпляры, не прошедшие отбора на место VT1—VT4. Если же важно предельное снижение шума, то в качестве VT6, VT106 желательно применить транзисторы с R_E не более 50...80 Ом, такие как 2SA970, 2SA1015, 2N3906. Неплохим вариантом будет также 2N5087.

Требования к полевым транзисторам VT7, VT8, VT107, VT108 следующие. Их допустимое напряжение канал—затвор не должно быть меньше полного напряжения питания УВ (30 В), хотя для VT7, VT107 достаточно и 25 В. Сопротивление в открытом состоянии должно быть не более 400 Ом (т. е. начальная крутизна должна быть не менее 2,5 мА/В). Напряжение отсечки для VT7, VT107 — 6...9 В, а для VT8, VT108 оно должно быть не более 3 В. На месте VT7, VT107 подойдут почти любые n-канальные полевые транзисторы, имеющие напряжение отсечки 4...8 В, например, КП303Е, КП307Г, КП307Д, импортные 2N4191 (PN4191), J111, J310, 2N4416A, 2N5486 (PN5486), BF244C, BF245C, 2SK152. В позиции VT8, VT108 подойдут КП307А, КП307Е, КП307Б, большинство экземпляров КП303А—КП303В, КП303И, КП364А—КП364В, КП364И, импортные 2N4193 (PN4193), J113, 2N5484 (PN5484), BF244А, BF245А.

Диоды BAS45 могут быть заменены импортными FDH300, 1N457А, 1N458А, а в варианте для поверхностного монтажа пригодны BAV199 или MMBD1503. Из отечественных можно использовать КД409 или варикапы с малой емкостью (менее 4...5 пФ при обратном напряжении 1 В), при их отсутствии применимы и диоды серий КД521, КД522. Напомним, что маркировка отечественных диодов зачастую обратная импортным (у импортных всегда помечен катод, у отечественных бывает помечен анод).

Резисторы цепей ООС (R1—R7 и R101—R107), а также R8, R108, R15—R29, R115—R129 желательно устанавливать металлоокисные (называемые также металлопленочными — metal film), из отечественных можно рекомендовать С2-10, С2-29В [20]. Высокоомные резисторы R7, R12, R107, R112, R201 — металлодиэлектрические, например, С2-23.

Наиболее жесткие требования предъявляются к качеству конденсаторов С9 и С109, они обязательно должны быть с полипропиленовым или полистирольным диэлектриком. Желательно также, чтобы отклонение их емкости от номинала не превышало 1...2%. Из отечественных подойдут К78-2 или группы К71 [21], из импортных — серий МКР, FKР, PPS, Polystyrene, P-серии Panasonic (ECQ-P1G223GZ), Vishay Roederstein (KP1830-322-065), Epcos (B32612-A0223-J, B32632-A6223-J, B32652-A0223-J, B32682-A6223J). Место для них на плате предусмотрено.

Конденсаторы С19—С21, С119—С121 — либо тоже полипропиленовые или полистирольные, либо керамические, но обязательно из термостабильной группы (С22, С122 можно составить из двух штук по 750 пФ). Конденсаторы С4—С7, С104—С107 — лавсановые или поликарбонатные, например, К73-17 4,7 мкФ на 63 В или аналогичные импортные (например, Epcos B32593-С1475-Ж(К), B32593-С1685-Ж(К) емкостью 4,7 или 6,8 мкФ, а также B32523-Q475/Q685/Q106-Ж(К) — 4,7...10 мкФ). **Замечание:** габариты отечественных конденсаторов в разных партиях различаются, поэтому, если в наличии нет соответствующих ТУ экземпляров емкостью 4,7 мкФ (с толщиной до 10 мм), то может быть оправданным использование конденсаторов с номиналом 3,3 мкФ. Конденсаторы С13, С113 также лавсановые — К73-17 емкостью 1,5 мкФ на 63 В или импортные, например, Epcos B32522-N3155-Ж, B32523-Q1155-Ж. Остальные конденсаторы с номиналом до 1500 пФ — полистирольные или керамические, но обязательно термостабильных групп (NP0, M75, M47, P33).

Оксидные конденсаторы в цепях питания (С16, С17, С116, С117, С202—С206) должны иметь малую утечку и по возможности небольшое эквивалентное последовательное сопротивление (Low ESR), например, серий Panasonic FC или Nichicon PW. Блокочные конденсаторы (С14, С114, С15, С115, С23, С123, С201, С207, С208) должны иметь малую паразитную индуктивность и номинал не менее 0,1 мкФ (лучше больше). Особой линейности и стабильности от них на самом деле не требуется. Наиболее подходят для этой цели керамические конденсаторы группы Н30 (импортные Х7Р, Х8Р), но не распространенные Н90 (Y5V, Z5U).

Катушка индуктивности L1 (L101) выполнена на магнитопроводе типоразмера RM5 из материала Epcos N48 с малой коэрцитивной силой ($H_c \approx 26$ А/м, $\mu \approx 2300$) с зазором в центральном керне 0,12 мм (B65805-160-A48) и содержит 250 витков провода ПЭВТЛК-2 диаметром 0,12 мм на двухсекционном каркасе (B65806-N1004-D2). Существует отечественный аналог этого магнитопровода — M1500-HM3-33-160 KB5-2 [22], он подходит еще лучше. После сборки магнитопровода готовую катушку обертывают (поверх магнитопровода) полосой медной фольги толщиной 0,1...0,25 мм, которую припаивают к клипсам, стягивающим половинки магнитопровода. При самостоятельном

(Окончание см. на с. 27)

Минимизация шумов предварительных усилителей

27

Окончание.
Начало см. на с. 16

расчете катушки нужно иметь в виду, что ее сопротивление постоянному току не должно превышать 13...15 Ом, добротность на частоте 20 кГц должна быть не менее 70...80, а собственная емкость — не более 4...5 пФ (частота собственного резонанса не ниже 600...700 кГц). Для снижения емкости обмотку необходимо секционировать, желательно также использовать провод минимально достаточного диаметра с максимально толстым слоем лака (именно поэтому автором был выбран ПЭВТЛК-2). Оптимальные номиналы элементов R1 и C2 (а также R101 и C102) сильно зависят от паразитных параметров L1 (L101), поэтому при изменении конструкции L1 (L101) может потребоваться их экспериментальное уточнение. Готовую катушку пропитывают акриловым или полиуретановым лаком для обеспечения влаго- и вибростойкости. Самая лучшая пропитка — составом на основе полиэтиленового воска, но это не очень распространенный материал.

Экран для входного узла платы УВ можно изготовить из жести, воспользовавшись чертежом на **рис. 17**.

Для желающих подробнее ознакомиться с вопросами проектирования малошумящих усилителей можно рекомендовать лучший, на мой взгляд, из опубликованных на русском языке материал из переводного журнала ТИИЭР [23].

ЛИТЕРАТУРА

17. **Fritsch K.** Phasenverzerrungen durch unsymmetrische Wiedergabesystem bei der magnetischen Speicherung. — Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, 1967, Juni, s. 84—89.

18. **Цвикер Э., Фельдкеллер Р.** Ухо как приемник информации. — М.: Связь, 1971.

19. Интегральные микросхемы. Операционные усилители и компараторы. — М.: Додэка, 2002.

20. Резисторы. Справочник. — М.: Радио и связь, 1991.

21. Конденсаторы. Справочник. — М.: Радио и связь, 1993.

22. <<http://www.ferrite.ru/production.html>>.

23. **Нетцер И.** Проектирование малошумящих усилителей. — ТИИЭР, том 69, 1981, № 3, с. 58—74.

Редактор — А. Соколов, графика — автора

От редакции. "Бескомпромиссный" вариант УВ был продемонстрирован автором в редакции в сравнительном испытании с одним из лучших кассетных магнитофонов зарубежной фирмы. Воспроизведение высококачественных записей подтвердило исключительно высокий динамический диапазон УВ даже без системы шумоподавления, широкую полосу тракта и отсутствие заметных искажений, естественность звучания различных музыкальных инструментов.

КОМПЬЮТЕРЫ

E-mail: mail@radio.ru
Тел. 207-89-00

РАДИО № 3, 2005