

# Недорогой двухканальный преобразователь несимметричного (однотактного) сигнала в симметричный (дифференциальный) на базе ИУ INA2128 и двух ОУ OP2177 и ADA4522-2

Алексей Кузьминов

В статье описан двухканальный предварительный усилитель-формирователь, преобразующий два простых (несимметричных) сигнала в соответствующие им дифференциальные (симметричные) на базе сдвоенного ИУ INA2128 и двух сдвоенных ОУ OP2177 и ADA4522-2 с возможностью регулировки смещения (балансировки) между двумя дифференциальными выходными сигналами. По сравнению с предварительным усилителем на базе двух ИУ AD8295, описанным в [1] и предназначенным для работы с мощными ОУ, включёнными по мостовой схеме в усилителе звука, настоящий преобразователь в несколько раз дешевле, а по качеству не уступает преобразователю на базе ИУ AD8295, стоимость которого в настоящее время весьма высока (от 1000 до 2000 руб. за штуку). Приведены принципиальная схема устройства, разводка и внешний вид его платы, а также результаты тестирования.

## Введение

Если аудиоусилитель построен на двух мощных ОУ (например, LM3886 или его сдвоенном аналоге LM4780), которые включены по мостовой схеме и работают как классические инверторы с коэффициентом усиления, равным  $-10$  (рис. 1), то коэффициент нелинейных искажений + шум

(КНИ + Ш) каждого из ОУ во всём звуковом диапазоне (20 Гц...20 кГц) и в диапазоне мощности 0...40 Вт не превышает 0,07% (см. справочный листок (Datasheet) на эти ОУ). Тогда общий КНИ + Ш, учитывая, что в этом случае погрешности складываются, не будет превышать 0,14...0,15%. Но для адекватной работы таких ОУ требует-

ся, чтобы два сигнала, поступающие на их входы, были строго в противофазе (или инверсными по отношению друг к другу). Кроме того, каждый из экземпляров ОУ в составе LM4780 и особенно LM3886 (поскольку это две разные микросхемы) имеет некоторое напряжение смещения. Другими словами, если входы ОУ будут заземлены, т.е. входное напряжение равно нулю, то на выходе каждого из ОУ будет не нулевой потенциал, а некоторое (правда, небольшое) напряжение, составляющее  $\pm$  несколько десятков мВ. В этом случае два выходных сигнала каждого из ОУ будут перекрываться, отчего существенно возрастет КНИ.

Как известно, действующее значение стандартного звукового сигнала, который воспроизводит плеер, смартфон или проигрыватель виниловых пластинок, составляет около  $\sim 0,3$  В, а его амплитудное значение (если сигнал синусоидальный) в  $\sqrt{2}$  больше: около 0,42 В. Если максимальное амплитудное значение выходного сигнала аудиоусилителя составляет 16 В (рис. 1), то максимальная мгновенная мощность на нагрузке в 4 Ом составит:  $(16 \text{ В} \times 16 \text{ В}) / 4 \text{ Ом} = 64 \text{ Вт}$ , а действующее значение, как нетрудно подсчитать, будет в 2 раза меньше и составит 32 Вт. Поэтому для получения такого значения выходной мощности амплитудное значение двух выходных сигналов усилителя-формирователя должно составлять, как минимум, 0,8 В, т.е. в 2 раза больше, чем 0,42 В. Иными словами, усилитель-формирователь должен усилить входной сигнал по крайней мере в 2 раза.

Таким образом, подытоживая вышесказанное, предварительный усилитель-формирователь, показанный на рис. 1 в прямоугольнике, должен выполнять три функции.

1. Формировать из входного сигнала два взаимно инверсных сигнала.

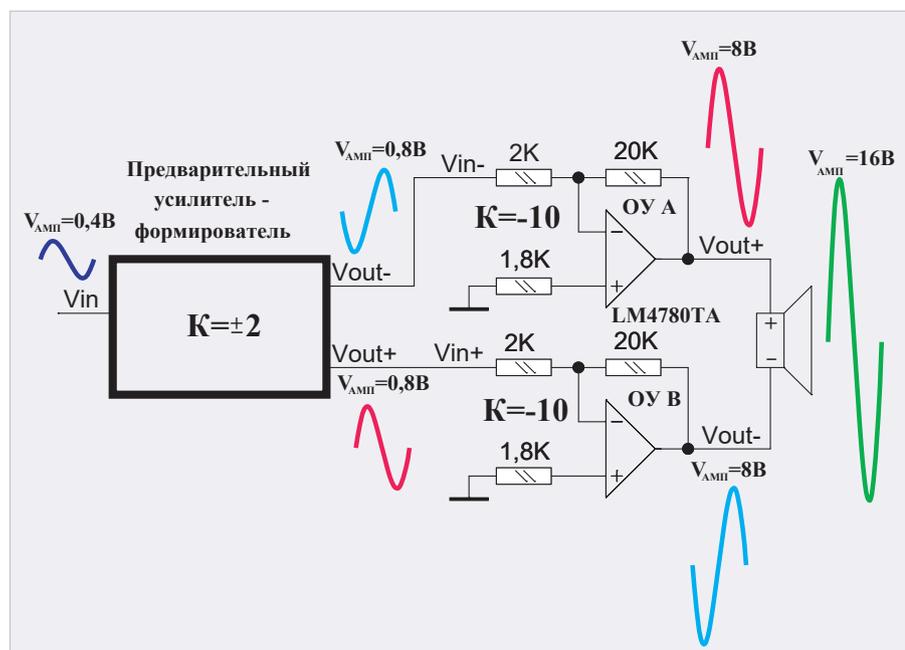


Рис. 1. Упрощённая схема работы мостового усилителя

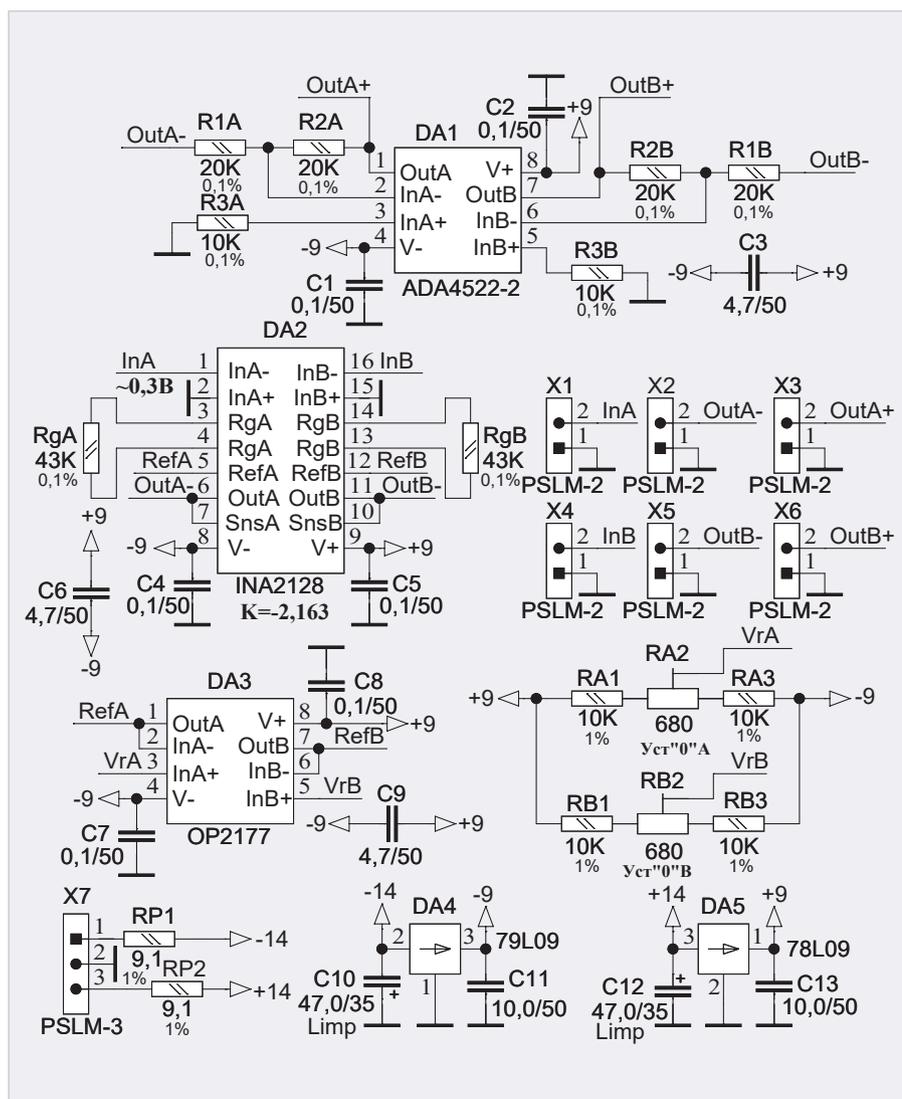


Рис. 2. Принципиальная схема двухканального усилителя-формирователя

2. Иметь возможность подстройки напряжения смещения между двумя ОУ, другими словами, при своём заземлённом входе подстроить два своих выходных напряжения таким образом, чтобы выходное напряжение между двумя мощными ОУ было бы также нулевым, или, по крайней мере, не выходило за предел 1 мВ (при выходном напряжении в 8 В каждого из ОУ это достаточно малая погрешность).
3. Усилить входные сигналы по крайней мере в 2 раза.

В статье автора [1] описан такой усилитель-формирователь на базе двух микросхем AD8295. В состав AD8295 входит ИУ и два ОУ, к одному из которых подключены два прецизионных резистора номиналом по 20 К (один к инвертирующему входу, второй – к его выходу), позволяющих на его основе построить классический инвертор. Но, как упоминалось выше, сейчас, к сожалению, AD8295 можно приоб-

рести за достаточно высокую цену: от 1000 до 2000 руб. за штуку, в связи с чем стоимость такого усилителя-преобразователя составит от 2000 до 4000 руб., что явно очень дорого.

Автор задался вопросом, нельзя ли существенно снизить стоимость такого усилителя-формирователя, не потеряв при этом качество выходных сигналов? В этом случае понадобятся два ИУ и два сдвоенных ОУ, один из которых должен быть достаточно прецизионным. Пересмотрев в Интернете подобные ИУ и ОУ, автор нашёл хорошую замену двум AD8295: сдвоенный ИУ INA2128, сдвоенный прецизионный ОУ ADA4522-2 и сдвоенный стандартный ОУ OP2177. Основанием выбора указанных ИУ и ОУ стали их характеристики в сравнении с характеристиками AD8295. Ниже приведены некоторые характеристики AD8295, ИУ INA2128, ОУ ADA4522-2 и ОУ OP2177, взятые из их технических документов.

1. Максимальная частота сигналов, воспроизводимых без искажения ИУ, входящего в состав AD8295, при единичном коэффициенте усиления (0 дБ) составляет 100 кГц, для ИУ INA2128 – 600 кГц, т.е. она в 6 раз выше. При коэффициенте усиления около 2 (см. выше) эта частота составляет 60–70 кГц для ИУ AD8295 и около 200–300 кГц для INA2128.
2. Напряжение смещения ОУ, входящего в состав AD8295, составляет 120 мкВ, у ОУ ADA4522-2 – всего 0,7 мкВ (это так называемый ОУ с «нулевым» смещением – Zero Drift), у ОУ OP2177 – 60 мкВ.
3. Максимальная частота, при которой сигналы воспроизводятся без искажений при единичном коэффициенте усиления у ОУ, входящего в состав AD8295, составляет 1 МГц, у ОУ ADA4522-2 – 3 МГц.

Как будет видно из дальнейшего изложения, ОУ ADA4522-2 используется для инверсии входного сигнала взамен ОУ, входящего в состав AD8295 и выполняющего ту же функцию, а ОУ OP2177 – как повторителя напряжения, снятого с делителя напряжений питания и предназначенного для подключения к входу опорного напряжения (Ref) ИУ.

Как видно из сравнения, характеристики выбранных ИУ и ОУ несколько превосходят характеристики ИУ и ОУ, входящих в состав AD8295.

И последнее сравнение – по стоимости. В сумме ИУ INA2128, ОУ ADA4522-2 и OP2177, если их приобрести на Aliexpress, не дороже 500 руб. (т.е. в несколько раз дешевле двух AD8295 – см. выше). На их основе и был сконструирован описанный далее усилитель-формирователь.

## Принципиальная схема усилителя-формирователя

Основой всей схемы (рис. 2) является сдвоенный ИУ INA2128 (DA2), выходное напряжение каждого канала которого определяется следующей формулой:

$$V_{\text{out ИУ}} = (V_{\text{in}+} - V_{\text{in}-}) \times K_u + V_{\text{ref}} \quad (1)$$

где  $V_{\text{out ИУ}}$  – выходное напряжение ИУ,  $V_{\text{in}+}$  – напряжение на неинвертирующем входе,  $V_{\text{in}-}$  – напряжение на инвертирующем входе,  $V_{\text{ref}}$  – опорное напряжение,  $K_u$  – коэффициент усиления ИУ. Для INA2128  $K_u = 1 + 50\text{K}/\text{RG}[\text{K}]$  (см. его справочный листок – datasheet), где RG – резистор, подключённый ко входу RG (3, 4 и 13, 14 выводы DA2). При

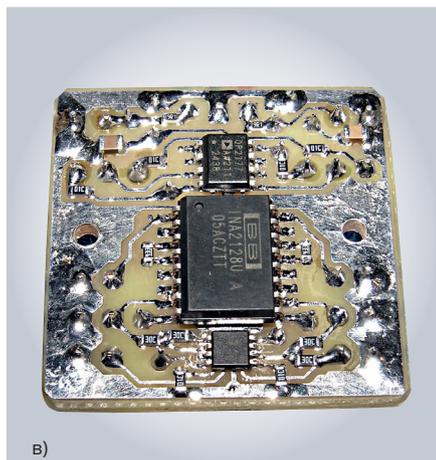
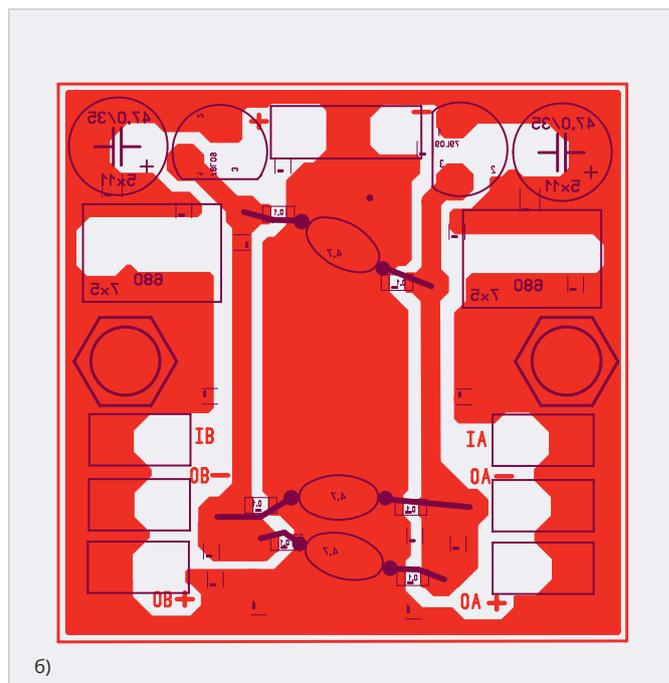
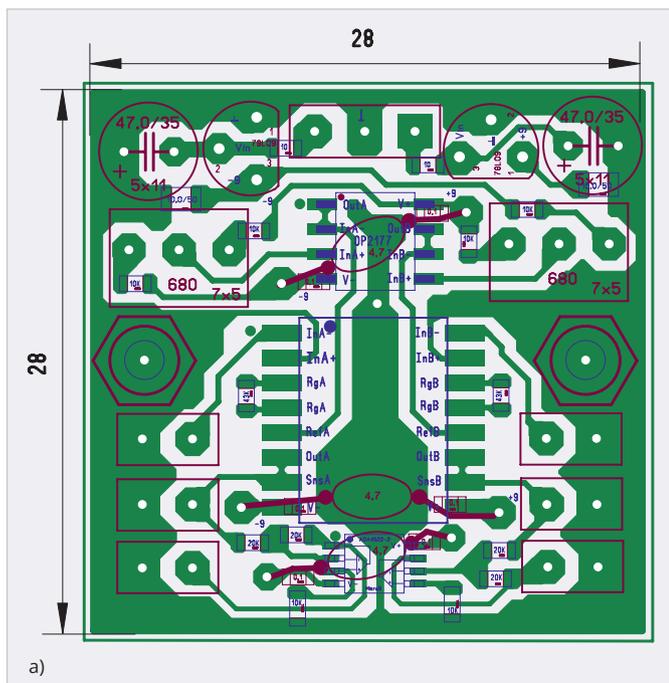


Рис. 3. Разводка и внешний вид платы устройства: а, в – вид со стороны расположения микросхем, б, г – вид с обратной стороны

$R_G = 43K$ , как на схеме рис. 2 ( $R_{GA}, R_{GB}$ ),  $K_u = 1 + 50K/43K = 1 + 1,163 = 2,163 \approx 2,16$ . Таким образом, при входном напряжении  $\sim 0,3$  В (действующее значение сигнала) выходное напряжение будет  $\sim 0,3 \text{ В} \times 2,16 = \sim 0,648 \text{ В}$ , а его амплитудное значение (если сигнал синусоидальный) – в  $\sqrt{2}$  раз больше ( $0,916 \text{ В} \approx 0,92 \text{ В}$ ).

Если заземлить один из входов ИУ, например, неинвертирующий ( $V_{in+} = 0$ ), то с учётом того, что  $R_G = 43K$ , формула (1) упрощается и принимает вид:

$$V_{out \text{ ИУ}} = -V_{in-} \times 2,16 + V_{ref} \quad (2)$$

Как видно из (2), выходное напряжение является инверсным по отношению ко входному; кроме того, регулируя напряжение  $V_{ref}$  можно в некоторых пределах регулировать постоянную составляющую на

выходе ИУ (или его напряжение смещения).

Как видно из рис. 2, входные сигналы каждого из каналов  $InA$  и  $InB$  подаются на инвертирующие входы  $DA2$  ( $InA-$  и  $InB-$ ), неинвертирующие входы ( $InA+$  и  $InB+$ ) заземлены, два опорных напряжения ( $RefA$  и  $RefB$ ) подаются на соответствующие входы  $DA2$ , а выходные сигналы  $OutA-$  и  $OutB-$  (проинвертированные и усиленные в 2,16 раз) снимаются с соответствующих выводов  $DA2$ . Входные сигналы  $SnsA$  и  $SnsB$   $DA2$  в соответствии со справочным листком должны быть соединены с выходными сигналами ( $OutA$  и  $OutB$  соответственно). Питание  $DA2$  ( $\pm 9 \text{ В}$ ) подаётся на соответствующие выводы  $DA2$ . Конденсаторы  $C4$  и  $C5$  – блокировочные. Конденсатор  $C6$  – выводной. Он выполняет двоякую функцию:

первая (второстепенная) – он также является блокировочным, вторая (главная) – он выполняет соединение («земля» и питание) одного слоя платы с другим (см. далее), что исключает металлизацию отверстий, которая в домашних условиях весьма проблематична, а потому неприемлема.

Сигналы  $InA$ ,  $OutA-$ ,  $InB$ ,  $OutB-$  подаются на разъёмы PSLM-2 ( $X1$ ,  $X2$ ,  $X4$  и  $X5$  соответственно).

Кроме того, сигналы  $OutA-$  и  $OutB-$  подаются на входы двоярного ОУ  $ADA4522-2$  ( $DA1$ ), включённого как классический инвертор с помощью резисторов  $R1A$ ,  $R2A$ ,  $R3A$  и  $R1B$ ,  $R2B$ ,  $R3B$ . Выходные (проинвертированные) сигналы  $OutA+$  и  $OutB+$  подаются на разъёмы  $X3$  и  $X6$  соответственно. Питание ( $\pm 9 \text{ В}$ ) подаётся на соответствующие выводы  $DA1$ . Конденсаторы  $C1$  и  $C2$  – блокировочные. Выводной конденсатор  $C3$  также выполняет вышеописанную двоякую функцию.

Делители  $RA1$ ,  $RA2$ ,  $RA3$  и  $RB1$ ,  $RB2$ ,  $RB3$  предназначены для получения двух напряжений смещения  $VrA$  и  $VrB$ , которые снимаются с движков многооборотных подстроечных резисторов  $RA2$  и  $RB2$  (марки 3266Y). Этими резисторами выставляются «нули» на выходах мощных ОУ, включённых по мостовой схеме. Сигналы  $VrA$  и  $VrB$  подаются на входы двоярного ОУ  $OP2177$  ( $DA3$ ), включённого как два повторителя напряжения. Выходные сигналы с повторителей ( $RefA$  и  $RefB$ ) подаются на соответствующие входы ИУ  $DA2$ . Роль повторителей напряже-

ния состоит в том, что, поскольку входы DA2 RefA и RefB имеют невысокий импеданс, подключение высокоимпедансных выходов (VrA и VrB) с делителями непосредственно ко входам RefA и RefB разрешается только с использованием повторителей напряжения (см. справочный листок INA2128), что и сделано. Питание ( $\pm 9$  В) подаётся на соответствующие выводы DA3. Конденсаторы C7 и C8 – блокировочные. Выводной конденсатор C9 также выполняет вышеописанную двоякую функцию.

Стабилизаторы 79L09 (DA4) и 78L09 (DA5) предназначены для получения двух напряжений питания ( $-9$  В и  $+9$  В соответственно). Конденсаторы C11 и C13 – блокировочные. Резисторы RP1 и RP2, подключённые к разъёму PSLM-3 (X7), по которому на плату подаётся питание ( $\pm 14$  В), совместно с конденсаторами C10 и C12 соответственно образуют помехоподавляющие НЧ RC-фильтры.

### Разводка и внешний вид платы устройства

Разводка платы (рис. 3а, 3б) сделана автором с помощью программы SprintLayout 6.0. Файл разводки при-

ведён в дополнительных материалах на сайте журнала. Земляные контакты всех разъёмов, электролитических конденсаторов и стабилизаторов, все выводы керамических выводных конденсаторов, а также выводы стабилизаторов с выходными напряжениями необходимо пропаять с двух сторон платы. По бокам платы расположены два крепёжных отверстия (рис. 3в, 3г). В связи с простотой схемы (рис. 2) плата легко разводится и имеет небольшой размер:  $28 \times 28$  мм.

### Настройка и тестирование устройства

Настройка усилителя-формирователя производится в два этапа.

1-й этап – для целей тестирования самого устройства, 2-й – для настройки нулевого напряжения смещения между двумя выходами мощных ОУ в составе УМЗЧ.

1-й этап заключается в следующем. Вначале настраивается напряжение смещения 1-го канала (А). Для этого проводится следующая процедура.

К 3-контактному разъёму (X7, рис. 2) подключается ответный разъём SIP-3

кабеля, который своим вторым концом подключается к клеммам двухполярного стабилизированного источника питания (ИП) с выходными напряжениями  $\pm 14$  В и с выходными токами каждой полярности не менее 50 мА. Для этого автор использовал стабилизированный регулируемый ИП, описанный в [2]. На два входных 2-контактных разъёма (X1 и X4, рис. 2) надеваются джамперы (перемычки), или, другими словами, заземляются оба входных сигнала. К выходным 2-контактным разъёмам 1-го канала (X2 и X3, рис. 2) подключаются два разъёма SIP-2 одного конца двух коаксиальных кабелей таким образом, чтобы их экраны были подключены к «земле» – 1-е контакты X2 и X3, а внутренние жилы были подключены к выходным контактам OutA– и OutA+ – 2-е контакты X2 и X3. Экраны вторых концов кабелей объединяются, а к двум внутренним жилам подключается цифровой вольтметр (мультиметр) так, чтобы «–» мультиметра соединялся с сигналом OutA–, а «+» – с сигналом OutA+. Далее ИП и мультиметр включаются, и отвёрткой, желатель-

**innodisk**

Industrial  
**SATADOM-MV**  
3ME4 Series

**SATADOM — ИДЕАЛЬНОЕ ЗАГРУЗОЧНОЕ РЕШЕНИЕ**

Компактные твердотельные накопители с интерфейсом SATA III с высокой скоростью передачи данных

**PROSOFT®** ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

Рис. 3а

но с керамическим наконечником, производится регулировка напряжения между этими двумя выходами с помощью подстроечного резистора RA2 (рис. 2). Необходимо настроить это напряжение в районе +1 мВ, чтобы не было перекрытия между двумя каналами. Многооборотные подстроечные резисторы позволяют настроить это напряжение с точностью до 0,1 мВ. После настройки питание ИП выключается, и от кабеля отключается мультиметр. На этом настройка канала А заканчивается. Напряжение смещения второго канала (В) настраивается аналогичным образом.

После этого плата подготавливается к тестированию.

Вначале тестируется 1-й канал (А). Для этого джампер с разъёма X1 (рис. 2) снимается, и к этому разъёму ответным разъёмом SIP-2 подключается коаксиальный кабель, который своим вторым концом подключается к выходному разъёму генератора синусоидальных сигналов звуковой частоты. В качестве такого генератора можно использовать любой НЧ-генератор звуковых частот. Автор использовал генератор, описанный в [3]. Ко вторым концам вышеуказанных кабелей, подключённых к разъёмам X2 и X3, подключаются щупы 2-канального осциллографа (желательно цифрового), входы которого должны быть открытыми (в цифровом осциллографе необходимо выбрать опцию DC). Далее питание генератора включается, устанавливается необходимая частота (20 Гц, 1 кГц, 20 кГц или иная) и необходимая амплитуда сигнала (до 1 В). После этого включается ИП и производится наблюдение на осциллографе двух выходных сигналов. Они должны быть строго в противофазе.

Далее необходимо проверить коэффициент усиления, который должен быть чуть более 2 (точнее, 2,16). Для этого выходной сигнал с генератора подключается к одному каналу осциллографа, а выходной сигнал устройства – ко второму. Здесь необходимо отметить, что все переключения кабелей и щупов осциллографа необходимо производить при выключенном питании.

После этого необходимо проверить синусоидальность выходных сигналов усилителя-формирователя. Если цифровой осциллограф имеет возможность измерять действующее значение

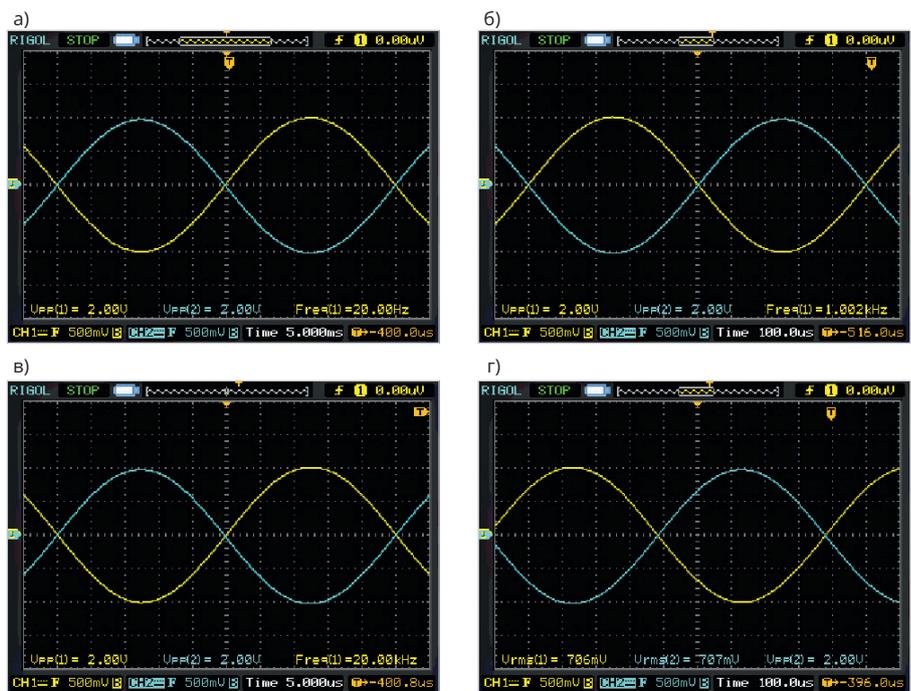


Рис. 4. Осциллограммы двух выходных сигналов усилителя-формирователя при частоте: а – 20 Гц, б – 1 кГц, в – 20 кГц, г – 1 кГц с индикацией  $V_{pp}$  и  $V_{rms}$

ние ( $V_{rms}$ ) выходного напряжения, то оно должно быть в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитудного значения ( $V_{amp}$ ), т.е.  $V_{rms}$  должно составлять около 0,707 от  $V_{amp}$ , если сигнал синусоидален. Если цифрового осциллографа нет, выходной сигнал можно наблюдать чисто визуально. Такой способ также не лишён смысла, поскольку даже незначительные отклонения формы сигнала от синусоидальной довольно легко заметны на глаз.

Второй канал (В) тестируется аналогично.

На втором этапе необходимо настроить смещение каждого канала УМЗЧ. Для этого усилитель-формирователь подключается к входам мощных ОУ в составе УМЗЧ. К их выходам подключаются два мощных резистора (не менее 40 Вт) номиналом около 4 Ом (автор использовал 40-ваттные резисторы номиналом 3,9 Ом). Входы усилителя-формирователя заземляются (на них надеваются джамперы), а к резисторам подключается цифровой вольтметр (или мультиметр). Далее включается питание ИП УМЗЧ, и, вращая шлиц подстроечных резисторов усилителя-формирователя отвёрткой, желательно с керамическим наконечником, добиваются показаний мультиметра в районе +1 мВ, чтобы не было перекрытия сигналов двух каналов. Таким образом настраивают напряжение смещения обоих каналов УМЗЧ.

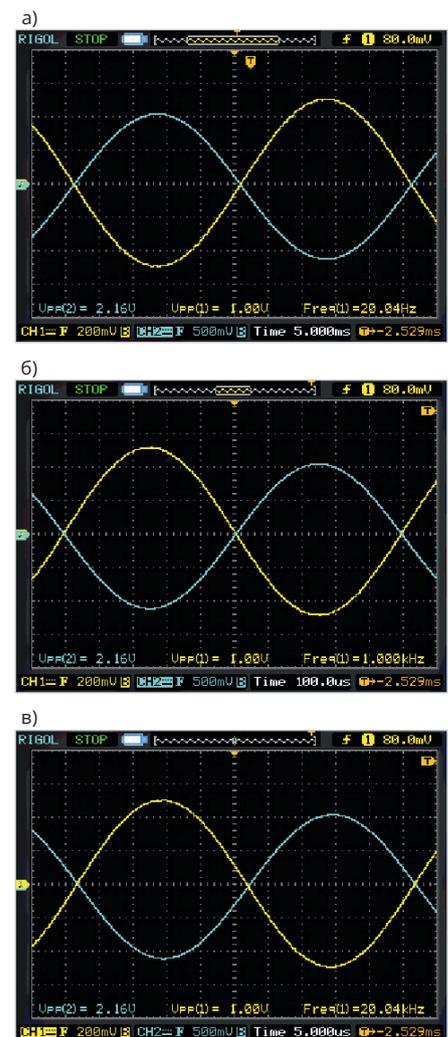


Рис. 5. Осциллограммы входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов ИУ при частоте: а – 20 Гц, б – 1 кГц, в – 20 кГц

## Результаты тестирования устройства

Для тестирования устройства подойдёт любой стабилизированный источник питания (ИП) с выходными напряжениями  $\pm 14$  В с максимальным током не менее 50 мА и высококачественный генератор синусоидальных сигналов звукового диапазона. Автор использовал ИП, описанный в [2], и генератор, описанный в [3].

Осциллограммы двух выходных сигналов (жёлтый и бирюзовый) усилителя формирователя (рис. 4) показали, что при частотах 20 Гц, 1 кГц и 20 кГц оба сигнала имеют одну и ту же амплитуду (1 В) и строго в противофазе.  $V_{pp}$  – размах сигнала от пика до пика (« $V_{pp}(1)=2.00V$ », « $V_{pp}(2)=2.00V$ »), а его амплитуда  $V_{amp} = 1$  В, т.е. в 2 раза меньше.

На рис. 4г приведена осциллограмма сигналов при частоте 1 кГц (развёртка «Time 100.0us» с рис. 4б), на которой показаны действующие значения обоих сигналов (« $V_{rms}(1)=706mV$ », « $V_{rms}(2)=707mV$ ») при « $V_{pp}(2)=2.00V$ », т.е. при амплитуде

обоих сигналов в 1 В. Как известно, если действующее значение сигнала ( $V_{rms}$ ) в  $\sqrt{2}$  раз меньше его амплитудного значения, то сигнал синусоидален. При амплитудном значении синусоидального сигнала в 1 В его действующее значение равно:  $1 В / \sqrt{2} \approx 0,707 В$  (707 мВ), что и подтверждает рис. 4г (« $V_{rms}(2)=707mV$ »), или, другими словами, сигналы строго синусоидальны.

На рис. 5 показаны осциллограммы входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов ИУ при разных частотах (20 Гц, 1 кГц и 20 кГц). Как видно из этих осциллограмм, при входном сигнале с размахом в 1 В (« $V_{pp}(1)=1.00V$ ») выходной сигнал имеет размах 2,16 В (« $V_{pp}(2)=2.16V$ »). Это означает, что  $K_u$  – коэффициент усиления ИУ – постоянен, не зависит от частоты и равен 2,16 (см. формулу (2)).

## Заключение

Применение современных недорогих и достаточно качественных электронных компонентов (ИУ INA2128 и двух сдвоенных ОУ OP2177 и ADA4522-2) позволило сконструировать усили-

тель-формирователь, отличающийся низкой стоимостью и позволяющий использовать в УМЗЧ мощные ОУ (LM4780 и LM3886) в мостовом включении с низким КНИ (до 0,15%). Подобное устройство также может найти применение в преобразователях несимметричного сигнала в симметричный, как правило, использующихся в длинных линиях связи микрофонов и других устройств с усилителями звука.

## Литература

1. Кузьминов А. Усовершенствованный УМЗЧ на базе ИУ и мощных ОУ // Современная электроника. 2019. № 5.
2. Кузьминов А. Применение мощного аудио ОУ LM1875T в новых (не аудио) приложениях // Современная электроника. 2021. № 7.
3. 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.





# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ

Серия **сМТХ**



**Высокопроизводительные панели оператора с системой контроллера CODESYS ПЛК**

- Визуализация с помощью EasyBuilder Pro
- Поддержка протоколов IIoT: MQTT и OPC UA
- Поддержка CANopen, Modbus TCP/IP, EtherCAT, EtherNet/IP
- Поддержка удалённого ввода/вывода



Панели оператора серии сМТХ одобрены Российским морским регистром судоходства



(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

Рисунки