

Новые усовершенствования аудиоусилителя на базе ОУ LM3886, включённого в мостовом режиме работы

Алексей Кузьминов

В статье описан двухканальный аудиоусилитель мощностью 40 Вт на базе четырёх мощных ОУ LM3886Т, включённых в мостовом режиме работы, и двухканального предварительного усилителя на двух сдвоенных ОУ ОРА1642 (или одного счетверённого ОУ ОРА1644), имеющих высокие показатели динамических характеристик (скорость нарастания и полоса пропускания), которые почти на порядок превосходят аналогичные показатели инструментальных усилителей (ИУ) AD8295, применённых в аудиоусилителях, описанных в [1] и [2] и INA2128 в [3]. Благодаря применению ОУ ОРА1642/ОРА1644 и новым схемным решениям настоящий аудиоусилитель не только воспроизводит синусоидальный сигнал звукового диапазона частот, поданный на его вход с генератора, с малыми искажениями, но и (главное) имеет переходную характеристику, близкую к прямоугольной (без выбросов и последующей затухающей осцилляции), которая существенно повышает качество воспроизведения перкуссионных инструментов. В статье также описан новый и более простой преобразователь однополярного напряжения в двухполярное (или формирователь искусственной «земли») на базе ОУ LM675/TDA2050. Приведены схемы, разводка плат и внешний вид устройств аудиоусилителя, а также описаны результаты его работы и конструкция.

Введение

Если с воспроизведением музыкальных файлов (фонограмм) во всём звуковом диапазоне частот аудиоусилители, описанные в [1] и [2], справляются неплохо, то при воспроизведении перкуссионных инструментов (барабаны, тарелки, металлические треугольники, ксилофоны и т.п.) эти усилители показывают себя не совсем адекватно. Так, например, при ударе барабанной палочкой по тарелке сам звук удара (так называемая атака) либо вовсе не слышен, либо слышен очень слабо, тогда как результат удара (дрожание тарелки) слышен очень хорошо. Дальнейший анализ показал, что причиной этого явления служит так называемая переходная характеристика усилителя, т.е. его реакция на «ступеньку» – относительно быстрое изменение входного напряжения от минимального (нулевого) значения до относительно высокого (и наоборот). А переходная характеристика усилителя тесным образом связана с его динамическими характеристиками: шириной полосы пропускания и, в первую очередь, со скоростью нарастания.

Сравнив динамические характеристики мощного ОУ LM3886 и ИУ, применённого в [1], [2] (AD8295) и [3] (INA2128) в качестве предварительного усилителя, было выяснено, что у ИУ эти динамические характеристики на порядок хуже, чем у ОУ LM3886 (см. далее). Поиск ИУ со скоростью нарастания не менее чем у ОУ LM3886 показал, что такие ИУ существуют (например, AD8250/AD8251/AD8253), однако их цена (от 1000 руб. до 3000 руб. и выше) просто зашкаливает, а поскольку их требуется два, то предварительный усилитель с такими ИУ будет и вовсе «золотым». Кроме того, для каждого из двух каналов предварительного усилителя потребуется ещё по два ОУ, один из которых также должен быть высокоскоростным. В итоге вся конструкция предварительного усилителя будет существенно осложнена. Поэтому от использования ИУ в предварительном усилителе автор отказался. В то же время автор нашел относительно недорогой и высокоскоростной ОУ ОРА164Х (одноканальный ОРА1641, сдвоенный ОРА1642 и счетверённый ОРА1644), который имеет



Дополнительные материалы к этой статье можно скачать, перейдя по ссылке в QR-коде

скорость нарастания, как у ОУ LM3886. Однако для использования такого ОУ в предварительном усилителе потребовались некоторые дополнительные схемные решения как в усилителе мощности на LM3886, так и в самом предварительном усилителе. Применяв два сдвоенных ОУ ОРА1642 или один счетверённый ОРА1644 в предварительном усилителе, автор получил такой результат, которого даже не ожидал. Это и является основным предметом настоящей статьи.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Вначале будут приведены принципиальные схемы устройств аудиоусилителя, затем разводка их плат и внешний вид (фотографии). Далее будут описаны результаты работы как предварительного усилителя, так и всего аудиоусилителя. Кроме того, будет описана конструкция всего аудиоусилителя.

Принципиальные схемы

Усилитель мощности (рис. 1, рис. 2) по своей схеме не отличается особой сложностью. В каждом канале использовано по два ОУ LM3886Т, которые включены идентично и представляют собой классические инвертирующие усилители на ОУ с коэффициентом усиления, равным $K = -R2/R1 = -10$. Конденсатор С1, стоящий в обратной связи ОУ, устраняет выбросы выходного напряжения с последующей затухающей осцилляцией (см. далее) на переходной характеристике (реакция ОУ на ступеньку). Резистор $R3 = R1 \parallel R3 = 1,8K$ сохраняет баланс токов на входе ОУ. RC-цепочка R8-R9-C4 – стандартная цепочка для входа Mute, которая при включении (и выключении) питания блокирует выходное напряжение ОУ на некоторое время, чтобы устранить треск в АС. Конденсатор С2 блокирует паразитную

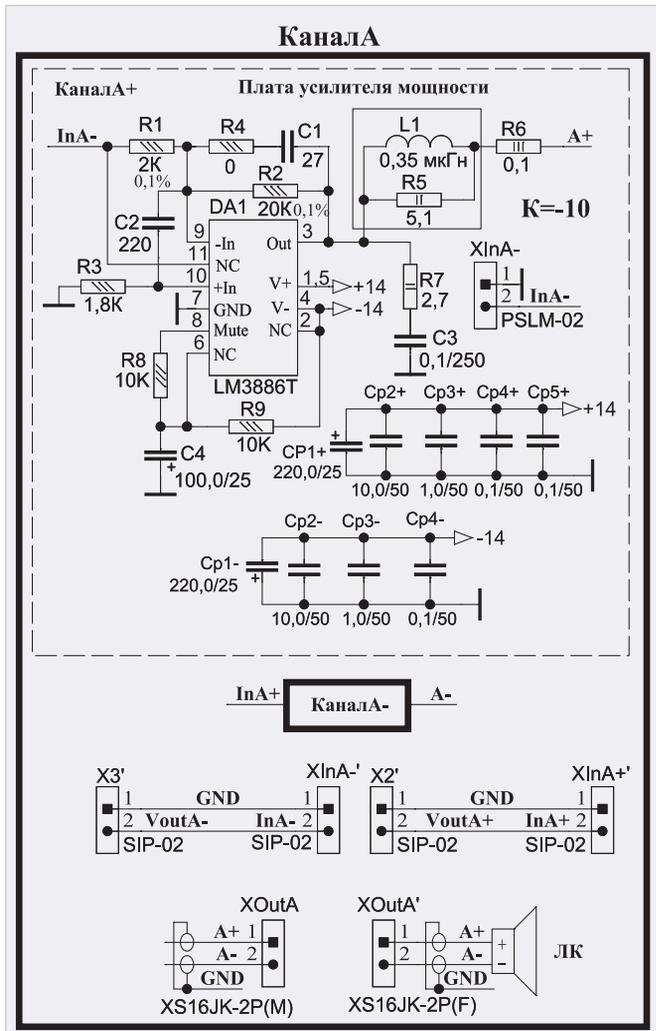


Рис. 1. Схема одного канала (А) усилителя мощности



Рис. 4. Схема формирователя искусственной «земли»

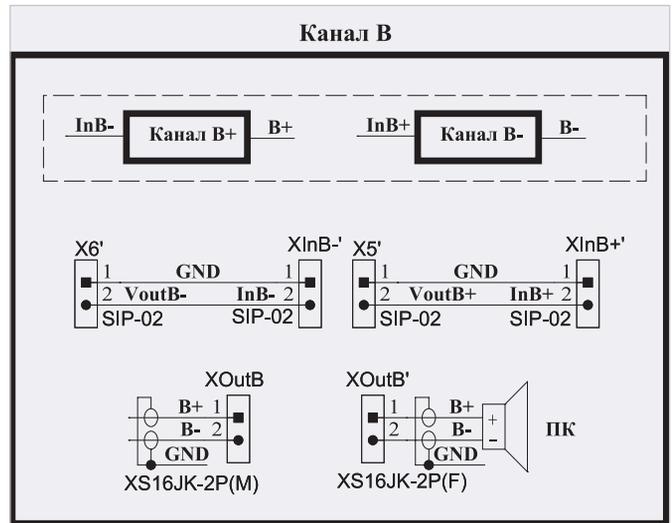


Рис. 2. Схема канала В

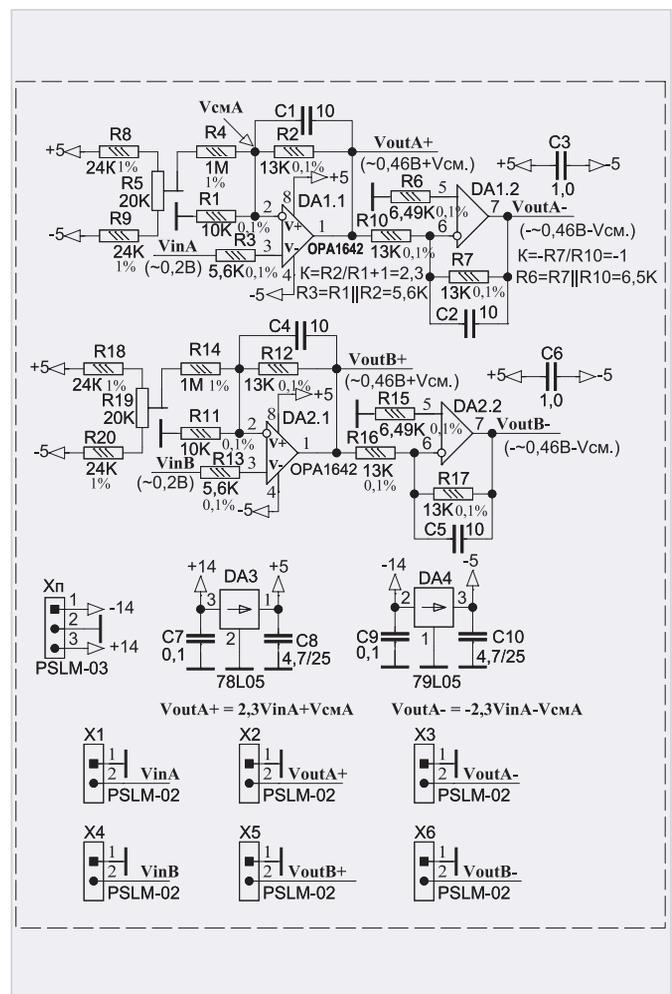


Рис. 3. Схема предварительного усилителя

генерацию ОУ на ВЧ. RL-цепочка L1-R5 и RC-цепочка R7-C3 блокируют проникновение ВЧ-составляющей в АС. Резистор R6 устраняет некоторый разбаланс токов двух экземпляров ОУ. Конденсаторы Cp1+ ... Cp5+ и Cp1-... Cp4- – блокировочные по положительному и отрицательному напряжениям питания. Схемы остальных трёх каналов (А-, В- и В+) аналогичны. Остальные элемен-

ты усилителей мощности понятны из схем рис. 1 и рис. 2. Схема рис. 1 с некоторыми изменениями и дополнениями взята из схем, приведённых в справочном листке (Datasheet) на ОУ LM3886. Какие произведены изменения в схеме по сравнению со схемами в [1] и [2]?
1. R6 и R7 – металлооксидные, которые по сравнению с проволочными

(типа КНР), применёнными в [1] и [2], имеют практически нулевую индуктивность (измеренная индуктивность на частоте 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц составила 0 мкГн). Измерение индуктивности производилось RLC-метром АКИП-6107. Эти небольшие индуктивности R6 и R7 в некоторой степени влияют на переходную характеристику усилителя.

2. Установлен конденсатор С2, отсутствующий в [1] и [2]. Этот конденсатор, рекомендуемый производителем, как указано в справочном листке (Datasheet), уменьшает коэффициент усиления (полосу пропускания усилителя) на высоких частотах, чтобы избежать паразитной генерации колебаний, возникающих при квазинасыщении выходного транзистора. Конденсатор также подавляет внешние электромагнитные помехи переключения, создаваемые люминесцентными лампами. Что касается люминесцентных ламп, то сейчас они практически не используются (по крайней мере, в квартирах), а вот то, что конденсатор исключает паразитную генерацию на ВЧ, имеет большое значение.

3. Катушка индуктивности L1 представляет собой 8 витков обмоточного провода ПЭТВ (или ПЭВ), расположенного прямо на резисторе R5 (С2-29В-1 мощностью 1 Вт). Диаметр провода увеличен до 1,2 мм (по сравнению с 1 мм в [2]). В [1] вместо L1, R5 и R6 использован один проволочный резистор номиналом 0,1 Ом, у которого количество витков проволоки равно 8. Однако по сравнению с L1, R5 и R6 это не одно и то же. Для получения качественной обмотки автор использовал хвостовик сверла диаметром 8 мм, зажатого в тисках. На хвостовик с натягом наматывается 8 витков провода; полученная катушка также с натягом надевается на резистор R5, концы провода очищаются от лака, облуживаются, и к ним припаиваются выводы R5 (они существенно тоньше). При диаметре провода 1,2 мм на резисторе помещается как раз 8 витков. После этого резистор с обмоткой уже впаивается в плату (см. фото далее). Измеренная индуктивность составила 0,35 мкГн. В справочном листке, если работает один ОУ, то к его выходу необходимо подключить RL-цепочку с номиналами $R = 10 \text{ Ом}$ и $L = 0,7 \text{ мкГн}$. Но поскольку в мостовом режиме используются два ОУ, включённые навстречу друг к другу, а при последовательном соединении резисторов и катушек индуктивностей сопротивления и индуктивности складываются, то и номиналы резистора R5 и индуктивности катушки L1 равны соответственно 5,1 Ом и 0,35 мкГн (т.е. они уменьшены в 2 раза).

4. Напряжение металлоплёночного полиэфирного конденсатора (марки

CL-20) с аксиальными выводами (СЗ на схеме) снижено с 400 В (в [1] и [2]) до 250 В, что уменьшило его размер (до 5×15 мм – см. далее).

5. Электролитические конденсаторы СР1+ и СР1– – низкоимпедансные (Low Impedance), которые по сравнению с конденсаторами с Low ESR, используемыми в [1] и [2], хорошо работают на высоких частотах. Автор использовал конденсаторы марки UPW компании Nichicon.

6. Плата сделана односторонней (как в [1]), и в противоположность в [2], где плата двусторонняя). Кроме того, в [2] на одной плате расположены сразу две микросхемы LM3886, а в [1] каждая микросхема расположена на одной плате, как и в настоящем усилителе. Это позволило в некоторой степени устранить зависимость работы микросхем по питанию друг от друга, так как питание и «земля» подводятся к каждой из четырёх плат отдельно.

7. Резисторы R1 и R2 имеют допуск по сопротивлению в 0,1% (по сравнению с [1] и [2], где допуск равен 1%), что позволяет существенно улучшить идентичность коэффициента усиления всех четырёх ОУ ($K = -10$).

8. Изменены номиналы RC-цепочки R4C1: вместо 20К и 47 пФ (как в [1], [2] и Datasheet) установлены 0К (перемычка) и 27 пФ. Это исключило перерегулирование (выброс напряжения и дальнейшие затухающие колебания частотой несколько МГц и длительностью до 2–3 мкс) при подаче на вход усилителя прямоугольного меандра для выяснения реакции усилителя на ступеньку (переходная характеристика). Теперь переходная характеристика усилителя близка к прямоугольной, а длительность фронта и среза составила не более 1,4 мкс (см. далее).

Эти на первый взгляд незначительные изменения схемы по сравнению с [1] и [2] позволили существенно улучшить качество воспроизведения ОУ LM3886 музыкального сигнала.

Коэффициент нелинейных искажений плюс шум (КНИ+Ш) у ОУ LM3886, включённом в качестве инвертирующего усилителя (как на рис. 1) при 4-омной нагрузке по справочному листку составляет не более 0,03%, при 8-омной нагрузке – не более 0,02%. Таким образом, удвоенное сопротивление нагрузки приводит к уменьшению КНИ+Ш приблизительно на 0,01% (и наоборот). Поскольку в мостовом режиме работы при 4-омной нагруз-

ке эквивалентная нагрузка каждого из ОУ будет составлять 2 Ома, то, экстраполируя погрешность на 0,01%, можно ожидать, что при этом КНИ+Ш будет составлять около 0,04%, а поскольку ОУ два, то, складывая погрешности, можно получить, что КНИ+Ш будет составлять около 0,08%, т.е. менее 0,1% в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц и в диапазоне мощностей от 1 Вт до 60 Вт. Этот вывод подтвердили результаты тестирования схемы рис. 1 (см. далее).

Предварительный усилитель (рис. 3) также не отличается особой сложностью. Но прежде чем его описывать, сделаем некоторое отступление относительно скоростных (динамических) характеристик ОУ и ИУ.

Каждый ОУ (и ИУ) характеризуется скоростью нарастания (Slew Rate) выходного напряжения в ответ на так называемую «ступеньку», т.е. на мгновенное изменение входного напряжения от 0 до максимума и наоборот (иное название – переходная характеристика). Эта скорость измеряется в В/мкс. Кроме того, ОУ характеризуется максимальной полосой пропускания (GBWP – Gain-Bandwidth Product), которая измеряется в МГц. Обе эти динамические характеристики обычно указываются вместе. Например, типовые значения у LM3886 составляют 19 В/мкс и 8 МГц. А вот у ИУ эти характеристики значительно хуже. Например, ИУ AD8295, применённый в [1] и [2], имеет 2,5 В/мкс и 1 МГц, а ИУ INA2128, описанный в [3], имеет 1,2 В/мкс и 1,3 МГц (см. соответствующие справочные листки – Datasheet). Таким образом, динамические характеристики ИУ почти на порядок хуже, чем у ОУ LM3886, а от динамических характеристик существенным образом зависит верность воспроизведения звука перкуссионных инструментов (барабаны, тарелки, различные металлические треугольники, ксилофоны и т.п.), особенно во время так называемой атаки, т.е. в момент начала первого удара. Другими словами, чем лучше динамические характеристики, тем реалистичнее будут воспроизводиться звуки перкуссии.

Теперь возвратимся к прерванной последовательности изложения. Как видно из рис. 3, в предварительном усилителе использованы два сдвоенных ОУ ОРА1642. Этот ОУ является одним из лучших ОУ, специально предназначенных для аудиоприло-

жений. Он из так называемой серии SoundPlus. Как написано в его справочном листке, ОРА1642 показывает «превосходное качество звука» и применяется в «профессиональном аудиооборудовании, аналоговых и цифровых микшерных пультах, оборудовании для вещательных студий, высококачественных аудио- и видео-приемниках, высококачественных Blu-ray плеерах». Его динамические характеристики (Slew Rate и GBWP) составляют 20 В/мкс и 11 МГц соответственно, т.е. чуть лучше, чем у LM3886, не говоря уже об ИУ. Автор использовал ИУ в [1], [2] и [3] по одной простой причине. У ИУ есть вход REF, изменяя напряжение на котором, можно легко регулировать напряжение смещения выходного сигнала ИУ и таким образом регулировать напряжение смещения каждого из выходных мощных усилителей LM3886, что требуется для адекватной работы мостового включения этого ОУ (см. далее настройку всей схемы). Но у ОУ ОРА1642 нет входа REF, а регулировать напряжение смещения выходных мощных ОУ требуется в обязательном порядке. Как быть? К счастью, этот вопрос может быть легко решен. Как видно из рис. 3, к инвертирующему входу ОУ DA1.1 (2-й вывод) подключён резистор R4, второй конец которого соединён с движком подстроечного резистора R5, входящего в состав делителя напряжения R8-R5-R9, подключённого к положительному и отрицательному напряжениям питания. Такая схема позволяет регулировать выходное напряжение смещения ОУ DA1.1 и ОУ DA1.2, включённого как инвертирующий ОУ, в пределах приблизительно ± 35 мВ (это напряжение между выходами обоих ОУ). Здесь необходимо отметить, что максимальное напряжение смещения каждого из ОУ LM3886 составляет около 5–7 мВ, а поскольку в мостовом режиме их два, общее напряжение смещения составит не более ± 15 мВ, и, таким образом, смещение ОУ DA1.1 и DA1.2 перекрывает его приблизительно в два раза. Схему на R8-R5-R9 и R4 автор «подсмотрел» в справочном листке на преобразователь действующего значения напряжения в постоянное (RMS-to-DC Converter) AD637 (компании Analog Devices), где как раз регулируется напряжение смещения ОУ, встроенного в AD637. Хотя эта схема не такая известная, её можно найти в Интернете и в других приложениях.

Если исключить из рассмотрения вышеописанную схему регулирования смещения, то можно заметить, что ОУ DA1.1 включён как классический неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным: $K = R2/R1 + 1 = 13K/10K + 1 = 2,3$. Для сохранения равенства токов на входах ОУ входной сигнал (V_{inA} с разъёма X1) подаётся на него через резистор R3, который, как известно, должен быть равен: $R3 = R1 \parallel R2 = (10K \times 13K) / (10K + 13K) = 5,652K \approx 5,6K$. Второй ОУ на DA1.2 включён как классический инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным: $K = -R7/R10 = -13K/13K = -1$. Как видно из схемы рис. 3, сигнал с выхода DA1.1 (1-й вывод, сигнал V_{outA+}) подаётся на инвертирующий вход DA1.2 (6-й вывод) через резистор R10 и одновременно на разъём X2. Выходной сигнал ОУ DA1.2 (7-й вывод, сигнал V_{outA-}) подаётся на разъём X3. Для сохранения баланса токов на входах DA1.2 резистор R6 должен быть равен: $R6 = R7 \parallel R10 = 13K \parallel 13K = 6,5K$ (на схеме $R6 = 6,49K$). Таким образом, учитывая напряжение смещения V_{cm} и коэффициенты усиления соответствующих ОУ, получаем, что $V_{outA+} = 2,3 \times V_{inA} + V_{cmA}$ и $V_{outA-} = -2,3 \times V_{inA} - V_{cmA}$. Для получения достоверных значений коэффициентов усиления резисторы R1, R2, R3 и R6, R7, R10 имеют допуск по номиналам не более 0,1%. Конденсаторы C1, C2 и C4, C5 установлены для получения приемлемой переходной характеристики аналогично C1 (рис. 1). Конденсаторы C3, C6 и C7...C10 – блокировочные.

Напряжения питания (± 14 В и «земля») на плату подаются с разъёма Xп. Для питания ОУ (± 5 В) используются два стабилизатора: 78L05 (DA3) и 79L05 (DA4). Конденсаторы C3...C6 положены по штату работы стабилизаторов.

Для канала В используется ОУ DA2 по аналогичной DA1 схеме.

Вместо двух сдвоенных ОУ ОРА1642 можно применить счетверённый ОУ ОРА1644. Схема для него такая же, как и на рис. 3, и отличается только нумерацией выводов, поэтому не приводится. Кроме того, резисторы R7, R10, R16 и R17 – по 10K, R6 и R15 – по 5K. А вот разводка у них разная, и номиналы отмеченных резисторов указаны на разводке (см. далее). Влияние каждого из ОУ, входящих в состав ОРА1642 и ОРА1644 (Channel Separation), составляет -126 дБ (см. Datasheet), т.е. ничтож-

но мало, поэтому разницы по применению двух ОРА1642 или одного ОРА1644 нет никакой. По стоимости ОУ ОРА1644 в несколько раз дешевле вышеописанных ИУ, а ОРА1644 немного дешевле двух ОРА1642.

Питание всего усилителя осуществляется от однополярного стабилизированного источника питания (ИП) с защитой от перегрузки по току (10 А) на базе IGBT-транзистора (DG20X06) с выходным напряжением 28 В, максимальным током 10 А и максимальной амплитудой пульсаций выходного напряжения при таком токе более 1 мВ, подробно описанного автором в статье [4]. На момент публикации статьи [4] транзистор DG20X06 стоил около 100 руб. Однако в настоящее время он подорожал почти в 2,5 раза. В связи с этим автор нашёл ещё два относительно недорогих IGBT-транзистора: MSG15T65 и HGTG5N120 (HGTG10N120), передаточные характеристики (Transfer Characteristics) которых несколько лучше, чем у DG20X06 (у них ещё больше напряжение смещения $V_{GE(th)}$), и которые несколько дешевле DG20X06. Эти два транзистора, на взгляд автора, вполне могут быть использованы в ИП взамен DG20X06. Чтобы не перегружать статью, сравнение переходных характеристик всех трёх транзисторов приведено в дополнительных материалах к статье на сайте журнала.

Преобразователь однополярного питания в двухполярное или формирователь искусственной «земли»

Такой преобразователь однополярного питания $+28$ В в ± 14 В требуется как для питания платы усилителя мощности (рис. 1), так и для питания предварительного усилителя (рис. 3). Поскольку в мостовом включении LM3886 силовой «земли» нет, то имеется только вспомогательная «земля». Как можно заметить из рис. 1, к этой вспомогательной «земле» подключены все конденсаторы (кроме C2). Потребление тока LM3886 (по «земле») составляет не более 40...50 мА, а поскольку их 4, то общее потребление тока усилителя мощности (по «земле») составит не более 0,2 А. Потребление тока предварительного усилителя не более 0,1 А. Кроме того, двухполярное питание ± 14 В требуется, если используется пик-детектор (как,

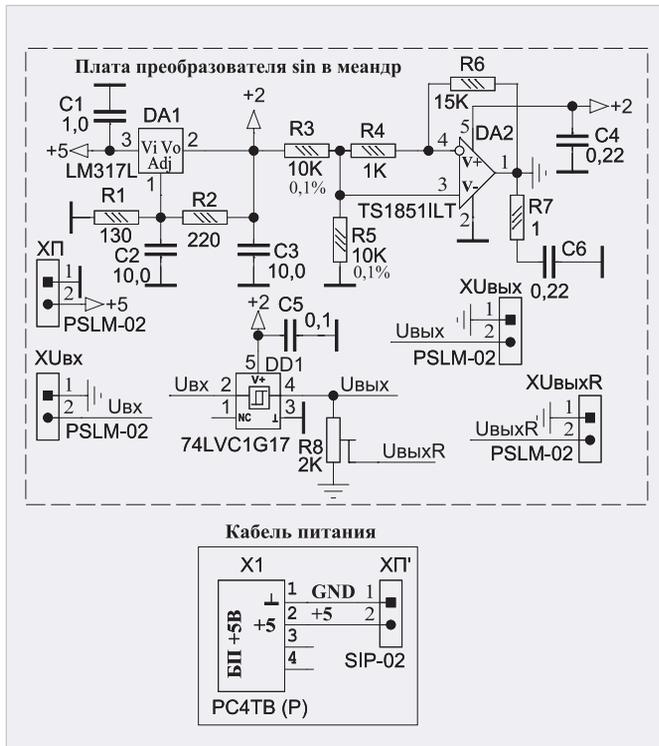


Рис. 5. Преобразователь синусоидального сигнала в прямоугольный меандр

например, в [2]), который потребляет не более 50 мА. Также такое питание требуется, если используется двухканальный индикатор уровня звука на TFT-дисплее [5], который потребляет около 0,1 А. Таким образом, общее потребление тока (по «земле») всех перечисленных устройств не превышает 0,5 А.

В [2] используется преобразователь однополярного питания в двухполярное на базе ОУ LM1875, подробно описанный автором в [6]. Однако, как показала практика, преобразователь на базе LM1875 имеет несколько существенных недостатков.

Первый недостаток – сама схема. Она представляет собой повторитель напряжения на ОУ LM1875, к неинвертирующему входу которого подключена средняя точка делителя напряжения питания (28 В) в 2 раза на основе двух резисторов одинакового номинала, а выход ОУ является искусственной «землей», относительно которой и получаются два напряжения ± 14 В. К выходу ОУ также подключены два конденсатора, один из которых подключён к +14 В, а второй к -14 В. Эти конденсаторы в обязательном порядке должны быть низкоимпедансными (Low Impedance). Если же эти конденсаторы обычные и даже с Low ESR, то в такой схеме возникает паразитная генерация частотой 300–500 Гц и

с амплитудой, доходящей до напряжений питания, т.е. такая схема склонна к самовозбуждению. Низкоимпедансные конденсаторы достаточно дорогие и нередко по стоимости превышают стоимость самого ОУ LM1875 (около 100 руб.) в полтора, а то и в 2 раза.

Второй недостаток – в схеме используется достаточно габаритный подстроечный резистор, из-за чего возрастают габариты всей платы.

Третий недостаток – LM 1875 существенно нагревается, поэтому для его работы требуется достаточно габаритный радиатор.

Четвёртый недостаток состоит в следующем. ОУ LM 1875 достаточно хорошо известен (он, как правило, используется в аудиоусилителях), поэтому выпускается многими компаниями, и нередко можно столкнуться с его подделками, которые внешне не отличаются от оригинальных, но с существенно худшими параметрами, чем у оригинала, а то и вовсе не работающих. В Интернете, например, можно найти много фотографий сравнения оригинальных и поддельных LM1875 с удалённой пластиковой частью корпуса, когда видно сам обнажённый кристалл, который у поддельных в 4 раза меньше по площади, чем у оригинальных.

Все эти недостатки отсутствуют в схеме формирователя искусственной «зем-

ли» на базе менее известного (но более качественного) ОУ LM675 (рис. 4). Эта схема приведена в справочном листке на LM675. Как можно заметить из этой схемы, в ней также имеется делитель напряжения питания в 2 раза на резисторах R1 и R3, точка соединения которых подключена к неинвертирующему входу (1-й вывод) и одновременно через резистор R2 – к инвертирующему (2-й вывод), а между выходом ОУ (4-й вывод) и его инвертирующим входом установлен резистор RC R4. Таким образом, рассматривая ОУ со стороны инвертирующего входа, можно заметить, что он представляет собой инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления, равным $K = -R4/R2 = -15K/1K = -15$, а рассматривая его с неинвертирующего входа, $-K = R4/R2 + 1 = 15K/1K + 1 = 16$. К выходу ОУ, являющемуся как раз искусственной «землей», также подключена RC-цепочка R5-C1, которая препятствует самовозбуждению ОУ существенно лучше, чем вышеописанные низкоимпедансные конденсаторы в схеме с LM1875. Другими словами, R5-C1 полностью исключает генерацию. Кроме того, в схеме используются всего два достаточно дешёвых керамических конденсатора C1 и C2 для поверхностного монтажа (см. далее). Тестировании формирователя искусственной земли будет описано далее.

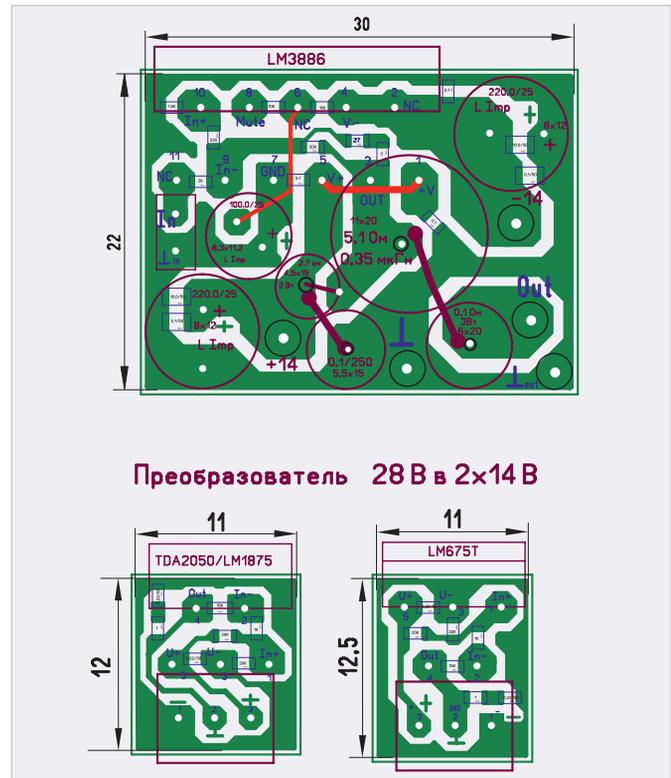


Рис. 6. Разводка платы усилителя мощности

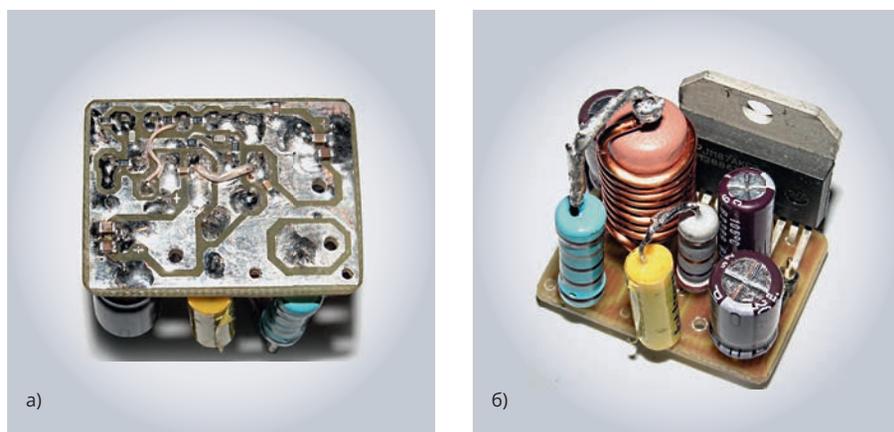


Рис. 7. Фотография платы усилителя мощности:
а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны

LM675 сейчас можно приобрести по стоимости около 200 руб., что в 2 раза выше стоимости LM1875, однако все компоненты платы обойдутся всё равно дешевле, чем компоненты платы с LM1875. Вместо LM675 можно использовать микросхему ОУ TDA2050, которая чуть дешевле (около 180 руб.) и которая также показала отличный результат работы. В связи с простотой схемы рис. 4 плата получилась миниатюрной (см. далее разводку платы). Разводка для TDA2050 также приведена (см. далее). В связи с высокими показателями схемы рис. 4 она и применена в усилителе.

Напряжение питания от ИП (+28 В) поступает в усилитель (в том числе и на описываемый преобразователь) с разъёма XS20JK-4P (Хр, рис. 4), который обеспечивает максимальный ток до 25 А на контакт.

Для оценки переходной характеристики (реакции на ступеньку) усилителя был сконструирован преобразователь синусоидального сигнала (полученного с генератора) в прямоугольный меандр (рис. 5). Поскольку от такого преобразователя требуется как можно меньшие времена фронта и среза выходного сигнала, чтобы он был действительно ступенчатый, в схеме применена простейшая цифровая микросхема триггера Шмидта 74LVC1G17 (DD1), у которого при его питании напряжением в 2 В времена фронта и среза по справочному листку (Datasheet) составляют не более 4 нс. Питание схемы осуществляется от любого стабилизированного ИП напряжением +5 В и током не более 50 мА (схема в нижнем на рис. 5 пунктирном прямоугольнике). Для получения напряжения 2 В используется регулируемый стабилизатор LM317L

(DA1), выходное напряжение которого, как известно, определяется формулой: $U_{\text{вых}} = 1,25 \text{ В} \times (1 + R1/R2) = 1,25 \text{ В} \times (1 + 130 \text{ Ом} / 220 \text{ Ом}) = 1,988 \text{ В} \approx 2 \text{ В}$. Этим напряжением питается как сам триггер Шмидта (DD1), так и ОУ TS1851ILT (DA2), предназначенный для получения искусственной «земли» (перевернутая ёлочка). Схема на ОУ DA2 работает аналогично схеме описанного выше формирователя искусственной «земли» на LM675T (рис. 4), поэтому, на взгляд автора, в пояснении не нуждается. А сама искусственная «земля» в схеме требуется, поскольку сигнал с генератора (например, описанного автором в [7]) изменяется относительно «земли» как в положительную, так и в отрицательную область напряжений, а триггер Шмидта работает с однополярным питанием (в данном случае от +2 В). Поэтому для того, чтобы выходной сигнал с преобразователя также изменялся относительно этой искусственной «земли» как в положительную, так и в отрицательную область напряжений, входной сигнал с генератора подаётся на разъём XUвх (сигнал Uвх и «земля» – перевернутая ёлочка), а два выходных сигнала снимаются с разъёмов XUвых (сигнал Uвых и «земля» – перевернутая ёлочка) и XUвыхR (сигнал UвыхR и «земля» – перевернутая ёлочка). Поскольку сигнал XUвых имеет фиксированную амплитуду (1 В), так как питание DD1 составляет 2 В), а иногда может потребоваться сигнал с меньшей амплитудой (например, для проверки переходной характеристики предварительного усилителя), применён подстроечный резистор R8, с которого можно получить сигнал (UвыхR) с амплитудой от 0 до 1 В, определяемой положением движка R8. Кон-

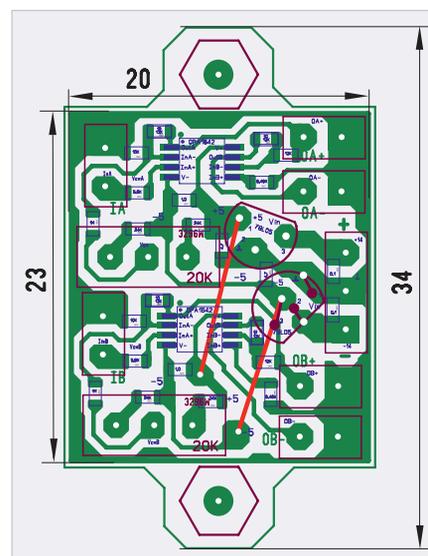


Рис. 8. Разводка платы предварительного усилителя на двух ОРА1642

денсаторы C1...C5 – блокировочные и положены по штату работы соответствующих микросхем. Как описывалось выше, конденсатор C6 входит в состав RC-цепочки R7-C6, которая препятствует самовозбуждению ОУ DA2.

Перечисленные изменения и дополнения в схемах усилителя мощности на базе ОУ LM3886 и формирователя искусственной «земли» на базе LM675 несомненно играют большую роль в качестве воспроизведения музыкального сигнала всем усилителем. Однако ключевым моментом, изюминкой всей конструкции является предварительный усилитель на базе высокоскоростного, широкополосного и имеющего высокие показатели динамических характеристик ОУ ОРА1642/ОРА1644, применение которого взамен ИУ более реалистично воспроизводит перкуссионные компоненты, в том числе фонограмм, что, в свою очередь, исключает «песок», а также существенно повышает чистоту и прозрачность звука.

Разводка и внешний вид плат

Разводка всех плат сделана автором с помощью программы SprintLayout 6.0. Файл разводки приведён в дополнительных материалах к статье на сайте журнала. Разводка всех плат односторонняя. На плате усилителя мощности (рис. 6) установлены две переключки. Первая соединяет 6-й вывод LM3886 с минусовым выводом конденсатора (C4, рис. 1) в схеме Mute. Эта переключка сделана проводом МГТФ сечением 0,05 мм². Вторая

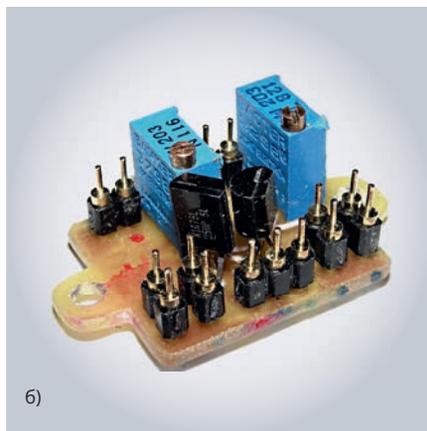
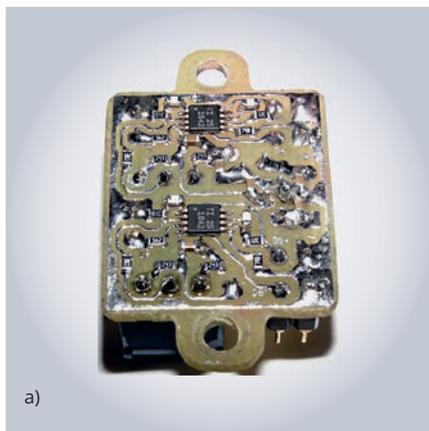


Рис. 9. Фотография платы предварительного усилителя на двух ОРА1642: а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны

соединяет 1-й и 5-й вывод LM3886. Она сделана проводом МГТФ сечением $0,5 \text{ мм}^2$. Обе перемычки показаны на рис. 6 красным цветом. Их также можно заметить на рис. 7а. Сама плата не имеет крепёжных отверстий, поскольку держится на всех 11 выводах микросхемы LM3886, которая закреплена винтом М3 на радиаторе через изолирующую теплопроводящую керамическую прокладку (для корпуса ТО-264) с использованием теплопроводящей пасты КПТ-8 (см. далее).

На платах предварительного усилителя (рис. 8, рис. 10) также установлены перемычки, которые следует сделать проводом сечением $0,05 \text{ мм}^2$. Они показаны красным цветом. Эти перемычки можно заметить на рис. 9б и 11б. Конденсаторы, стоящие в обратной связи (ОС) всех четырёх ОУ (С1, С2, С4 и С5, рис. 3), непосредственно припаяны к резисторам ОС (R2, R7, R12 и R17, рис. 3) соответственно поверх них. Эти конденсаторы можно заметить на рис. 9а и рис. 11а (они белого цвета).

Платы прикручиваются к днищу корпуса аудиоусилителя винтами М3 и шестигранными латунными (или пластиковыми) стойками с внутренней резьбой М3 через крепёжные отверстия, расположенные по бокам плат (см. далее).

Разводка плат формирователей искусственной земли показана на рис. 12. В усилителе используется плата на базе ОУ LM675 (рис. 12а). ОУ TDA2050, включённый также по схеме рис. 4, имеет иную формовку выводов, поэтому и отличную от LM675 разводку (рис. 12б). Резистор R5 (рис. 4) номиналом 1 Ом составлен из двух резисторов номиналом 2 Ом, включённых параллельно, которые расположены один над другим (вначале припаивается один

резистор, а затем поверх него – второй). Эти резисторы можно заметить на рис. 13а и рис. 14а (на них нанесена надпись «2R0»). Платы также не имеют крепёжных отверстий, поскольку держатся на достаточно прочных выводах микросхем, а сами микросхемы прикручены к небольшому радиатору винтами М3 через керамическую изолирующую теплопроводящую прокладку с использованием пасты КПТ-8. Сам радиатор прикручен к днищу корпуса винтами М2,5 (см. далее). Общий вид обеих плат показан на рис. 13 и рис. 14.

Плата преобразователя синусоидального сигнала в прямоугольный меандр (разводка рис. 15, общий вид рис. 16) довольно миниатюрна и имеет размер $12 \times 27 \text{ мм}$. Эта плата в самом усилителе не используется. Она расширяет возможности генератора [7] по воспроизведению прямоугольных сигналов с короткими фронтами и срезами. Эту плату можно расположить в отдельном корпусе, для чего по её бокам предусмотрены крепёжные отверстия диаметром 2 мм.

Настройка, тестирование устройств усилителя и результаты их работы

Ниже будет описано испытание и настройка четырёх устройств:

1. Формирователь искусственной «земли» (рис. 4, рис. 12, рис. 13, рис. 14) – только тестирование.
2. Преобразователь синусоидального сигнала в прямоугольный меандр (рис. 5, рис. 16) – только тестирование.
3. Предварительный усилитель (рис. 3, рис. 9, рис. 11) – настройка и тестирование.
4. Каждый канал усилителя мощности (рис. 1, рис. 7) – настройка и тестирование.

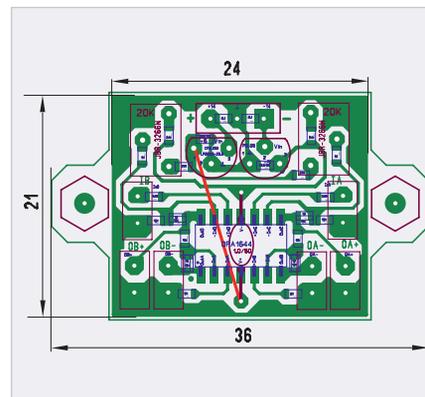


Рис. 10. Разводка платы предварительного усилителя на ОРА1644

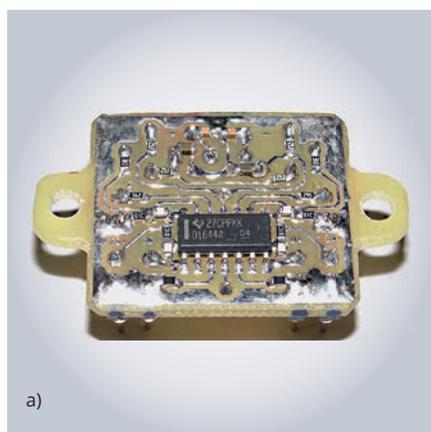
Вышеуказанный порядок (1–4) определяется тем, что формирователь искусственной «земли» и преобразователь синусоидального сигнала в прямоугольный меандр используются для настройки и тестирования предварительного усилителя и усилителя мощности.

Тестирование формирователя искусственной «земли»

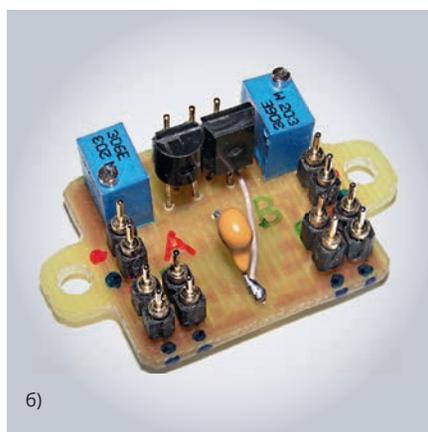
Как было замечено выше, потребление тока всех компонентов усилителя (по искусственной «земле») не превышает 0,5 А. Автором была сделана проверка работы схемы (рис. 4) путём подключения выхода ОУ (4-й вывод DA1, рис. 4) к напряжениям питания через нагрузочный резистор 14 Ом (два резистора номиналом 10 Ом и 3,9 Ом мощностью 7 Вт каждый, включённые последовательно), который обеспечивает ток, равный $14 \text{ В} / 14 \text{ Ом} = 1 \text{ А}$ (т.е. с двойным запасом по току). При этом цифровым тестером производились измерения напряжений между «землёй» и положительным и отрицательным потенциалами ИП как без подключения резистора, так и с его подключением.

Вначале тестировался преобразователь на базе LM675 (рис. 4, рис. 12а, рис. 13).

Вот результат. Без подключения нагрузочного резистора положительное напряжение составило +14,08 В. При подключении нагрузочного резистора к положительному напряжению питания оно стало +14,07 В, а при подключении к отрицательному – +14,08 В (т.е. не изменилось). Отрицательное напряжение без подключения нагрузочного резистора составило –14,0 В. При подключении

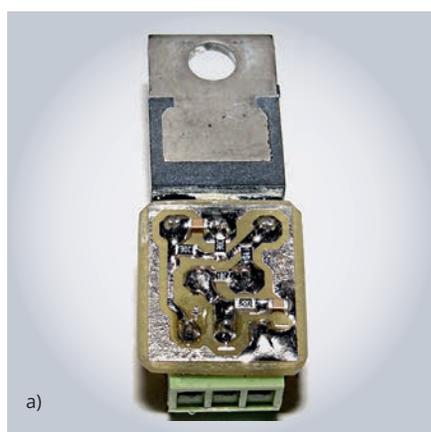


а)

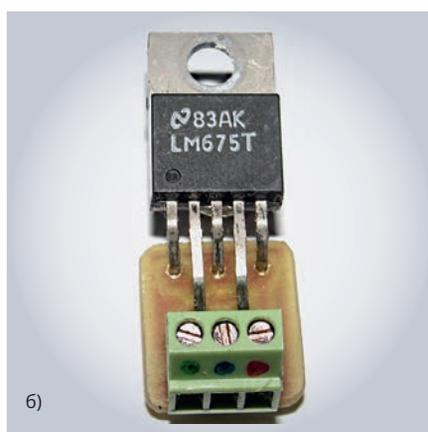


б)

Рис. 11. Фотография платы предварительного усилителя на OPA1644: а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны

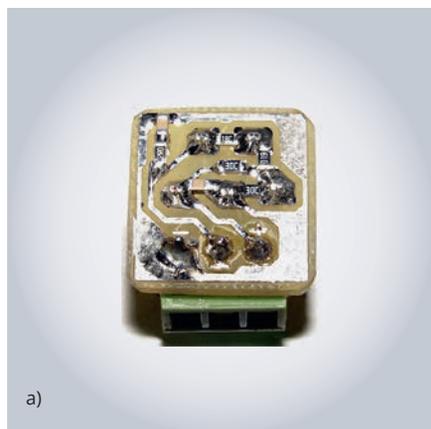


а)

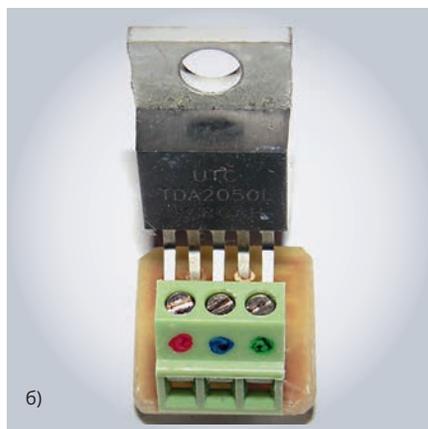


б)

Рис. 13. Фотография платы формирователя искусственной «земли» на базе LM675: а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны



а)



б)

Рис. 14. Фотография платы формирователя искусственной «земли» на базе TDA2050/LM1875: а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны

нагрузочного резистора к положительному напряжению отрицательное напряжение составило $-13,96$ В, а к отрицательному также составило $-13,96$ В.

Далее тестировался преобразователь на базе TDA2050 (рис. 4, рис. 12б, рис. 14). Без подключения нагрузочного резистора положительное напряжение составило $+14,07$ В. При подключении нагрузочного резистора к

положительному и отрицательному напряжениям оно составило $+14,04$ и $+14,06$ В соответственно. Отрицательное напряжение составило -14 В. При подключении нагрузочного резистора к положительному и отрицательному напряжениям оно составило $-13,96$ В и $-13,98$ В соответственно.

Таким образом, симметрия «земли» без нагрузки и с нагрузкой, как для преобразователя на базе LM675, так и

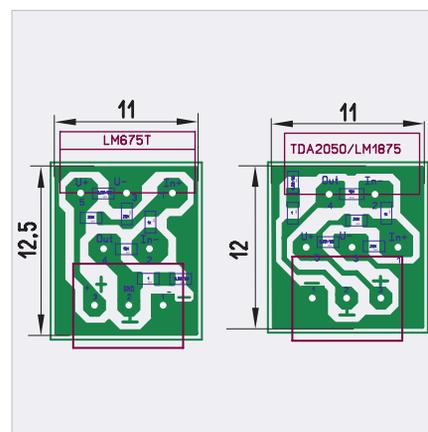


Рис. 12. Разводка плат формирователя искусственной «земли»:

- а) на базе LM675,
б) на базе TDA2050/LM1875

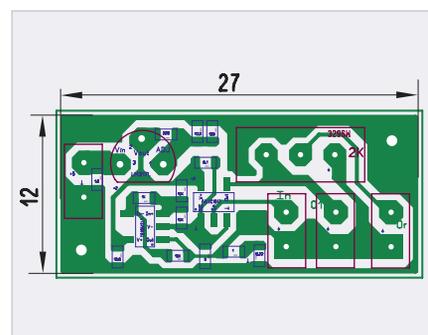


Рис. 15. Разводка платы преобразователя синусоидального сигнала в прямоугольный меандр

для преобразователя на базе TDA2050, практически сохранилась. Автор подключал осциллограф к «земле» и питанию $+14$ В и -14 В как без нагрузки, так и с нагрузкой. Никакой паразитной генерации не было и в помине. Кроме того, поскольку типовое потребление тока LM675 (см. Datasheet) всего 18 мА (против 70 мА у LM1875 и около 50 мА у TDA2050), т.е. в 3–4 раза меньше, нагрев этого ОУ намного меньше (даже при токе 1 А), и поэтому для него требуется радиатор меньшего размера.

Тестирование платы преобразователя синусоидального сигнала в прямоугольный меандр

Для этого на вход преобразователя (XUвх, рис. 5) подавался синусоидальный сигнал с генератора [7] частотой 50 кГц, чтобы можно было рассмотреть фронт и срез выходного сигнала с преобразователя (XUвыхR, рис. 5) с помощью двухканального цифрового осциллографа с открыты-

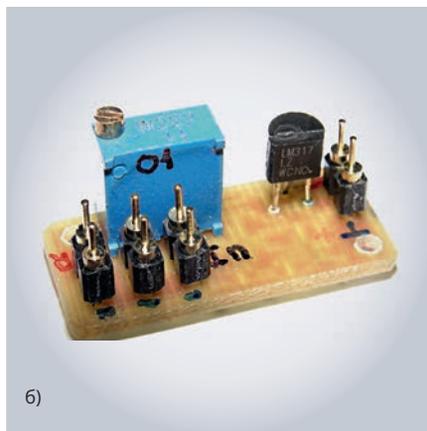
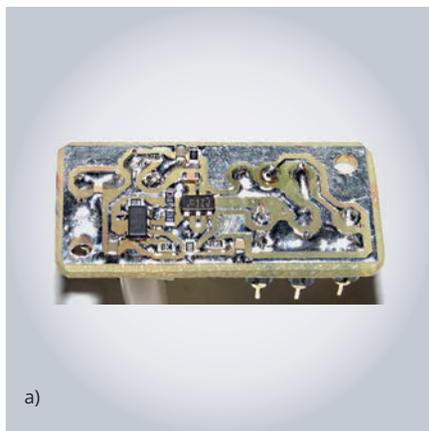


Рис. 16. Фотография платы преобразователя синусоидального сигнала в прямоугольный меандр: а) вид со стороны дорожек, б) вид с обратной стороны

ми входами (режим «DC») и развёртке 2 мкс/деление («Time 2.000us», «Freq(2) = 50.00 kHz», рис. 17а). При развёртке 200 нс / деление можно более подробно рассмотреть фронт («Rise») и срез («Fall») выходного сигнала с преобразователя, которые составили 76 нс («Rise(2) = 76.00ns» – рис. 17б) и 84 нс («Fall(2) = 84.00ns») соответственно. Такие значения фронта и среза автотестирование было закончено.

Тестирование и настройка платы предварительного усилителя

Настройка и тестирование проводилось для двух плат: на базе ОУ ОРА1644 (рис. 11) и на базе двух ОУ ОРА1642 (рис. 9).

Вначале необходимо настроить «нули» выходных сигналов. Для этого установить переключки между входами и «землёй» каждого канала (замкнуть контакты 1 и 2 на разъёмах X1 и X4 схемы рис. 3). Подключить цифровой тестер в режиме измерения постоянного напряжения (DC) между контактами «2» разъёмов X2 и X3 (VoutA+ и VoutA–, X2, X3, рис. 3) для канала А и между контактами «2» разъёмов X5 и X6 (VoutB+ и VoutB–, X5, X6, рис. 3) для канала В. Вращением подстроечных резисторов R5 (для канала А) и R19 (для канала В) добиться нулевых показаний напряжения тестера. Эта настройка только предварительная, так как в дальнейшем она будет изменена (уточнена) при тестировании усилителя мощности (см. далее).

Далее производилось тестирование взаимной инверсии выходных сигналов предварительного усилителя и проверки коэффициента уси-

ления на трёх частотах: 20 Гц, 1 кГц и 20 кГц. Для этого на входы предварительного усилителя (X1, X4, рис. 3 для каналов А и В соответственно) с генератора [7] подавался синусоидальный сигнал амплитудой 0,5 В (размах 1 В) и соответствующей частоты, а с выходов предварительного усилителя (X2, X3 и X5, X6, рис. 3, для каналов А и В соответственно) снимались выходные сигналы, которые подавались на входы двухканального цифрового осциллографа с открытыми входами (режим «DC»). Тестирование (рис. 18) показало, что сигналы взаимно инверсны, а коэффициент усиления соответствует значению 2,3 – размах 2,3 В («Vpp(1) = 2.30V», «Vpp(2) = 2.30V») на всех трёх частотах: 20 Гц, («Freq(1) = 20.04 Hz»), 1 кГц («Freq(1) = 1.000kHz») и 20 кГц («Freq(1) = 20.00kHz»).

Далее производилась проверка синусоидальности выходных сигналов каждого из усилителей (инвертирующего и неинвертирующего) на трёх частотах 16 Гц, 1 кГц и 20 кГц. Для этого на вход предварительного усилителя с генератора подавался сигнал с такой амплитудой, чтобы выходной сигнал имел амплитуду $U_{\text{Амп}} = 1$ В (размах 2 В). При этом, как известно, если сигнал синусоидальный, то его действующее значение $U_{\text{д}} (U_{\text{RMS}})$ должно равняться: $U_{\text{д}} = U_{\text{Амп}} / \sqrt{2} \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071 = 1 \text{ В} \times 0,7071 = 0,7071 \text{ В}$ или около 707 мВ. Анализируя рис. 19, можно заключить, что при размахе выходного сигнала в 2 В («Vpp(2) = 2.00V»), т.е. с амплитудой в 1 В, действующее значение $U_{\text{д}} = 707 \text{ мВ}$ («Vrms(2) = 707mV») на всех трёх частотах: 16 Гц («Freq(2) = 16.03Hz»), 1 кГц («Freq(2) = 1.000kHz») и 20 кГц («Freq(2) = 20.00kHz»). Это означает, что сигнал

с выхода неинвертирующего усилителя синусоидален.

Аналогично была проведена проверка синусоидальности выходного сигнала инвертирующего усилителя (рис. 20). Анализируя осциллограммы рис. 20, можно заключить, что при трёх частотах (16 Гц, 1 кГц и 20 кГц) действующее значение выходного сигнала составило те же 707 мВ при амплитуде 1 В, что позволяет констатировать, что сигнал с выхода инвертирующего усилителя также синусоидален.

После этого была проведена проверка переходных характеристик инвертирующего и неинвертирующего ОУ предварительного усилителя. Для этого на вход предварительного усилителя был подан прямоугольный меандр с преобразователя синусоидального сигнала в прямоугольный меандр, а на преобразователь – сигнал с генератора частотой 50 кГц, чтобы можно было более подробно рассмотреть длительность фронта и среза выходных сигналов предварительного усилителя. Анализируя рис. 21а, рис. 21б и рис. 21в, можно заключить, что переходная характеристика предварительного усилителя имеет почти прямоугольную форму, в которой отсутствуют выбросы с последующей затухающей осцилляцией. Такие переходные характеристики получены в результате установки конденсаторов C1, C2, C4 и C5 (рис. 3) номиналом 10 пФ (подобранных экспериментально) в ОС инвертирующего и неинвертирующего ОУ предварительного усилителя. Как пример, приведены переходные характеристики при отсутствии этих конденсаторов (рис. 21г, д), которые показывают, что в этом случае имеют место выбросы выходных сигналов с последующей затухающей осцилляцией длительностью, в несколько раз превышающей длительность фронта и среза выходных сигналов ОУ с конденсатором в ОС. При увеличении номинала конденсатора в ОС свыше 10 пФ длительность фронта и среза затягивается, а при уменьшении (например, до 5,6 пФ) появляются выбросы (правда, меньшей амплитуды, чем вообще без конденсатора, как на рис. 21г, д).

Тестирование второго канала предварительного усилителя на базе ОУ ОРА1644, а также обоих каналов предварительного усилителя на базе двух ОУ ОРА1642 показало аналогичные результаты.



Рис. 17. Входной сигнал с генератора (жёлтый) и выходной сигнал (бирюзовый) с преобразователя: а) развёртка 2 мкс/деление («Time 2.000 us»); б), в) развёртка 200 нс/деление («Time 200.0 ns»)

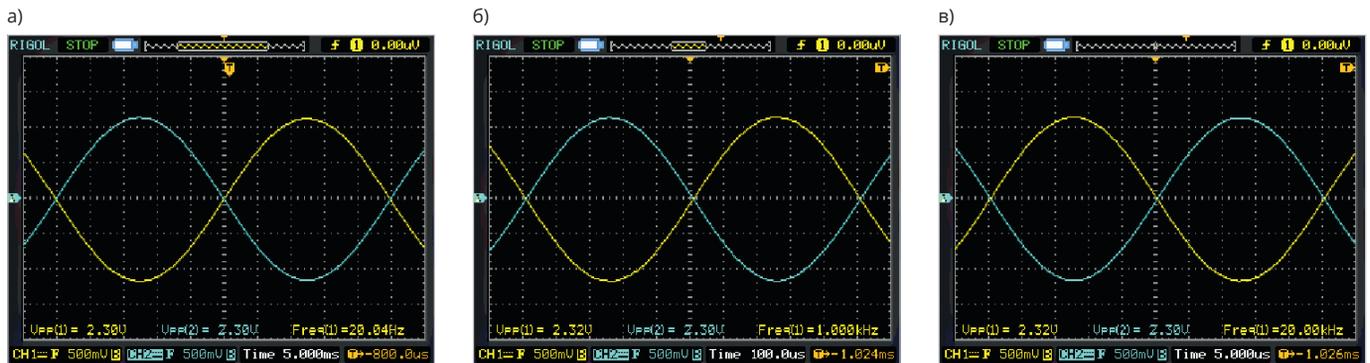


Рис. 18. Проверка взаимной инверсии выходных сигналов одного канала предварительного усилителя и его коэффициента усиления: а) на частоте 20 Гц, б) на частоте 1 ГГц, в) на частоте 20 кГц

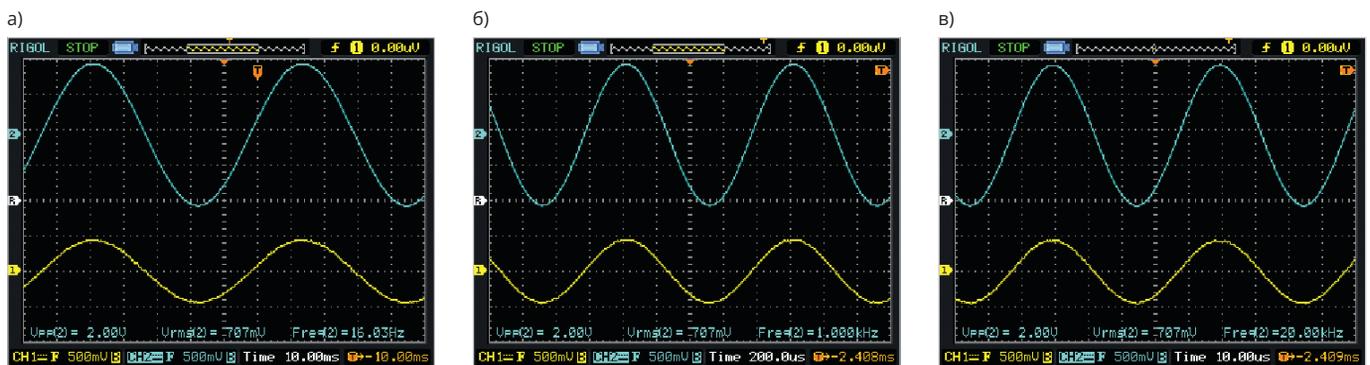


Рис. 19. Проверка синусоидальности выходного сигнала неинвертирующего усилителя одного канала предварительного усилителя (выходной сигнал – бирюзовый, входной с генератора – жёлтый): а) 16 Гц, б) 1 кГц, в) 20 кГц

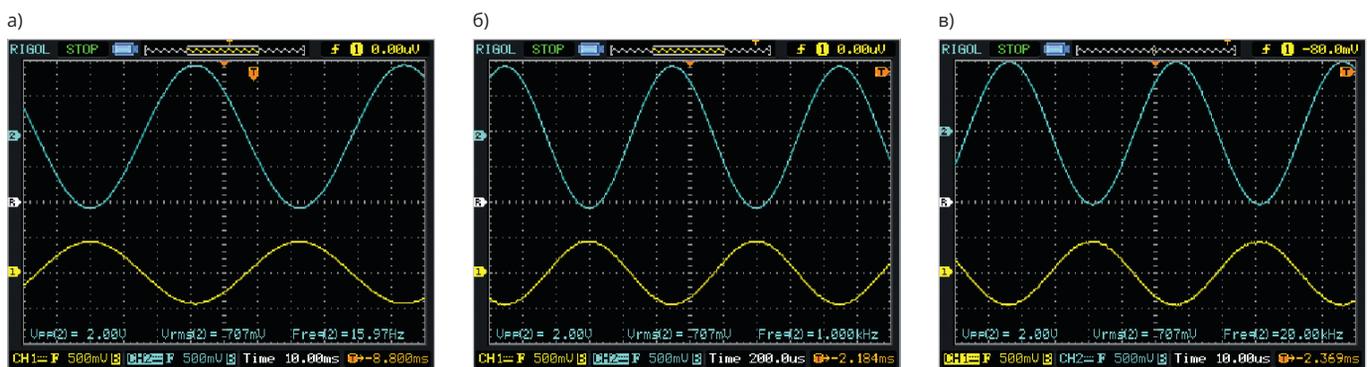


Рис. 20. Проверка синусоидальности инвертирующего усилителя одного канала предварительного усилителя (выходной сигнал – бирюзовый, входной с генератора – жёлтый): а) 16 Гц, б) 1 кГц, в) 20 кГц

Резюмируя всё вышесказанное относительно настройки и тестирования предварительного усилителя, можно констатировать, что:

1) выходные сигналы каждого канала предварительного усилителя взаим-

ноинверсны и имеют одинаковый коэффициент усиления, равный 2,3; 2) во всём звуковом диапазоне частот все выходные сигналы предварительного усилителя строго синусоидальны;

3) переходная характеристика предварительного усилителя имеет практически прямоугольную форму. Выбросы с последующей затухающей осцилляцией на фронтах и срезах полностью отсутствуют, а длитель-

ность фронтов и срезов не превышает 0,2 мкс.

Тестирование и настройка плат усилителя мощности

Вначале необходимо настроить «нули» выходных сигналов мощных ОУ. Для этого установить переключки между входами и «землёй» каждого канала предварительного усилителя (замкнуть контакты 1 и 2 на разъёмах X1 и X4 схемы рис. 3). К выходному разъёму канала А (XOutA, рис. 1) подключить ответный разъём (XOutA, рис. 1), к которому подключить нагрузочный резистор номиналом 3,9 Ом мощностью 50 Вт. Такой же резистор подключить к каналу В. К входным разъёмам XInA- и XInA+ (рис. 1) подключить кабели от канала А предварительного усилителя. На входных разъёмах XInB- и XInB+ предварительного усилителя (рис. 2) установить переключки, т.е. заземлить эти входные сигналы. Подключить цифровой тестер в режиме измерения постоянного напряжения (DC) между выводами нагрузочного резистора. Далее включить питание усилителя и, вращая подстроечный резистор канала А предварительного усилителя (R5, рис. 3), добиться показания тестера, равного около 1 мВ. Меньше устанавливать не рекомендуется во избежание перекрытия выходных сигналов между двумя мощными ОУ. Многооборотный подстроечный резистор R5 позволяет настроить измеряемое напряжение с точностью до 0,1 мВ. Канал В настраивается аналогично.

Для проверки синусоидальности выходных сигналов усилителя мощности к нагрузочному резистору канала А был подключён один канал двухканального цифрового осциллографа с открытыми входами (режим DC), а ко входу А предварительного усилителя (X1, рис. 3) был подключён кабель от генератора синусоидальных сигналов [7]. Тестирование проводилось при двух режимах: установке амплитуды выходного напряжения усилителя мощности, равной 10 В (размах 20 В) (рис. 22) и 18 В (размах 36 В) (рис. 23) при трёх частотах: 20 Гц, 1 кГц и 20 кГц. Если сигнал синусоидален, то при амплитуде $U_{\text{Амп}} = 10$ В и размахе 20 В (« $V_{\text{pp}}(1) = 20,0\text{В}$ », рис. 22) действующее значение $U_{\text{д}} (U_{\text{RMS}}) = U_{\text{Амп}} \frac{1}{\sqrt{2}} \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071 = 10 \text{ В} \times 0,7071 = 7,071 \text{ В}$ (« $V_{\text{rms}}(1) = 7,07\text{В}$ », рис. 22). При амплитуде $U_{\text{Амп}} = 18$ В и размахе 36 В (« $V_{\text{pp}}(1)$

$= 36,0\text{В}$ », рис. 23) действующее значение $U_{\text{д}} (U_{\text{RMS}}) = U_{\text{Амп}} \frac{1}{\sqrt{2}} \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071 = 18 \text{ В} \times 0,7071 = 12,72 \text{ В}$ (« $V_{\text{rms}}(1) = 12,7\text{В}$ », рис. 23). Таким образом, синусоидальность выходных сигналов усилителя мощности была подтверждена снятыми осциллограммами.

Выходная мощность усилителя Р, как известно, может быть рассчитана по формуле: $P = U^2/R$, где U – выходное напряжение, R – сопротивление нагрузки. Если $U_{\text{Амп}} = 10$ В, а $R = 4$ Ом, то максимальная мгновенная мощность составит $P_{\text{МГН}} = (10 \text{ В})^2 / 4 \text{ Ом} = 25 \text{ Вт}$, а действующее значение мощности составит $P_{\text{RMS}} = (V_{\text{RMS}})^2 / 4 \text{ Ом} = (U_{\text{Амп}} \frac{1}{\sqrt{2}})^2 / 4 \text{ Ом} = [(10 \text{ В})^2 / 2] / 4 \text{ Ом} = 50 \text{ В} / 4 \text{ Ом} = 12,5 \text{ Вт}$. Аналогично, как нетрудно подсчитать, при $U_{\text{Амп}} = 18$ В, $P_{\text{МГН}} = 81 \text{ Вт}$, а $P_{\text{RMS}} = 40,5 \text{ Вт}$. Для справки: предельная синусоидальная мощность, например, акустической системы (АС) «35АС-016» по паспорту составляет $P_{\text{RMS}} = 35 \text{ Вт}$, так что усилитель её перекрывает по мощности. Кроме того, при воспроизведении фонограммы (звукового файла) выходная мощность приблизительно в 1,5–2 раза меньше синусоидальной; но даже при установке регулятора громкости на 2/3 от максимальной, если подобная АС находится в комнате, то уже начинают дрожать стекла на окнах, и от такой громкости можно просто оглохнуть...

Далее была проведена проверка переходной характеристики усилителя мощности. Для этого к предварительному усилителю был подключён преобразователь синусоидального сигнала в прямоугольный меандр, а к нему – генератор синусоидальных сигналов, т.е. подключение было организовано так же, как и для проверки переходной характеристики предварительного усилителя (оно описано выше). Оба выхода предварительного усилителя (OutA- и OutA+), а также нагрузочный резистор номиналом 3,9 Ом были подключены к усилителю мощности. На генераторе была установлена частота 30 кГц, а к нагрузочному резистору был подключён один канал двухканального цифрового осциллографа с открытыми входами (режим DC). Результаты тестирования (рис. 24) показали, что переходная характеристика усилителя мощности имеет почти прямоугольную форму (рис. 24а) и на фронтах и срезах не содержит никаких выбросов с последующей затухающей осцилляцией (как на рис. 24б, где в ОС стоят рекомендуемые производи-

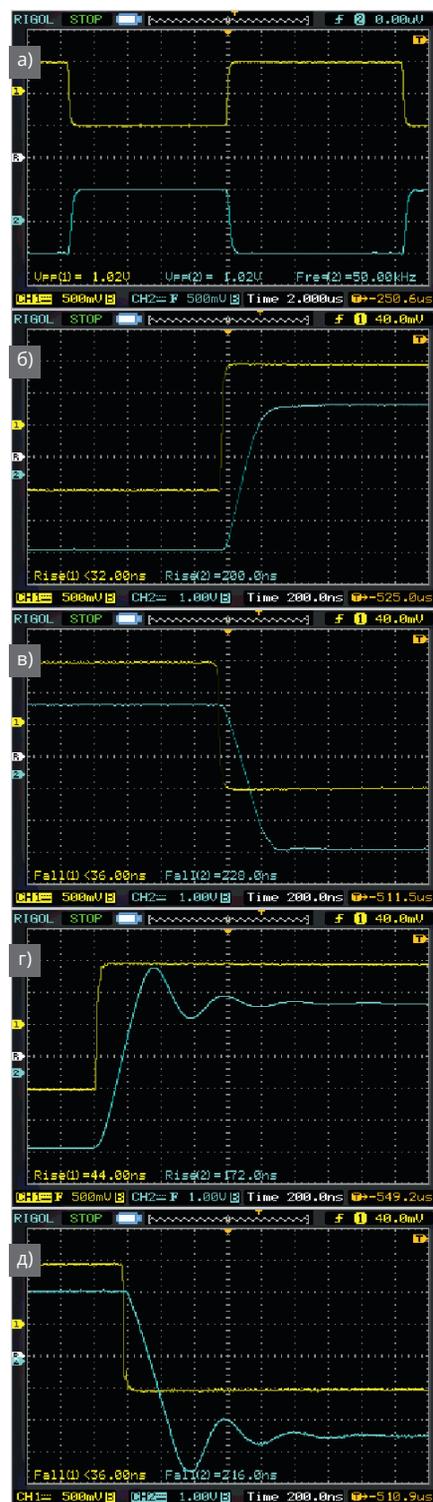


Рис. 21. Переходные характеристики предварительного усилителя: а) выходные сигналы инвертирующего (жёлтый) и неинвертирующего (бирюзовый) ОУ, б) фронты входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов неинвертирующего ОУ, в) срезы входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов инвертирующего ОУ, г) фронты входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов неинвертирующего ОУ без конденсатора в ОС, д) срезы входного и выходного сигналов неинвертирующего ОУ без конденсатора в ОС

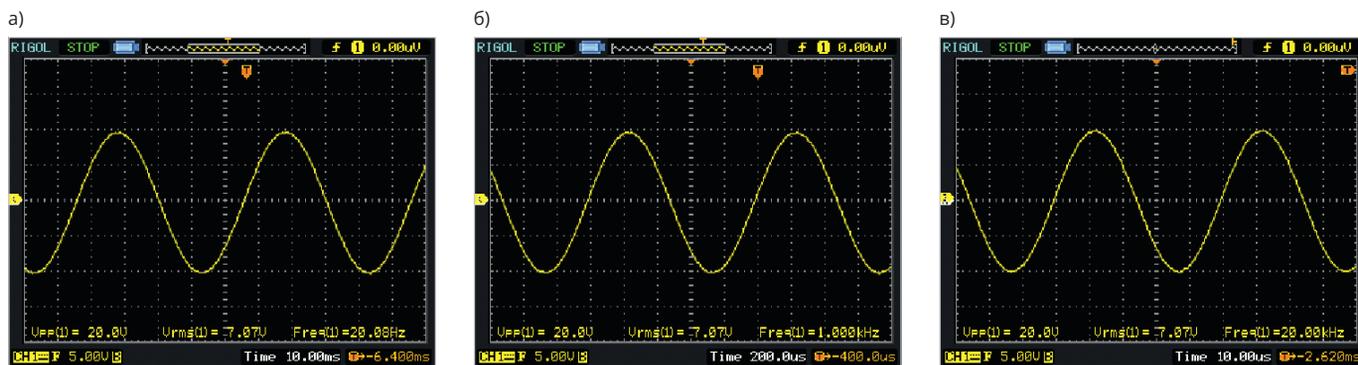


Рис. 22. Осциллограммы выходных сигналов канала А усилителя мощности при амплитуде 10 В (размах 20 В) при частотах: а) 20 Гц, б) 1 кГц, в) 20 кГц

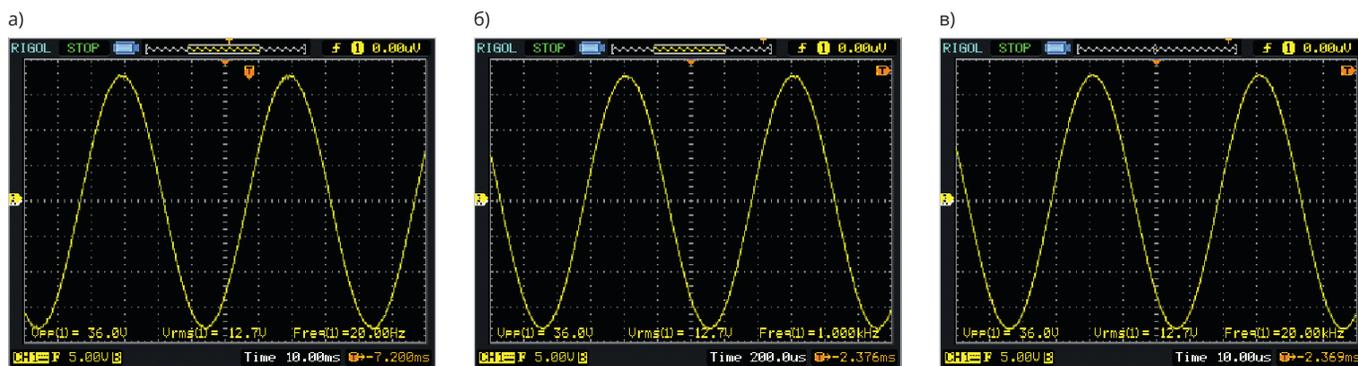


Рис. 23. Осциллограммы выходных сигналов канала А усилителя мощности при амплитуде 18 В (размах 36 В) при частотах: а) 20 Гц, б) 1 кГц, в) 20 кГц

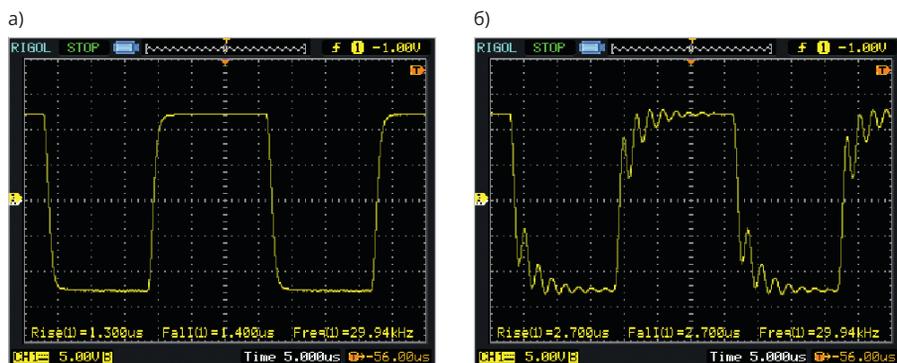


Рис. 24. Переходная характеристика усилителя мощности: а) с конденсатором 27 пФ в ОС, б) с резистором 20 К и конденсатором 47 пФ в ОС

телем LM3886 последовательно соединённые 20 К и 47 пФ), а длительность фронтов и срезов составляет не более 1,4 мкс («Rise(1) = 1.300us», «Fall(1) = 1.400us», рис. 24а).

Тестирование канала В усилителя мощности показало аналогичные результаты.

Резюмируя результаты тестирования усилителя мощности при его работе совместно с предварительным усилителем, генератором синусоидальных сигналов и преобразователем синусоидальных сигналов в прямоугольный меандр, можно констатировать, что во всём звуковом диапазоне частот выходные сигналы усилителя строго синусоидальны вплоть до мощности, подсчитанной по действующему значению выходного

напряжения: $P_{RMS} = 40,5$ Вт. Кроме того, переходная характеристика усилителя почти прямоугольна, а на фронтах и срезах отсутствуют выбросы с последующей затухающей осцилляцией.

Конструкция усилителя

Усилитель (рис. 25, рис. 26, рис. 27) собран в корпусе шириной 29 см, длиной 26 см и высотой 6,5 см, оборудованном передними и задними ножками (корпус для РЭА 15-34 компании Sanhe). Поскольку ширина радиатора больше высоты корпуса (рис. 26), на нём дополнительно установлены две длинные задние ножки, которые представляют собой винты М5, укрепленные к днищу корпуса шайбами и гайками М5, а к нижней части винтов гайками М5 и шайбами прикруче-

ны резиновые ножки. Эти винты хорошо заметны на рис. 25 (сверху слева и справа). Длина этих дополнительных ножек соответствует длине передних ножек, в связи с чем положение корпуса горизонтальное. Как видно из рис. 25, в корпусе много свободного места. Ширина корпуса выбрана, исходя из размеров радиатора, а длина может быть существенно уменьшена. Но, к сожалению, корпуса с такой шириной (29 см) и меньшей длиной автору найти не удалось. Все четыре усилителя мощности (с помощью корпусов LM3886Т) прикручены к радиатору через вырез в задней стенке корпуса. Между корпусом LM3886Т и радиатором установлена теплопроводящая керамическая прокладка под корпус ТО-264. Для теплового контакта этой прокладки с корпусом LM3886Т и радиатором использована теплопроводная паста (например, КПТ-8).

Что касается пик-детектора и тонкомпенсированного регулятора громкости, использованных в [2], и двухканального индикатора уровня звука на базе цветного 1,3" TFT дисплея [5], то они оставлены без изменения.

Прослушивание усилителя

К усилителю были подключены две АС «35АС-016». Прослушивание осуществлялось как автором, так и

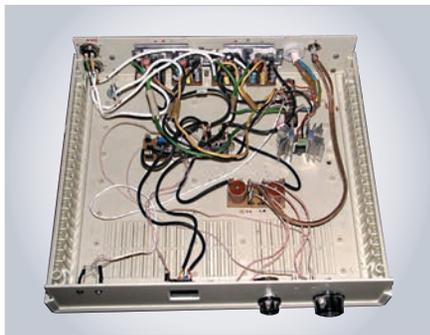


Рис. 25. Усилитель в корпусе с открытой крышкой

достаточно компетентным экспертом, который настраивает звуковое сопровождение от небольших помещений и вплоть до стадионов. Для оценки использовались порядка 10–12 фонограмм, которые были взяты с телефона. Автор и эксперт оценили звучание перкуссионных инструментов как отличное, кроме того, эксперту также понравилось звучание низких частот (бас-гитара, бочка) и средних (вокал), на которое автор вначале не обратил внимание.

Заключение

Применение недорогого высокоскоростного ОУ ОРА1642/ОРА1644 в предварительном усилителе, входящем в состав аудиоусилителя на базе мощных ОУ LM3886, включённых в мостовом режиме работы, позволило



Рис. 26. Вид на корпус сзади

существенно повысить качество воспроизведения перкуссионных инструментов.

Литература

1. Кузьминов А. Применение инструментального усилителя для мостового включения двух мощных ОУ // Современная электроника. 2017. № 4–7.
2. Кузьминов А. Усовершенствованный УМЗЧ на базе ИУ и мощных ОУ // Современная электроника. 2019. № 5.
3. Кузьминов А. Недорогой двухканальный преобразователь несимметричного (однотактного) сигнала в симметричный (дифференциальный) на базе ИУ INA2128 и двух ОУ ОР2177 и ADA4522-2 // Современная электроника. 2025. № 1.



Рис. 27. Усилитель в корпусе в сборе

4. Кузьминов А. Применение IGBT-транзисторов в линейных стабилизаторах напряжения // Современная электроника. 2024. № 9.
5. Кузьминов А. Усовершенствованный двухканальный индикатор уровня звука на базе цветного 1,3" TFT-дисплея и микроконтроллера EFM8LB10F16 // Современная электроника. 2024. № 6.
6. Кузьминов А. Применение мощного аудио ОУ LM1875T в новых (не аудио) приложениях // Современная электроника. 2021. № 7.
7. Кузьминов А. Генератор гармонических колебаний звукового диапазона на базе синтезатора частоты AD9837B, микроконтроллера EFM8SB10 и LCD Nokia-5110 с батарейным питанием // Современная электроника. 2023. № 6.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

ОДК впервые показала на Ближнем Востоке двигатель пятого поколения 177С

Объединённая двигателестроительная корпорация Ростеха впервые представила на Dubai Airshow 2025 новейший авиационный двигатель пятого поколения 177С и его продвинутую модификацию. По заявлению разработчиков, установка превосходит предшественников и большинство иностранных аналогов по ключевым тактико-техническим параметрам.

Новая силовая установка: мощнее, экономичнее, долговечнее

На выставке демонстрируется полноразмерный макет двигателя 177С. По сравнению с предыдущим поколением силовых установок, новинка обеспечивает:

- тягу до 14,5 тонн;
- ресурс 6000 часов – в три раза выше, чем у аналогов прежнего поколения;
- снижение расхода топлива на 7% на всех режимах;

- повышенную энергоотдачу для бортовой электроники современных самолётов.

Конструкция обеспечивает увеличение тяги без роста массы и габаритов относительно базового АЛ-31Ф/ФП, что позволяет устанавливать новый двигатель без доработок планера на самолёты семейства «Су» и другие совместимые платформы.

Конструкторы отмечают, что при снижении требований к ресурсу двигатель может обеспечивать ещё более высокую тягу.

Модификация для перспективных самолётов

Параллельно ОДК ведёт испытания усовершенствованной версии 177С, ориентированной на будущие авиационные комплексы пятого поколения.

Она отличается:

- ещё большей тягой,
- ещё меньшим расходом топлива,
- возможностью обеспечить крейсерский сверхзвуковой полёт на всех высотах с большим запасом по характеристикам.



В расширенной модификации применяется электронная система автоматического регулирования FADEC полного уровня ответственности, обеспечивающая управление, контроль и диагностику двигателя в реальном времени.

Российская экспозиция на Dubai Airshow 2025

Международный авиасалон прошёл в Дубае с 17 по 21 ноября. Российская экспозиция площадью свыше 1000 кв. м была организована «Рособоронэкспортом» и включала разработки ОАК, «Вертолётов России», ОДК, КРЭТ, «Высокоточных комплексов» и других предприятий Ростеха.



**Оксидно-электролитические
алюминиевые конденсаторы K50-...**

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 485
 Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,0 ... 470 000
 Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С -60 ... 125

**Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...**

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 200
 Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,5 ... 60 000
 Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С -60 ... 175

**Оксидно-полупроводниковые
танталовые конденсаторы K53-...**

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 63
 Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 0,033 ... 2 200
 Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С -60 ... 175

**Суперконденсаторы K58-...**

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 2,7
 Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 1,0 ... 4 700
 Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °С -60 ... 65

**Накопители электрической энергии на основе модульной
сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ**

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 5,0 ... 48
 Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 0,08 ... 783
 Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °С -60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
 Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
 e-mail: elecond-market@elcudm.ru, www.elecond.ru



Реклама

ЗНАНИЯ, КОТОРЫЕ НЕ ЗАМЕНИТ НИ ОДИН БРАУЗЕР

Всю информацию можно найти в сети.
 А где вы найдете удобство, концентрацию и надёжность бумажного журнала?

Да, вы правы: обзоры, кейсы и новости об электронике и автоматизации можно найти в интернете. Но сколько времени уходит на поиски, отсеивание рекламы и бесполезных статей? Цифровая информация мимолетна — она теряется в ворохе вкладок и новостных лент.

Представьте иной формат. Тот, что работает на вашу эффективность.

Подписка на бумажную версию журнала на 2026 год — это **ваш персональный офлайн-навигатор в мире технологий.**

Вы получаете не просто информацию, а физический инструмент для работы:

УДОБСТВО ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ: Положите журнал на стол и погрузитесь в сложный кейс без уведомлений и соблазна переключиться. Читайте и делайте пометки на полях там, где вам удобно — в офисе, в цеху, в пути.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЛУЧШЕГО: Мы уже сделали за вас всю работу: собрали, отфильтровали и структурировали самые важные материалы. Ваше время — самый ценный ресурс.

ЗНАНИЯ, КОТОРЫЕ НЕ «УПЛЫВАЮТ»: Бумажный журнал не зависит от серверов, багов сайта или скорости интернета. Он всегда под рукой. Ваша профессиональная библиотека актуальных решений пополняется регулярно и не теряет своей ценности с течением времени.

БЫСТРЫЙ ДОСТУП К ОПЫТУ: Через год вам нужно будет вспомнить ключевой момент из статьи? Вы не будете лихорадочно искать ее в истории браузера. Вы просто достанете нужный номер с полки.

Сделайте свою работу с информацией по-настоящему эффективной!



ЧИТАЙТЕ В КОМФОРТЕ

ПОДПИСКА НА БУМАЖНУЮ ВЕРСИЮ — ЭТО ИНВЕСТИЦИЯ в удобство, концентрацию и создание вашего личного, вечного архива профессиональных знаний.



Оформить подписку на бумажную версию журнала на 2026 год