

Применение инструментального усилителя для мостового включения двух мощных ОУ

Часть 4

Алексей Кузьминов (compmicrosys@mail.ru)

Четвёртая заключительная часть статьи посвящена схеме индикации и разводке печатных плат всех устройств, использованных в усилителе. Подробно описываются процедура настройки усилителя и результаты его испытаний.

В схемах защиты от превышения тока (см. рис. 13б,г) [1] используются два светодиода красного свечения – LED1 в каждой, а для индикации наличия напряжений питания $\pm 12,5$ В применено два светодиода: зелёного (LED-) и жёлтого (LED+) цвета (см. рис. 13д) [1]. В некоторых случаях, когда, например, на корпусе имеется только два штатных места для индикаторных светодиодов, применение четырёх светодиодов может быть затруднено. В таких случаях может быть использована простейшая схема индикации на двух двухцветных светодиодах (см. рис. 14).

Для индикации напряжения $+12,5$ В и перегрузки используется двухцветный светодиод L-119SRSGWT (LED3,4), который представляет собой два светодиода в одном корпусе: один – сверхъяркий красный, а второй – обычный зелёный. При работе стабилизатора в штатном режиме присутствуют оба напряжения ($+18$ В и $+12,5$ В), поэтому горят оба светодиода. Общий цвет свечения LED3,4 в этом случае – светло-оранжевый. При перегрузке напряжение $+12,5$ В пропадает, и зелёный светодиод гаснет, общий цвет свечения ста-

новится красным. Номинал резисторов R3 и R4 подобран таким образом, чтобы яркость зелёного и красного светодиодов была приблизительно одинаковой.

Для индикации напряжения $-12,5$ В и перегрузки используется такой же двухцветный светодиод LED1,2 и двухтранзисторная сборка UMD9N (T1, T2). При работе стабилизатора $-12,5$ В (см. рис. 13в) [1] в штатном режиме также присутствуют оба напряжения (-18 В и $-12,5$ В), в связи с чем транзистор T2 открыт, а T1 закрыт, т.к. на его базе нулевой (и даже немного отрицательный) потенциал относительно эмиттера. В этом случае зелёный светодиод горит, а красный – нет, общий цвет свечения двухцветного светодиода – зелёный. При перегрузке напряжение $-12,5$ В пропадает, транзистор T2 закрывается, открывая транзистор T1. В связи с этим зелёный светодиод гаснет, а красный загорается, общий цвет свечения становится красным. Напряжение стабилизатора VD1 (7,5 В) и номиналы резисторов R1 и R2 подобраны таким образом, чтобы при изменении входного напряжения от -14 до -20 В как в штатном режиме, так и в режиме перегрузки, горел только один из светодиодов (или зелёный, или красный). Если не устанавливать стабилизатор, то транзистор T1 сборки будет запирается не до конца, что приведёт к появлению слабого свечения красного светодиода, искажению чисто зелёного цвета и сделает его почти неотличимым от свечения светодиода LED3,4. Установка стабилизатора поднимает напряжение эмиттера T1 сборки на 7,5 В, что приводит к надёжному запираению транзистора T1 при любом входном напряжении и чистому зелёному свечению светодиода LED1,2 в штатном режиме работы стабилизатора. Таким образом, при работе обоих стабилизаторов в штатном режи-

ме цвет свечения светодиода, индицирующего напряжение $-12,5$ В – зелёный, а цвет свечения светодиода, индицирующего напряжение $+12,5$ В, – светло-оранжевый. При возникновении перегрузки по какому-либо напряжению цвет свечения соответствующего двухцветного светодиода становится красным.

Схема с транзисторной сборкой разведена на плате, которая имеет размер всего 8×8 мм. Резисторы R1, R2 и стабилизатор VD1 установлены на плате навесным монтажом вертикально. Резисторы R3 и R4 припаяны непосредственно к достаточно жёстким и прочным выводам светодиода LED3,4. Во избежание случайного замыкания на центральный вывод на резисторы надета изолирующая трубка из ПВХ.

Выходное напряжение стабилизаторов можно легко повысить, например, в два раза – до 25 В. Для этого требуется лишь изменить номинал одного резистора R7 (см. рис. 13а,в) [1], руководствуясь следующими соображениями. Во-первых, необходимо сохранить ток через делитель R7, R8 и R9 близким к 2,5 мА. Во-вторых, необходимо сохранить напряжение, снимаемое с движка резистора R8 в его среднем положении, близким к 2,5 В. Разделив 25 В на 2,5 мА, получим 10 кОм, а вычтя из 10 кОм сумму R8 (500 Ом) и R9 (750 Ом), получим 8,75 кОм. Ближайший номинал к этому значению из ряда E24 (5%) – 9,1 кОм, из ряда E96 (1%) – 8,66 кОм. Если, например, R8 = 9,1 кОм, то напряжение на движке R8 в его среднем положении составит 2,42 В, что вполне допустимо.

Выходное напряжение можно сделать и ещё выше, однако следует учесть, что максимальное напряжение питания ОУ TCA0372 составляет 40 В, а MC33072 – 44 В. Если и этого напряжения недостаточно, то можно использовать двухканальный ОУ ADA4522-2 (rail-to-rail output) с более высоким напряжением питания (до 55 В). Для того чтобы не переразводить платы стабилизаторов достаточно сделать платы-переходники ADA4522-2ARMZ/TCA0372DP1 и ADA4522-2ARMZ/MC33072 (их разводка приведена далее). Однако при питании

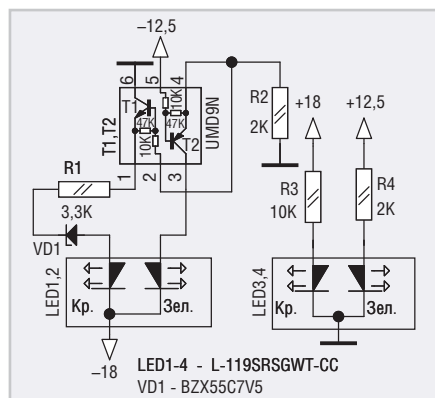


Рис. 14. Принципиальная схема индикации наличия напряжений питания $\pm 12,5$ В и перегрузки на основе двухцветных светодиодов

$\pm 12,5$ В ADA4522-2 преимуществ перед TCA0372DP1 и MC33072 не имеет.

По габаритам вместе с радиатором ($235 \times 110 \times 70$ мм) ИП, применённый в данном усилителе, значительно меньше описанного в [2] ($255 \times 220 \times 85$ мм). Кроме того, он существенно легче, дешевле и тише. Для сравнения фотографии обоих ИП показаны на рисунке 15. Поскольку в мостовом включении ОУ отсутствует силовая «земля», то для питания усилителя вместо двуполярного ИП с напряжениями $\pm 12,5$ В вполне можно использовать однополярный ИП, например, с напряжением $+25$ В (или, что лучше, с напряжением -25 В), а среднюю точку создать искусственно с помощью маломощного транзистора (как показано на рисунке 4 справочного листка ОУ LM4780). В этом случае конструкция ИП существенно упрощается, т.к. требуется всего один стабилизатор 25 В.

Разводка печатных плат и фотографии устройств

Разводка печатных плат всех устройств выполнена в программе Sprint Layout 6.0, а изготовление плат и их фотошаблонов кратко описано в [3].

Разводка платы предварительного усилителя приведена на рисунке 16а, её размер составил всего 25×30 мм. Фотография платы, сделанная со стороны проводников, показана на рисунке 16б. Плата крепится тремя винтами М2 к днищу корпуса.

Плата одного канала усилителя мощности на базе LM3886 имеет размеры 20×30 мм и показана на рисунке 17. Плата не имеет крепёжных отверстий, поскольку она держится как консоль на всех 11 выводах микросхемы LM3886. Сама микросхема LM3886 крепится винтом М3 к радиатору через теплопроводящую керамическую изолирующую прокладку с использованием теплопроводной пасты (например, КПТ-8).

В связи с тем, что в мостовом включении отсутствует силовая «земля», т.к. нагрузка подключена исключительно к выходам обоих ОУ, контурные токи по «земле» сильно снижены. К «земле» подключены только конденсаторы и RC-цепочки, токи в которых на один-два порядка меньше токов в земляном контуре при стандартном включении. В результате различные наводки существенно уменьшены.

Разводка платы пик-детектора приведена на рисунке 18. Плата имеет размер 30×26 мм. Как ни странно, приме-

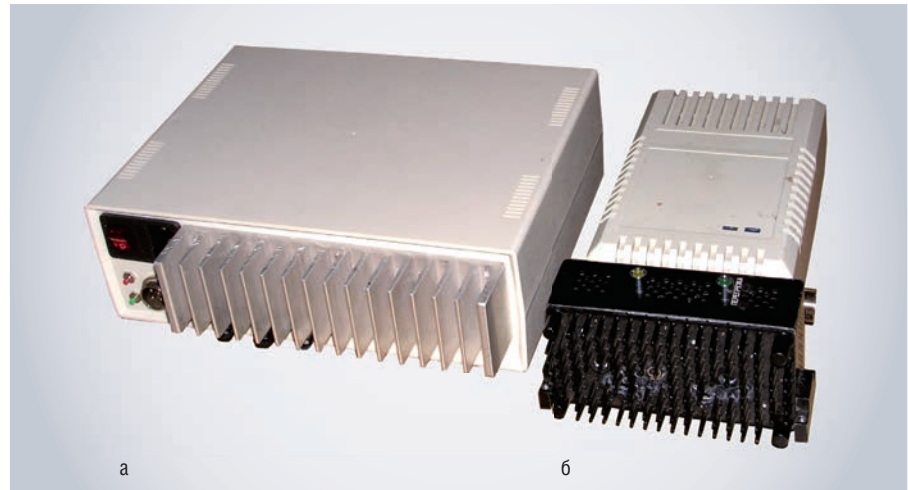


Рис. 15. Фотографии источников питания (вид со стороны задней стенки): а) ± 20 В, б) $\pm 12,5$ В

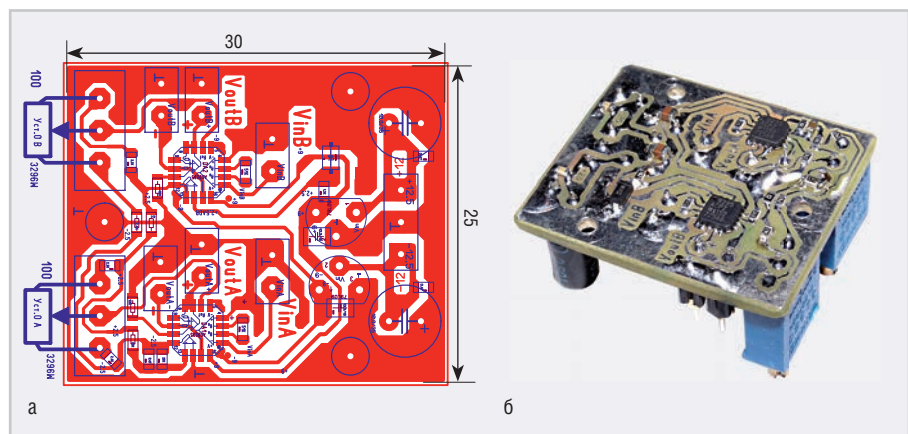


Рис. 16. Предварительный усилитель: а) печатная плата; б) фото со стороны проводников

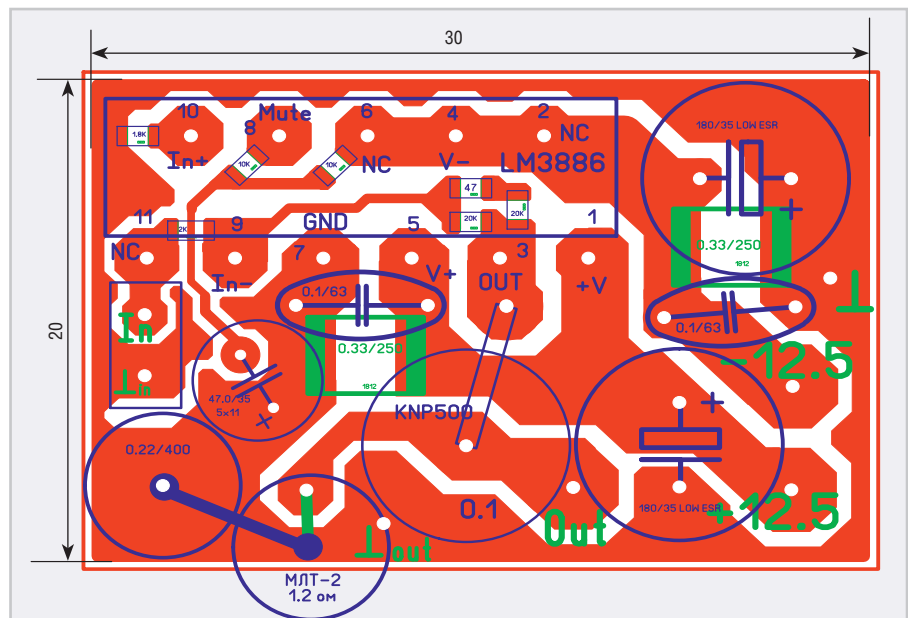


Рис. 17. Печатная плата одного канала УМЗЧ на ОУ LM3886

нение ОУ TL052 в корпусе DIP8 существенно экономит место, поскольку сами эти микросхемы расположены на стороне, противоположной расположению дорожек. В связи с этим на стороне проводников остаётся доста-

точно места для расположения компонентов поверхностного монтажа. В данном устройстве применены триггеры Шмитта 74LVC2G14GW в сверхминиатюрном корпусе SOT363 ($2,5 \times 2,5$ мм). Однако плата разведе-

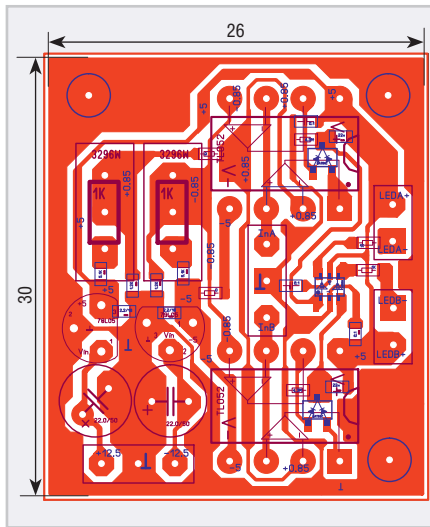
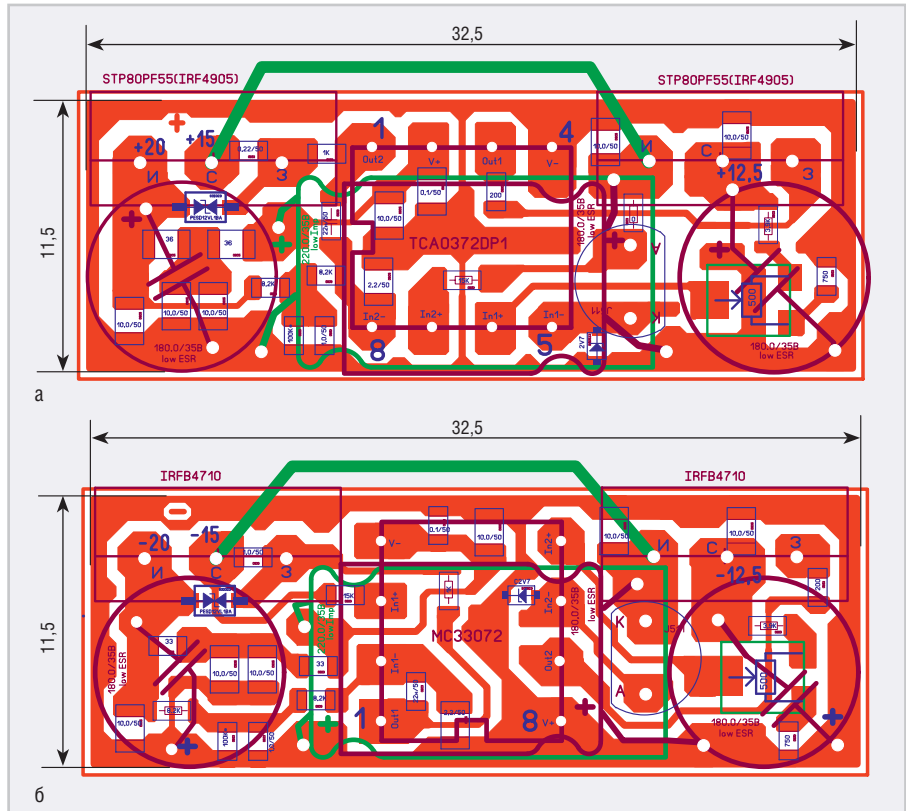
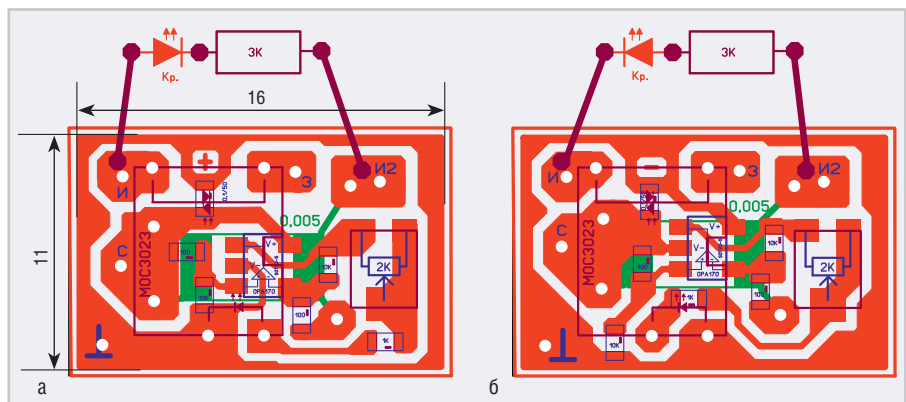


Рис. 18. Печатная плата пик-детектора

на таким образом, чтобы в ней можно было использовать микросхему триггера Шмитта в корпусе SOT23-6 ($3,5 \times 3,5$ мм, 74LVC2G14GV).

Размеры платы стабилизаторов $+12,5$ В и $-12,5$ В составили всего $11,5 \times 32,5$ мм (см. рис. 19а,б) благодаря использованию двухканальных ОУ в корпусе DIP8 и ИОН на стабилитроне и полевом транзисторе с р-п-переходом в корпусе TO-92. Платы защиты от превышения тока для стабилизаторов положительной и отрицательной полярности (см. рис. 20а,б) имеют размеры 11×16 мм, а плата индикации питания $-12,5$ В на двухцветном светодиоде (см. рис. 21) – 8×8 мм. Разводка плат-переходников для ОУ ADA4522-2 очень проста и показана на рисунке 22. О внешнем виде устройств можно судить по рисункам 23–25.

Разводка платы регулятора громкости размером 22×25 мм приведена на рисунке 26а. Компоненты для поверхностного монтажа расположены на стороне проводников (см. рис. 26б), а разъемы и катушки индуктивности $3,2$ Гн – на противоположной стороне. Эти катушки крепятся к небольшим макетным платам винтами M2 с полиэтиленовыми шайбами. Сами макетные платы припаяны к плате ТКРГ с помощью отрезков медного провода диаметром $0,8$ мм. Плата крепится к корпусу двумя пластмассовыми стойками и винтами M2 через крепёжные отверстия, расположенные по диагонали. Подключение переменных резисторов и сигнальных кабелей к ТКРГ показано на рисунке 27 [3]. Экранированные кабели, соединяющие переменные резисторы с ТКРГ, обернуты несколькими слоями фум-ленты.

Рис. 19. Печатные платы стабилизаторов: а) $+12,5$ В; б) $-12,5$ ВРис. 20. Печатные платы защиты: а) $+12,5$ В; б) $-12,5$ В

Разводка платы регулятора громкости на Ш-образных ферритовых сердечниках приведена на рисунке 28. Плата имеет размер 20×36 мм (см. рис. 29). Разводка платы ТКРГ на кольцах R16 \times 9,6 \times 6,3-3E12 и его фотография показаны на рисунках 30 и 31 соответственно. Катушки индуктивности 3 Гн укреплены вертикально на двух макетных платах. Для того чтобы не повредить обмотки, при закреплении колец использованы резиновые прокладки и полиэтиленовые шайбы.

Конструкция усилителя

Усилитель размещён в корпусе размером $180 \times 110 \times 70$ мм, состоящим из скреплённых половинок (см. рис. 32). На задней стенке одной половины кор-

пуса размещены два радиатора, на каждом из которых закреплены по 2 платы (см. рис. 17) с ОУ LM3886 для каналов А и В. С целью уменьшения нагрева корпуса от радиаторов на крепёжные винты установлены шайбы, вырезанные из фторопластовой ленты толщиной $0,5$ мм. Платы предварительного усилителя (см. рис. 16б) и пик-детектора (см. рис. 18) закреплены в нижней части этой же половины корпуса. Плата регулятора громкости (см. рис. 31) установлена в нижней части второй половины корпуса, оба переменных резистора (регулятора громкости и регулятора НЧ-коррекции) – в середине той же половины корпуса, ручки регулировки выведены на его лицевую поверхность. Кабели питания и вход-

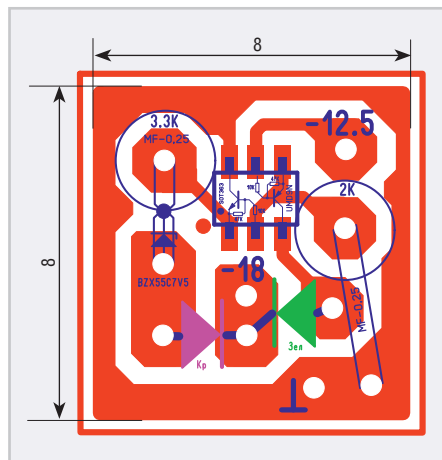


Рис. 21. Печатная плата индикации на двухцветном светодиоде

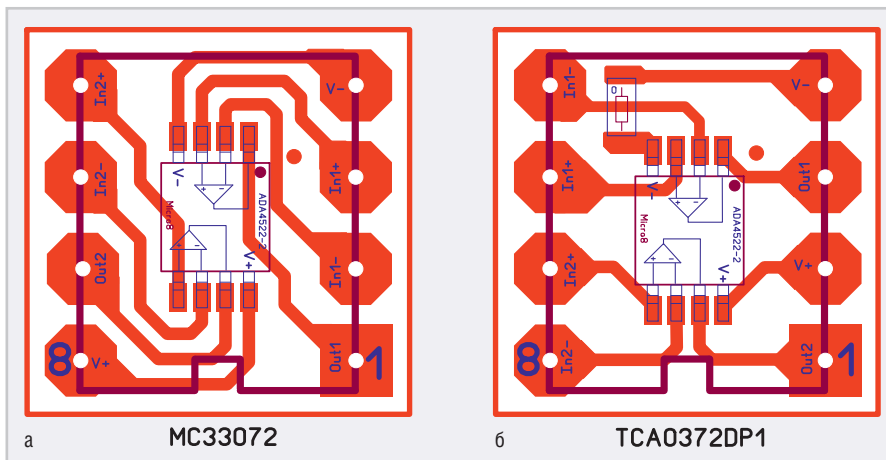


Рис. 22. Плата-переходник для ОУ ADA4522-2: а) MC33072, б) TCA 0372DP1



Рис. 23. Фотография стабилизатора +12,5 В без платы защиты



Рис. 24. Фотография стабилизатора -12,5 В с платой защиты



Рис. 25. Общий вид плат защиты со стороны оптрона

ных сигналов пропущены через резиновые втулки, установленные на боковых сторонах корпуса, и припаяны к клеммникам, от которых отходят кабели питания на платы мощных ОУ, платы предварительного усилителя и платы пик-детектора, а также сигнальный кабель от платы регулировки громкости. Два выходных разъёма для подключения кабелей АС расположены на боковой поверхности корпуса. Силовые кабели питания и выходных сигналов для АС представляют собой коаксиальные кабели, экран которых заземлён, а провода имеют сечение не менее 1 мм^2 . Эти кабели дополнительно обернуты двумя слоями ленты из тонкого фторопласта (фумленты). Слаботочные сигнальные кабели и кабели питания также экранированы, а сечения проводов могут быть уменьшены до $0,1 \dots 0,2 \text{ мм}^2$. К нижней части корпуса липкой двусторонней пористой лентой приклеены резиновые ножки.

Собранный в корпусе усилитель показан на рисунке 33. Два кабеля от АС подключаются к выходным разъёмам. Входной кабель от источника звука пропущен через резиновую втулку. На лицевой поверхности корпуса спра-

ва сверху можно заметить два окна с прозрачными вставками из оргстекла, через которые проходит свет от светодиодов, индицирующих наличие питания (зелёный для $-12,5 \text{ В}$ и жёлтый для $+12,5 \text{ В}$). Ниже расположены два светодиода красного свечения, закреплённые на корпусе в специальных оправках и сигнализирующие о превышении выходных сигналов заданного порога соответственно для каналов А и В.

НАСТРОЙКА УСИЛИТЕЛЯ

Для настройки усилителя необходимо установить «нули» у двух выходных сигналов.

Процедура эта очень проста и сводится к следующему. Во-первых, необходимо заземлить оба входных сигнала. Для этого на два двухконтактных цанговых штыревых разъёма, расположенных на плате предварительного усилителя (X2 и X5 на рис. 5) [4], надеть две двухконтактные перемычки из двух двухконтактных цанговых гнезд. Далее к выходным разъёмам, предназначенным для подключения к АС (XoutA и XoutB на рис. 6) [5], подключить два резистора номиналом $3,9 \text{ Ом}$ мощностью 50 Вт .

К одному из резисторов (например, для канала А) подключить цифровой вольтметр. После этого необходимо включить питание и подстроечным резистором для канала А (RA2, см. рис. 5) [4] на плате предварительного усилителя, выставить напряжение около 1 мВ .

Полный «ноль» выставлять не рекомендуется во избежание перекрытия прямого и инверсного сигналов.

Аналогично выставляется напряжение для канала В. Номиналы подстроечных многооборотных резисторов RA2 и RB2 (100 Ом) позволяют выставить необходимое напряжение с точностью до $0,1 \text{ мВ}$. На этом настройка заканчивается, питание выключается, перемычки снимаются, регулятор громкости соединяется с предварительным усилителем.

ИСПЫТАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

Испытание усилителя проводилось автором «на слух» на двух АС: 15AC-220 с номинальной мощностью 15 Вт и электрическим сопротивлением 4 Ом , в которой был установлен современный ВЧ-твиттер, и на 35AC-016 «Орбита» с номинальной мощностью 35 Вт и электрическим сопротивлением 4 Ом .

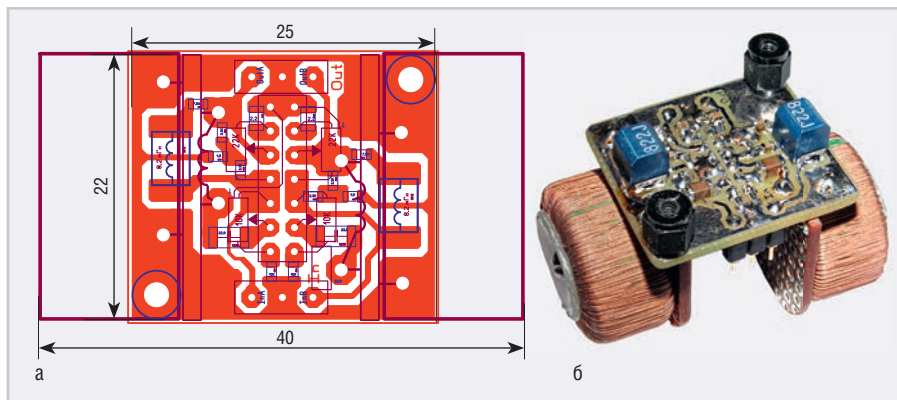


Рис. 26. ТКРГ на кольцах Т2010СF199: а) печатная плата; б) фотография со стороны проводников

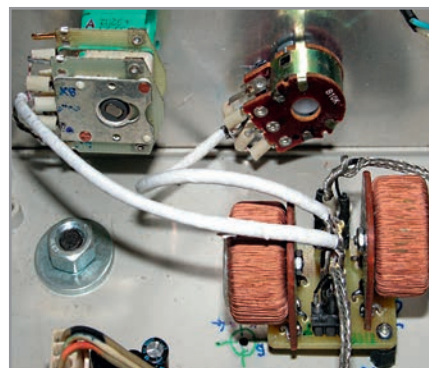


Рис. 27. Подключение переменных резисторов и сигнальных кабелей к ТКРГ [4]

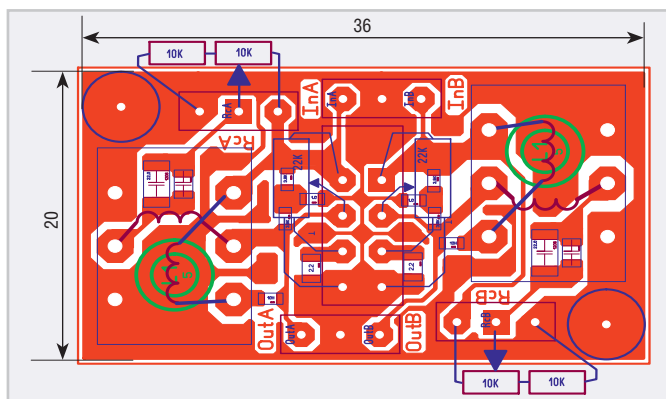


Рис. 28. Печатная плата регулятора громкости на Ш-образных сердечниках Е 13/7/4



Рис. 29. Фотография платы регулятора громкости на Ш-образных сердечниках Е 13/7/4

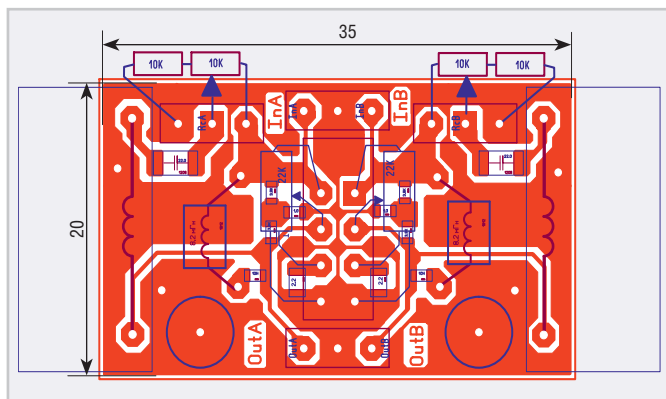


Рис. 30. Печатная плата регулятора громкости на кольцах ТХ16/9,6/6,3-3Е12

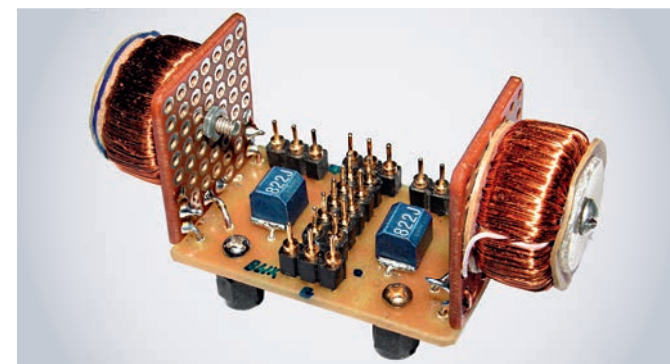


Рис. 31. Фотография платы регулятора громкости на кольцах ТХ16/9,6/6,3-3Е12

Звучание сравнивалось со звучанием усилителя на ОУ LM4780 [3], в котором оба мощных ОУ включены по обычной инвертирующей схеме.

Испытание показало идентичность звучания мостового усилителя на ОУ LM3886 и звучания усилителя на LM4780 [3] при напряжениях питания ± 20 В. При таком питании на максимальной громкости нагрев мостового усилителя на LM3886 был выше, чем нагрев усилителя на LM4780. При питании напряжениями $\pm 12,5$ В мостовой усилитель на LM3886 показал превосходные результаты даже на максимальной громкости, а его нагрев был существенно меньше,

чем нагрев усилителя на LM4780 при питании его напряжениями ± 20 В.

В обоих случаях ухудшения звучания мостового усилителя замечено не было.

Кроме того, применение стабилизатора VD1 (см. рис. 5) [4] совместно с повторителем на ОУ взамен специализированной микросхемы ИОН ADR291 в качестве источника опорного напряжения V_{ref} для установки выходных «нулей» усилителя привело к существенному снижению шума в АС при отсутствии сигнала. Если в усилителе на LM4780 [3] при отсутствии сигнала и максимальной громкости шум можно было услышать на расстоянии 20–25 см

от АС, то в настоящем усилителе шум был слышен только в непосредственной близости от динамика АС.

При испытаниях усилителя на современных более мощных и качественных АС было отмечено очень чистое звучание с отличной детализацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ИУ AD8295 при конструировании мостового усилителя позволяет:

- включать оба мощных ОУ, работающих в мостовом режиме, как два абсолютно идентичных классических инвертора с одним и тем же коэффициентом усиления, что кардинально снижает КНИ+Ш;

- снизить коэффициент передачи УМЗЧ до минимального значения, т.е. реализовать максимальную глубину ООС;
- использовать низкое напряжение питания (до $\pm 12,5$ В), что даёт возможность применить источник питания с существенно меньшей мощностью, удвоить его КПД, уменьшить нагрев БП и самого усилителя, его массогабаритные параметры и цену;
- подключать к усилителю регулятор громкости с высоким выходным сопротивлением;
- полностью избавиться от разделительных конденсаторов, которые добавляют собственный шум на средних и, особенно, на высоких частотах и «заваливают» АЧХ на низких.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминов А. Применение инструментального усилителя для мостового включения двух мощных ОУ. Часть 3. Современная электроника. 2017. № 6. С. 77.
2. Кузьминов А. Активный фильтр на мощном полевом транзисторе и ОУ с защитой от превышения тока. Современная электроника. 2016. №3.
3. Кузьминов А. Применение инструментального усилителя в усилителе низкой частоты. Современная электроника. 2016. № 6.
4. Кузьминов А. Применение инструментального усилителя для мостового включения двух мощных ОУ. Часть 1. Современная электроника. 2017. № 4. С. 79.
5. Кузьминов А. Применение инструментального усилителя для мостового включения двух мощных ОУ. Часть 2. Современная электроника. 2017. № 5. С. 50.
6. Кузьминов А. Использование мощных полевых транзисторов и операционных усилителей в регуляторах и стабилизаторах напряжения. Современная электроника. 2012. № 7.
7. Кузьминов А. Сверхминиатюрные изолированные DC/DC-преобразователи со стабилизированным выходом и ультранизким уровнем пульсаций. Современная электроника. 2012. № 8.
8. Кузьминов А. Импульсный ИП со стабилизированным выходом и низким уровнем пульсаций. Часть 3. Современная электроника. 2015. № 5.
9. Пахомов А. Тонкомпенсированный регулятор громкости с активной баскоррекцией. Радио. 2003. №6.
10. Демченко Б. Тонкомпенсированный регулятор громкости с переменным резистором без отводов. Радио. 2015. № 12. ©

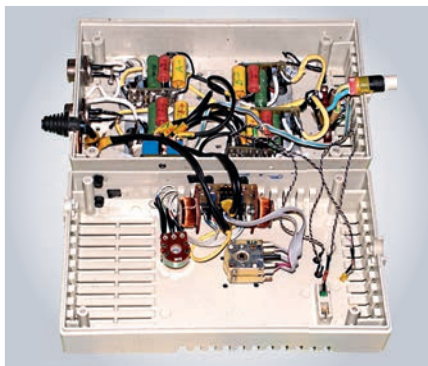


Рис. 32. Корпус усилителя на ОУ LM3886



Рис. 33. Усилитель на ОУ LM3886 в сборе

PROCHIP

POWERED BY PROSOFT

Активный компонент вашего бизнеса

- + Различные решения по подбору элементной базы
- + Осуществление поставок комплектующих для серийного производства и новых разработок
- + Поддержка склада
- + Оказание технической и информационной поддержки



+7 (495) 232-2522
 INFO@PROCHIP.RU
 WWW.PROCHIP.RU



Реклама

Wolfspeed

CRANE
AEROSPACE &
ELECTRONICS

SHARP

BULGIN

HUMMEL

SEMILEDs

RAYSTAR
LED Display Provider

MICROMETALS

anadigm

CREE

APACON

NJO

Grayhill

HARTING
Pushing Performance

PHILIPS
LUMILEDs

LUMINEQ

XP XP Power

MPS

НОВОСТИ МИРА

PwC: тенденции ИБ на 2017 год

Компания PwC представила результаты глобального исследования тенденций информационной безопасности (ИБ) на 2017 год, посвящённые применению технологии Интернета вещей.

В рамках данного опроса приблизительно четверть всех опрошенных подтвердили взлом компонентов IoT, используемых при автоматизации технологических процессов (ТП), в интеграционных системах, а также в пользовательских, в том числе бытовых устройствах (в товарах индивидуального потребления).

По мере того как IoT проникает всё ближе к ядру цифрового бизнеса, интеграция отраслей безопасности – IT, ТП и пользовательских технологий – скорее всего спровоцирует возникновение принципиально новых факторов риска. К этим потенциальным рискам относятся: нарушения в информационном потоке между подключёнными устройствами, физическое вмешательство в оборудование, влияние на деловые операции, кража конфиденциальной информации, компрометация персональных данных, повреждение особо важных объектов инфраструктуры и даже потеря человеческих жизней.

Основные результаты опроса свидетельствуют о том, что: 25% опрошенных в России и 46% респондентов в мире планируют инвестировать в информационную безопасность Интернета вещей в этом году; 23% российских респондентов и 35% опрошенных во всём мире имеют реализованную стратегию безопасности для Интернета вещей; 39% опрошенных в России и 46% в мире планируют инвестировать в новые аспекты безопасности, связанные с развивающимися бизнес-моделями; 34% российских респондентов и 35% опрошенных на глобальном уровне планируют провести оценку межсетевое взаимодействия и выявление уязвимости систем и устройств по всей организационной экосистеме; 39% соотечественников и 43% всех респондентов исследования планируют инвестировать в биометрическую и усиленную аутентификацию в следующем году; 42% опрошенных в России и 35% участников опроса во всём мире планируют вкладывать в профессиональную подготовку по IoT в ближайшие 12 месяцев.

По некоторым данным, в 2015 году в России насчитывалось 15,5 млн подключённых устройств; к 2018 году, согласно прогнозам,

их количество удвоится. В среднесрочной же перспективе ожидается рост до 400 млн таких устройств. Иными словами, именно 400 млн цифровых устройств могут стать мишенью для киберпреступников, желающих получить доступ к жизненно важным системам и (или) персональным данным, либо могут стать инструментом для проведения DDoS-атак. Поэтому, по мере того как российские компании планируют применение IoT-технологий, они должны заблаговременно продумать стратегию обеспечения безопасности и защиты данных, а также предусмотреть создание надлежащей инфраструктуры. Наличие комплексного подхода к обеспечению кибербезопасности и защиты данных является залогом успешного применения стремительно развивающихся технологий Интернета вещей. Компании, которые будут развивать IoT-системы и продукты в соответствии с новыми стандартами кибербезопасности и защиты данных, смогут минимизировать риски, заручиться доверием заинтересованных сторон и в конечном счёте занять лидирующие позиции в области применения технологий IoT.

Пресс-релиз PwC

GENESIS64™



64-битовая SCADA-система

- Прекрасная визуализация на основе 2D- и 3D-графики
- Работа на любых устройствах, включая смартфоны и планшеты
- Встроенная поддержка ГИС-систем Bing, Google и Esri
- Поддержка систем видеонаблюдения
- Возможность конфигурирования инфопанелей непосредственно с мобильных устройств
- Сбор данных по OPC DA, OPC A&E, OPC HDA, OPC UA, BACnet, SNMP



Откройте новую страницу в АСУ ТП вместе с GENESIS64!

PROSOFT®

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



Реклама

14-я Международная выставка
испытательного
и контрольно-измерительного
оборудования



24–26 октября 2017
Москва, Крокус Экспо



Итоги 2016 года:

102 компании-участника из **8** стран мира

10 237 посетителей-специалистов из **21** страны мира



Организатор
Группа компаний ITE
+7 (499) 750-08-28
control@ite-expo.ru

Получите электронный билет
на сайте testing-control.ru



Реклама