

Двухканальный усилитель для наушников, подключаемых к телефону, с батарейным питанием

Алексей Кузьминов

В статье описан двухканальный усилитель для наушников на базе двойного ОУ AD8532 и ОУ AD8531. Для питания усилителя используется аккумулятор 18650 ёмкостью 3 А·ч, что позволяет устройству непрерывно работать около 100 часов. Диапазон входных напряжений – стандартный входной звуковой сигнал (телефон, плеер, проигрыватель виниловых пластинок и т.п.) с амплитудой 0,3–0,4 В. Активное сопротивление наушников – не менее 30–50 Ом. Диапазон частот 0 Гц – 30 кГц. КНИ+Ш – менее 0,3%. Приведены: схема усилителя, разводка и внешний вид его платы, общий вид всего устройства, а также осциллограммы, полученные при тестировании усилителя.



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

Введение

Портативный усилитель для наушников, подключаемых к современным смартфонам, оснащённым разъёмом USB Type-C, хорошо известен; его можно приобрести по цене от 1000 руб. и выше. Питание такого усилителя и два выходных звуковых сигнала выведены на этот же разъём USB Type-C. Однако до сих пор используются смартфоны и планшеты, оборудованные разъёмом USB Micro, который подоб-

ным свойством не обладает. У этих смартфонов и планшетов для подключения к наушникам используется стандартный разъём: гнездо 3,5 мм стерео. Однако, если подключить к этому разъёму даже достаточно качественные наушники, звук будет очень слабым, поскольку активное сопротивление таких наушников составляет 40–60 Ом, на которое подобные смартфоны и планшеты, как правило, не рассчитаны. В связи с этим выпу-

скаются усилители для наушников, укомплектованные аккумулятором, цены на которые достаточно высокие (от 2–3 тысяч рублей и выше). Также выпускаются усилители для наушников, питание которых осуществляется от сетевого напряжения ≈ 220 В. Цены на подобные усилители начинаются уже от 10 тыс. руб. Автор задался вопросом: а нельзя ли сконструировать усилитель для наушников своими силами? Тем более что уже имелись достаточно качественные наушники и смартфон, оборудованный аудиовходом 3,5 мм стерео, а разъём USB был как раз Micro. Просмотр схем подобных усилителей из Интернета показал, что подавляющее их большинство основано на дискретных элементах (транзисторах), и эти схемы достаточно сложны и габаритны. Более простое решение – использование мощных ОУ. Но такие ОУ достаточно дороги и также габаритны. Стандартные ОУ в менее габаритных корпусах, например, MSOP или «безногих» QFN, как правило, обеспечивают выходной ток не более 10–20 мА, поэтому обеспечить нагрузку в 40–60 Ом не способны. Однако автор нашёл несколько достаточно мощных ОУ в корпусах MSOP и QFN, выходной ток которых может достигать 250 мА. Одним из таких ОУ является AD853X производства компании Analog Devices. Существует одноканальная версия этого ОУ – AD8531 (в корпусе SOT23-5), двухканальная – AD8532 (MSOP-8) и даже 4-канальная – AD8534 (TSSOP-14). Этот ОУ достаточно скоростной (5 В/мкс, 3 МГц), обеспечивает выходной ток до 250 мА и требует питания напряжением 2,7–6 В. ОУ достаточно распространён, легкодоступен и недорог: AD8531 можно приобрести за 40–60 руб., а AD8532 – за 100–120 руб. Этот ОУ, в частности, как раз предназначен для аудиоприменений (Multimedia Audio) и

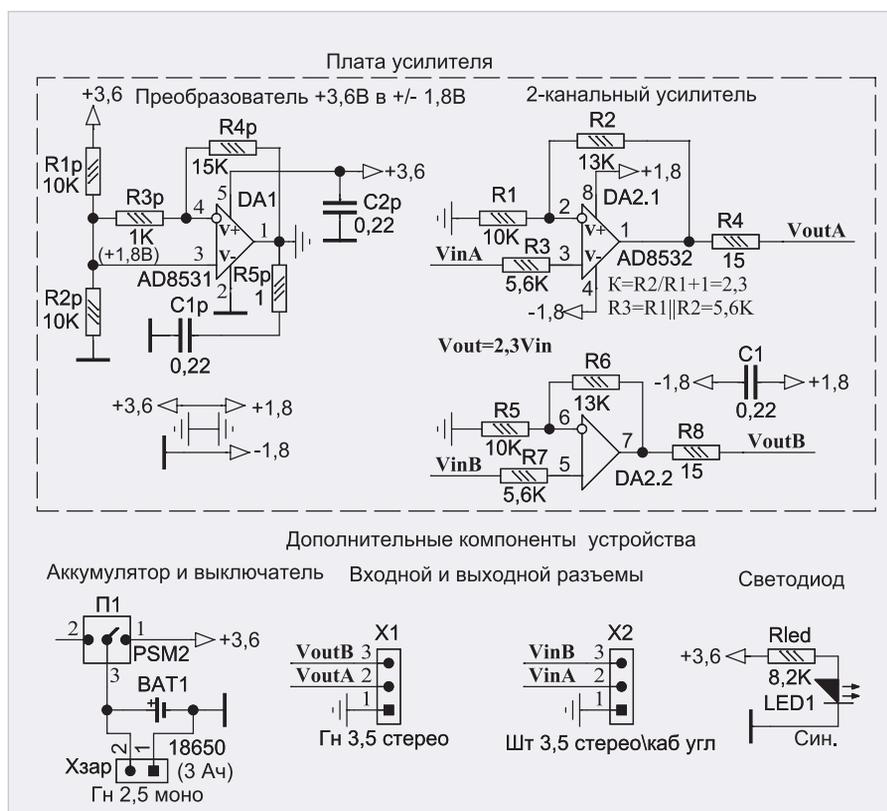


Рис. 1. Принципиальная схема устройства

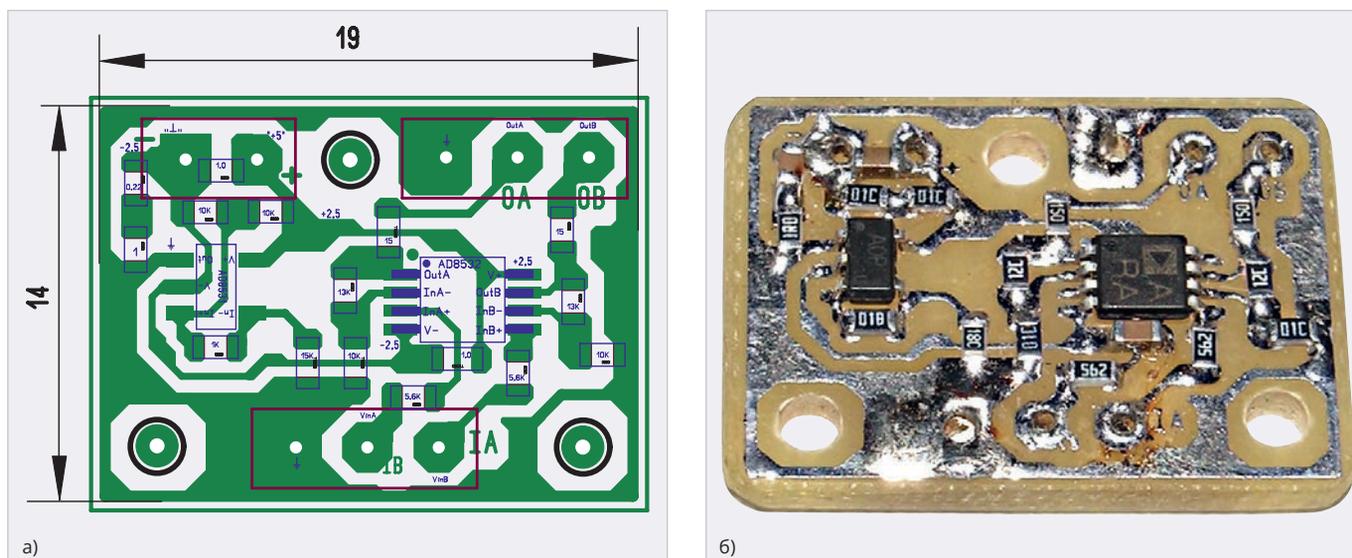


Рис. 2. Разводка (а) и внешний вид (б) платы устройства

даже как усилитель для наушников (Headphone Driver), что указано в его особенностях, описанных в справочном листке (Datasheet). Там же приведена схема двухканального усилителя для наушников (Figure 44. A Single-Supply, Stereo Headphone Driver), предназначенная для подключения наушников с сопротивлением 48 Ом. Однако эта схема, на взгляд автора, обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, в этой схеме ОУ включены как обычные повторители напряжения, т.е. по амплитуде они сигнал не усиливают (у повторителя коэффициент усиления, как известно, равен 1), а усиливают только по току. Во-вторых, поскольку напряжение питания однополярное, ко входу повторителя дополнительно подключён делитель напряжения питания (пополам, т.е. в 2 раза), чтобы напряжение входного и выходного сигналов находилось в пределах напряжения питания. Для этого использованы разделительные конденсаторы как на входе (10 мкФ), так и на выходе (270 мкФ). Если в качестве входных использовать недорогие керамические конденсаторы такой ёмкости, то в качестве выходных необходимо либо использовать достаточно дорогие и габаритные электролитические конденсаторы с низким импедансом (Low Imp) стоимостью 70–100 руб., либо (что существенно лучше) ещё более габаритные и дорогие неполярные аудиоконденсаторы по цене 250–300 руб. за штуку, а поскольку их два, то общая стоимость выходных конденсаторов составит 500–600 руб., что непозволительно дорого. В приве-

дённой далее схеме автора оба этих недостатка сняты, а качество усилителя получилось настолько высоким, что автор этого даже не ожидал.

Принципиальная схема усилителя

Схема устройства (рис. 1) достаточно проста. Она состоит из преобразователя однополярного питания в двухполярное (или формирователя искусственной «земли») на базе одноканального ОУ AD8531 (DA1). Схему такого формирователя автор «подсмотрел» в справочном листке (Datasheet) на мощный ОУ LM675 (Figure 3. Generating a Split Supply From a Single Supply). Этой схемой как на LM675, так и на AD8531 (рис. 1) автор уже неоднократно пользовался, и она показала идеальную работу. Как видно из рис. 1, схема состоит из делителя напряжения питания (в 2 раза) с помощью резисторов R1p и R2p, усилителя в 15 раз на ОУ и резисторах R4p и R3p (коэффициент усиления равен: $K = R4p/R3p = 15K/1K = 15$) и RC-цепочки R5p-C1p, устраняющей самовозбуждение

ОУ. Конденсатор C2p блокировочный и положен для штатной работы этого ОУ. Выходное напряжение ОУ как раз и является искусственной «землей» – перевернутая «ёлочка». Если напряжение питания ОУ DA1 составляет, например, 3,6 В, то относительно этой искусственной «земли» образуются два напряжения: +1,8 В и –1,8 В. Этими двумя напряжениями питается двоярный ОУ AD8532 (DA2), на базе которого сконструированы два идентичных неинвертирующих усилителя (на DA2.1 и DA2.2) с коэффициентом усиления, равным: $K = R2/R1 + 1$ (или $R6/R5 + 1$) = $13K/10K + 1 = 1,3 + 1 = 2,3$. Резисторы R4 и R8 (как и в Datasheet на AD8532) ограничивают выходной ток ОУ, если выходы случайно будут замкнуты на «землю». Конденсатор C1

блокировочный и положен для штатной работы ОУ.

Питается усилитель от аккумулятора 18650 (BAT1 в левом нижнем углу рис. 1) ёмкостью 3 А·ч. Для зарядки аккумулятора используется зарядное устройство (см. далее), кото-

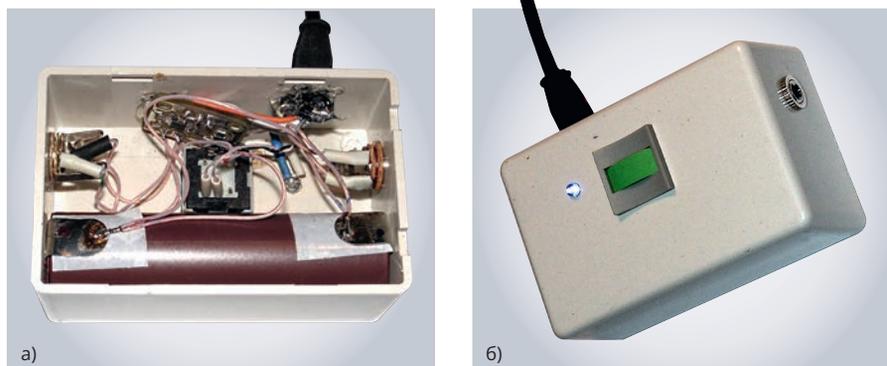


Рис. 3. Усилитель в корпусе: а) со снятой крышкой, б) общий вид в сборе

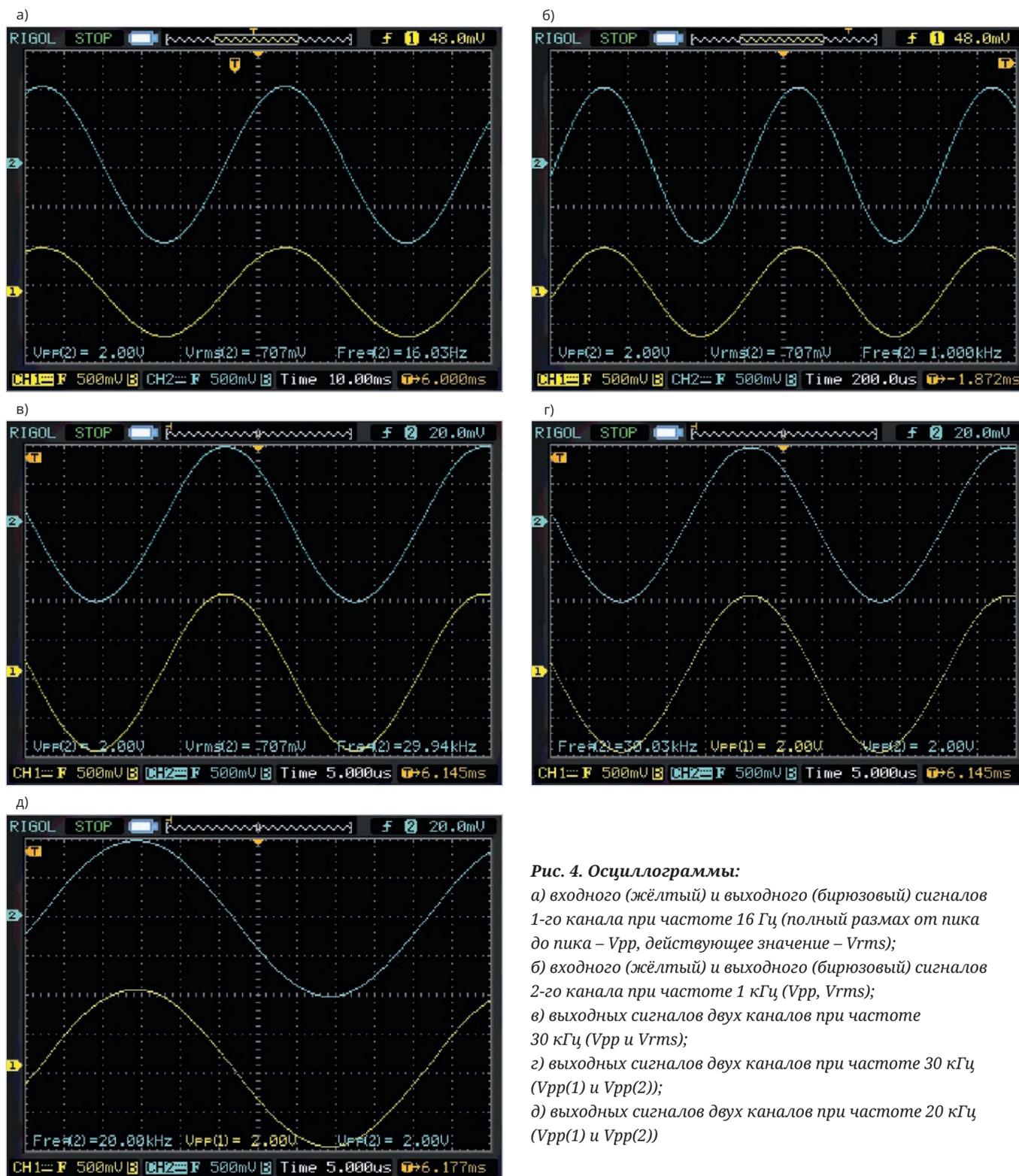


Рис. 4. Осциллограммы:

- а) входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов 1-го канала при частоте 16 Гц (полный размах от пика до пика – V_{pp} , действующее значение – V_{rms});*
- б) входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов 2-го канала при частоте 1 кГц (V_{pp} , V_{rms});*
- в) выходных сигналов двух каналов при частоте 30 кГц (V_{pp} и V_{rms});*
- г) выходных сигналов двух каналов при частоте 30 кГц ($V_{pp}(1)$ и $V_{pp}(2)$);*
- д) выходных сигналов двух каналов при частоте 20 кГц ($V_{pp}(1)$ и $V_{pp}(2)$)*

рое подключается кабелем к гнездовому аудиоразъёму 2,5 моно (Хзар). Для подключения напряжения аккумулятора к усилителю используется кнопка с фиксацией PSM2 (П1). Подключение усилителя к телефону осуществляется кабелем, на конце которого расположен штекерный разъём 3,5 стерео (X2), а подключение наушников к усилителю – штекером на кабеле наушников, который вставляется в гнездовой разъём 3,5 стерео (X1), расположенный на корпусе усилителя. Для

индикации включённого состояния усилителя служит синий светодиод (LED1), который со своим токоограничительным резистором (Rled) подключается к напряжению питания (+3,6 В и «земля»). И последнее, что следует упомянуть о схеме. Отсутствие разделительных конденсаторов позволяет усиливать даже постоянное напряжение или, другими словами, минимальная частота частотного диапазона схемы составляет 0 Гц. Что касается максимальной частоты, то её значение, как

будет видно из дальнейшего изложения, составляет 30 кГц (и даже больше) – см. далее. Как видно из рис. 1, схема достаточно проста и поэтому легко разводится (см. далее).

Разводка платы усилителя и её внешний вид

Разводка платы (рис. 2а) сделана автором с помощью программы SprintLayout 6.0. Файл разводки в формате *.lay6 приведён в дополнительных материалах на сайте журнала.

В связи с простотой схемы разводка сделана односторонней (рис. 2а), а сама плата (рис. 2б) изготовлена на стеклотекстолите толщиной 1,5 мм с односторонним медным покрытием размером 14×19 мм.

Устройство усилителя

Прибор расположен в пластиковом корпусе марки 20-33 размером 70×45×28 мм с защёлкивающейся крышкой (рис. 3а, б). Аккумулятор приклеен к внутренней поверхности корпуса тонкой лентой с двусторонним липким слоем. Выходной гнездовой разъём 3,5 стерео и разъём для зарядки аккумулятора – гнездовой разъём 2,5 моно – прикручены гайками к боковым поверхностям корпуса через соответствующие отверстия. Входной разъём (штекер 3,5 стерео) укреплен на одном конце кабеля, а провода второго его конца непосредственно припаяны к соответствующим контактным площадкам платы. Сама плата приклеена к боковой внутренней поверхности корпуса термоклеем.

Этим же клеем укреплены провода кабеля (пропущенного через резиновую втулку) со входным разъёмом. Для кнопки на лицевой поверхности корпуса прорезано прямоугольное окно, в которое она вставлена с натягом (рис. 3а, б). Светодиод вставлен в отверстие, просверленное на лицевой поверхности корпуса (рис. 3а, б). Стоимость комплектующих устройства не более 600–700 руб., в которую включена стоимость корпуса (60 руб.), аккумулятора (200 руб.), разъёмов (3 шт. по 60–80 руб.), кнопки (60 руб.), а также ОУ (60 руб. и 100 руб. – см. выше).

Результаты работы прибора

Для проверки синусоидальности выходных сигналов усилителя к его входам был подключён генератор синусоидальных сигналов, описанный автором в [1], а к выходам усилителя и входу генератора (в разных комбинациях) был подключён двухканальный цифровой осциллограф, на котором была выбрана опция с открытыми входами (DC). Оба выхода усилителя были нагружены постоянными резисторами по 50 Ом. Полученные осциллограммы (рис. 4) показывают, что при частотах 16 Гц, 1 кГц и 30 кГц выходные сигналы строго синусоидальны, о чём свидетельствуют измеренные осциллографом амплитуда сигнала

в 1 В (она равна половине размаха – $V_{pp} = 2$ В, т.е. 1 В) и соответствующее ей действующее значение ($V_{rms} = 0,707$ В). Как известно, если сигнал синусоидален, то действующее значение $V_{rms} = V_{amp}/\sqrt{2} \approx 0,707 \times V_{amp}$, где V_{amp} – амплитудное значение сигнала. Если подсчитать относительную ошибку V_{rms} , учитывая, что $1/\sqrt{2} \approx 0,707106$, то можно получить: $(0,707106 - 0,707)/0,707106 \times 100\% \approx 0,015\%$. В справочном листке на AD8532 приведено значение коэффициента нелинейных искажений + шум (КНИ+Ш – THD +N) для схемы усилителя для наушников (Figure 44), которое составляет менее 0,3%. Однако, судя по приведённым осциллограммам и расчёте относительной ошибки для V_{rms} , у схемы автогра КНИ+Ш на порядок меньше. Кроме того, поскольку схема рис. 1 может усиливать даже постоянное напряжение, т.е. минимальная частота составляет 0 Гц, схема легко пропускает самые низкие частоты (например, 16 Гц – рис. 4а).

Зарядка аккумулятора

К разъёму Хзар (рис. 1) ответным разъёмом (штекером 2,5 моно) подключается кабель, второй конец которого подключается к плате зарядного устройства на базе специализированной микросхемы TC4056A, оборудованной разъёмом USB Micro для подключения к ней устройства для зарядки телефона с выходным напряжением 5 В. Здесь следует заметить, что на плате с TC4056A по умолчанию установлено максимальное значение зарядного тока в 1 А. Такой ток обеспечивают далеко не все зарядные устройства для телефона. Кроме того, при токе 1 А плата с TC4056A достаточно сильно нагревается и может выйти из строя от перегрева. Поэтому, если использовать зарядку для телефона (или, например, для зарядки аккумуляторов IQOS), обеспечивающую ток 1 А (или более), то плату необходимо установить на

радиатор. Для этого автор использовал миниатюрный пластиковый корпус размером 45×30×16 мм, состоящий из двух половин, которые защёлкиваются между собой (рис. 5). В одну часть корпуса в качестве радиатора установлена медная пластина толщиной 2 мм и размером несколько большим, чем сама плата. Эта пластина прикручена к корпусу четырьмя винтами М2, для чего в ней просверлены отверстия и нарезана соответствующая резьба. Чтобы пластина не касалась корпуса, между ними в качестве толстых шайб установлены 4 гайки М3. Плата приклеена к пластине гибкой термопрокладкой с двусторонним липким слоем. К выходным контактам платы одним концом припаян двухпроводный кабель, который дополнительно укреплен каплей термоклея, а на другой его конец припаян аудиоразъём – штекер моно 2,5 мм, который подключается к ответному разъёму прибора (Хзар, рис. 1). Для разъёма USB Micro в верхней половине корпуса прорезано небольшое окно. Для доступа воздуха внутрь корпуса в обеих его половинах просверлены по 4 отверстия. Кроме того, для того чтобы наблюдать за процессом зарядки, на плате расположены два светодиода, красного и синего цветов, а в корпусе просверлены ещё 2 отверстия как раз над этими светодиодами, чтобы их можно было увидеть. Когда идёт процесс зарядки, горит красный светодиод (рис. 5а). По окончании зарядки красный светодиод гаснет и зажигается синий (рис. 5б). Зарядку аккумулятора необходимо производить при выключенном приборе.

Если же зарядка для телефона обеспечивает ток не более 0,5 А, то радиатор не нужен, так как в этом случае нагрев платы небольшой; правда, время зарядки аккумулятора будет существенно больше.

Если, например, активное сопротивление наушников составляет 50 Ом,

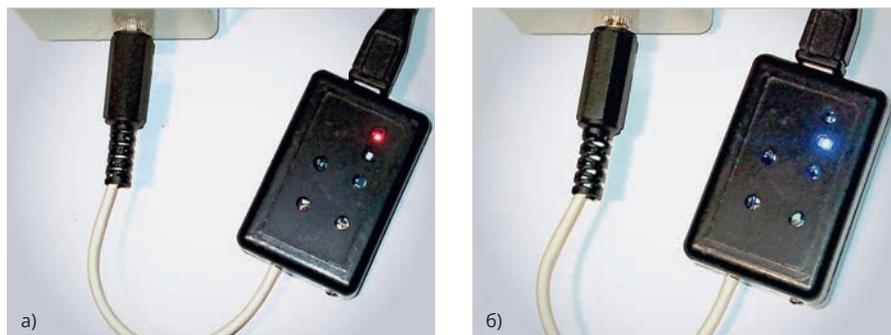


Рис. 5. Процесс зарядки аккумулятора (а) и окончание зарядки (б)



Рис. 6. Общий вид работающего усилителя, подключённого к телефону и наушникам при воспроизведении фонограммы («Something»)

то с учётом R4 и R8 по 15 Ом каждое (рис. 1) полное активное сопротивление нагрузки составит: $50 \text{ Ом} + 15 \text{ Ом} = 65 \text{ Ом}$. При максимальной амплитуде выходного сигнала в 1 В выходной ток составит: $1 \text{ В} / 65 \text{ Ом} \approx 15 \text{ мА}$, а для двух каналов около 30 мА.

Потребление тока микросхем и светодиода мало, и его можно не принимать в расчёт. Учитывая, что ёмкость аккумулятора составляет 3 А·ч, или 3000 мА·ч, время непрерывной работы прибора при полностью заряженном аккумуляторе составит: $3000 \text{ мА·ч} / 30 \text{ мА} \approx 100 \text{ часов}$. О степени заряженности аккумулятора можно следить по яркости свечения светодиода прибора (рис. 3б). Если он светится недостаточно ярко, аккумулятор следует подзарядить.

Работа прибора с телефоном и наушниками

Напоследок автором приведена фотография усилителя, подключённого к телефону и наушникам при воспроизведении фонограммы (рис. 6). Автор прослушал несколько фонограмм и убедился в высоком качестве их звучания.

Заключение

Применение относительно мощных и скоростных ОУ AD8531 и AD8532 позволило сконструировать компактный недорогой усилитель для наушников высокого качества. Питание усилителя от аккумулятора 18650 сделало возможным его непрерывную работу до 100 часов. Кроме того, автономность усилителя позволяет брать его с собой и прослушивать фонограммы с телефона в дороге. Автор рекомендует это устройство для самостоятельного изготовления.

Литература

1. Кузьминов А. Генератор гармонических колебаний звукового диапазона на базе синтезатора частоты AD9837В, микроконтроллера EFM8SB10 и LCD Nokia-5110 с батарейным питанием // Современная электроника. 2023. № 6.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Первый в мире биологический кубит: учёные сконструировали квантовый бит на основе живого белка

Учёные из Чикагского университета и их коллеги создали первый оптически управляемый спиновый кубит на основе генетически кодируемого флуоресцентного белка EYFP – вместо традиционных твёрдых материалов, таких как алмаз или полупроводники. В этом белке им удалось сформировать двухуровневую квантовую систему, использующую долгоживущее триплетное состояние молекулы, где возможно управление спином электронов.

В работе применялся усовершенствованный вариант белка EYFP, широко используемого в клеточной биологии в качестве безопасной и яркой метки. Инициализация кубита выполнялась коротким синим лазерным импульсом, переводящим белок в возбуждённое синглетное состояние, после чего часть молекул переходила в триплетное состояние с определённой ориентацией спина.

Считывание информации производилось с помощью инфракрасного импульса (912 нм), который возвращал систему из триплетного состояния в основное. При этом возникал сигнал задержанной флуоресценции, чётко отделяемый по времени и интенсивности от фонового свечения, что позволяло точно определять спиновое состояние.

Управление спином осуществлялось последовательностью микроволновых сигна-

лов, меняющих конфигурацию состояния. Это подтвердило возможность контролируемого управления и считывания квантового состояния в белковой среде.

В экспериментах при температуре 80 К удалось достичь контраста сигнала между спиновыми уровнями до 20% по одному направлению и 10% – по другому. Время когерентности кубита, в течение которого сохраняется квантовая информация, достигло 16 микросекунд – в 15 раз больше, чем при базовых схемах управления. Время релаксации T1 составило 141 микросекунду. Эти результаты демонстрируют стабильность белкового кубита для практических квантовых операций.

Параметры расщепления спиновых уровней ($D = 2,356 \text{ ГГц}$, $E = 0,458 \text{ ГГц}$), измеренные методом ODMR-спектроскопии, совпали с результатами численного моделирования и характеризуют энергетическую структуру системы.

Важным достижением стала демонстрация работы кубита в биологической среде: в клетках человека (линия HEK 293T) и бактериях E. coli, в том числе при комнатной температуре. В клетках HEK с концентрацией EYFP около 11 мкМ сигналы магнитного резонанса регистрировались с контрастом до 8% даже на фоне сильной автофлуоресценции, что открывает возможности для диагностики in vivo.

Основные текущие ограничения технологии – чувствительность и количество регистрируемых фотонов на молекулу – пока



уступают параметрам алмазных сенсоров на NV-центрах. Однако ключевое преимущество белковых кубитов – возможность генетического внедрения в целевые клетки и точного нацеливания на конкретные биомолекулы.

Перспективы развития включают повышение яркости белка, усовершенствование оптических систем, увеличение числа детектируемых фотонов и оптимизацию белковой структуры методами направленной эволюции.

Впервые показана возможность использования генетически кодируемого белка в качестве полнофункционального кубита, управляемого светом непосредственно в живой клетке. Технология открывает путь к созданию наносенсоров для картирования магнитных и электрических полей на молекулярном уровне in vivo, что может революционизировать биофизику и биомедицинскую диагностику.

