

**Платан**  
**Электронные**  
**Компоненты №6**  
Библиотека технической документации  
Специальный выпуск журнала "Платан"



Тел.: (495) 97 000 99  
E-mail: platan@aha.ru  
121351, Москва  
ул. Ивана Франко, д. 40, стр. 2

Цифровые потенциометры – общие понятия .....	2
Потенциометры для аудио применений .....	9
Потенциометры для оптоволоконных коммуникаций .....	24
Аналоговые фильтры .....	8
Потенциометры для регулировки контраста .....	28
Сводная таблица цифровых потенциометров .....	31

# ЦИФРОВЫЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ — ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

## ВВЕДЕНИЕ

Задачу регулировки различных параметров (звука, контраста, яркости и т.д.) сегодня в большинстве случаев выполняют переменные резисторы. Но современный мир электроники всё больше движется в сторону цифровой обработки данных, в связи с чем традиционные электронные компоненты наполняются новым «смыслом», новыми функциями и возможностями. Один из таких примеров – цифровые потенциометры, компоненты, рабочие функции которых полностью совпадают с обычными переменными резисторами, но цифровой входной интерфейс которых позволяет значительно упростить схемотехнику устройства и в то же время повысить стабильность заданных параметров регулировки.

Сегодня цифровые потенциометры широко используются в компьютерном оборудовании, телекоммуникационных системах, системах контроля промышленного и индустриального оборудования. Устройства используются в самом широком спектре применений: от регулировки громкости звука и контраста изображения до управления сервоприводами. Компоненты выполнены в стандартных промышленных корпусах микросхем, т.е. представляют собой монолитное интегрированное решение, стойкое к механическим воздействиям, вибрации и т.д. Кроме того, цифровой интерфейс позволяют легко интегрировать потенциометры в рабочую систему.

Цифровой потенциометр – это твердотельное устройство, работающее по принципу механического потенциометра и управляющееся через несложный интерфейс. В современных научных статьях и обзорах можно встретить следующие синонимы и обозначения цифровых потенциометров: Digipot, D-Pot, DPOT, цифровой резистор.

Цифровые потенциометры являются упрощенной и недорогой версией цифро-аналоговых преобразователей. Но, тем не менее, принцип работы цифрового потенциометра не следует путать с цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). ЦАПы преобразуют цифровой сигнал в аналоговый, в то время как цифровые потенциометры осуществляют цифровое управление аналоговым сигналом. Тем не менее, некоторые ЦАПы, имеющие резистивную R-2R архитектуру, применяются в качестве цифровых потенциометров, где переменный аналоговый сигнал является входным сигналом для вывода опорного напряжения ЦАП, а выходной сигнал с цифровым управлением берется от выхода ЦАП.

### Конфигурация

Одна из важнейших проблем при работе с цифровыми потенциометрами заключается в правильном выборе конфигурации его использования: будет ли он завершённым потенциометром (трехвыводным) или просто переменным резистором (двухвыводным). Соответствующие внутренние схемы показаны на рисунках 1 и 2. Каждый тип конструкции имеет свои плюсы и минусы.

При возможности, желательно использовать потенциометр в трехвыводной конфигурации. Она имеет несколько преимуществ, среди которых немаловажной является предоставляемая разработчику возможность контроля над нагрузкой движка. При подключении, показанном на рисунке 1, устройство работает как обычный потенциометр. При подключении движка к высокоимпедансной точке, можно удерживать на низком уровне ток, протекающий через движок.

При работе же с переменным резистором (двухвыводная конфигурация) его движок должен выдерживать высокие токи. Это особенно важно, когда движок приближается к верхней



Рис. 1 Трехвыводная конфигурация потенциометра



Рис. 2 Двухвыводная конфигурация переменного резистора

точке шкалы потенциометра, нижний вывод которого заземлен и подключен к движку. Такая конфигурация показана на рисунке 2. В зависимости от напряжения, которое подается на потенциометр, и сопротивления движка разработчик должен следить за тем, чтобы не превышать максимальный номинальный ток на выводах V<sub>H</sub> и V<sub>W</sub>.

### Ток движка

Для решения проблемы передачи большой величины тока через движок следует рассмотреть еще ряд вопросов, актуальных как для двухвыводных, так и трехвыводных конфигураций. В данном случае под большим током понимаются величины от сотен микроампер до 1 мА. В зависимости от выбранной модели потенциометра, движок может иметь сопротивление где-то от десятков Ом до 1 кОм и более. Если через движок с сопротивлением 1 кОм проходит ток, равный 1 мА, падение напряжения на движке составит 1 В. Это может значительно сократить динамический диапазон требуемого выходного сигнала. Поэтому к решению данной задачи следует подходить внимательно.

### Напряжение движка и температурный коэффициент

Другая проблема схемотехники, связанная с движком, – это погрешность выхода, создаваемая нелинейной ВАХ. Движок представляет собой CMOS переключатель и, соответственно, наделен теми же характеристиками изменения сопротивления в зависимости от приложенного напряжения. Это означает, что при изменении напряжения на движке (по причине изменения

положения движка или из-за изменения АС входного сигнала) происходит нелинейное изменение сопротивления самого движка. В результате, любой значительный ток, протекающий через движок, вызовет отклонение и ошибку входного сигнала из-за падения напряжения на движке, которое имеет нелинейную зависимость.

Еще одна характеристика движка, которая может вызвать погрешность, значительную для прецизионных приложений, – это температурный коэффициент. Обычно, в документации на цифровой потенциометр указывается значение температурного коэффициента по отношению к самому резистивному элементу. Тем не менее, в документации не приводится значение коэффициента по отношению к сопротивлению движка. Поскольку движок состоит из CMOS ключей, можно приблизительно считать, что коэффициент самого движка составляет около 300 ppm/°C. Так как сопротивление движка обычно составляет небольшую величину по сравнению с полным сопротивлением потенциометра, такую погрешность можно считать незначительной, хотя она может стать достаточно ощутимой при высоком токе движка в некоторых приложениях.

Что касается суммарного температурного коэффициента потенциометра, такой параметр обычно включается в техническую документацию в качестве абсолютного и метрического значения. Абсолютный температурный коэффициент всегда больше метрического, это наглядно показано на рисунке двухвыводной конструкции потенциометра (рис. 2).

Следовательно, сопротивление между верхним выводом потенциометра и движком будет меняться на значение абсолютного температурного коэффициента в номинальном диапазоне рабочих температур каждого конкретного устройства. Тем не менее, при подключении потенциометра по трехвыводной схеме (рис. 1) сопротивление между верхним выводом и движком будет меняться в зависимости от температуры на приблизительно одинаковый коэффициент, что и сопротивление между движком и нижним выводом потенциометра. Это способствует гораздо более стабильному делению сопротивления, и отображается в документации как метрический коэффициент.

Как показано выше, на погрешность выходного сигнала цифровых потенциометров влияют несколько факторов. Эти погрешности становятся более ощутимыми при переходе движка двухвыводного потенциометра в верхнее положение (приближении к верхнему выводу резистора). Здесь сопротивление движка непосредственно добавляется к требуемому сопротивлению и может даже превышать заданный уровень сопротивления в зависимости от значения конечного сопротивления и разрешения потенциометра.

Существует много приложений, где погрешности, вносимые темпе-

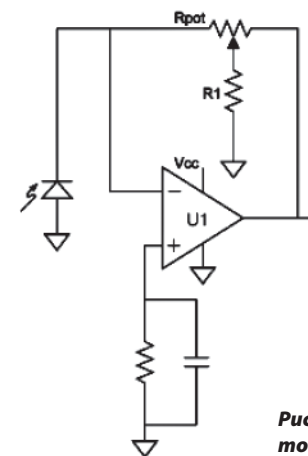


Рис. 3 TEE сборка для управляемого током усилителя

ратурными или другими параметрами движка, являются не критичными. Если потенциометр используется для регулировки источника питания или контраста ЖК дисплея, все перечисленные источники погрешности являются несущественными, но в определенных прецизионных и чувствительных к температуре приложениях они заслуживают внимания.

Один из способов нивелирования недостатков цифровых потенциометров – подключение устройств по трехвыводной схеме там, где это возможно, и подключение вывода движка к операционному усилителю. Такая схема будет гарантировать, что ток движка будет соответствовать входному току смещения операционного усилителя. Используя операционный усилитель с входным током смещения величиной в пА, любая погрешность, вызванная значением или изменением значения сопротивления движка, может быть фактически устранена. Иногда это не так легко реализовать, особенно в усилителе напряжения, управляемом током, где потенциометр используется как переменный резистор обратной связи. Однако, используя TEE сборку для резистора обратной связи, как показано на рисунке 3, разработчик сможет эффективно использовать потенциометр с трехвыводным подключением.

## Цифровой интерфейс управления

Управление цифровыми потенциометрами осуществляется посредством программного обеспечения. В связи с тем, что такой тип контроля не подразумевает частый обмен данными, для цифровых потенциометров используется медленный последовательный интерфейс, типа I2C. Некоторые типы потенциометров имеют встроенную энергонезависимую память для сохранения последних установок при отключении питания.

## Применение

Цифровые потенциометры часто используются для создания цифровых элементов контроля громкости звука, аттенуаторов или других элементов цифрового управления. Обычно такие устройства отличаются достаточно высоким уровнем точности, что позволяет использовать их в профессиональном музыкальном оборудовании, звукорежиссерских пультах и других прецизионных системах.

## Обзор цифровых потенциометров Dallas Semiconductor

Как уже не раз отмечалось, компания Dallas Semiconductor производит широкий ассортимент цифровых потенциометров. Среди них есть DS1267, двоярный цифровой потенциометр, DS1666, потенциометр с аудио выходной характеристикой, DS1667, двоярный потенциометр со встроенным операционным усилителем, DS1668/DS1669, электронные реостаты Dallastats.

Поскольку все эти потенциометры имеют цифровое управление и возможность программирования, они предназначены, в первую очередь, для автоматической регулировки параметров. Применения, где традиционно для подстройки параметров использовались механические потенциометры, могут теперь быть модернизированы за счет цифрового управления. Применения, где использовались аттенуаторы с постоянным коэффициентом усиления, а также усилители с нелинейным усилением или дифференциальные усилители, теперь могут быть оснащены более точными, гибкими и скоростными решениями. Не следует забывать об автоматизированных производственных линиях, которые используют компоненты в стандартных индустриальных корпусах.

Сегодня, потенциометры Dallas Semiconductor используются для регулировки контраста и яркости ЖК дисплеев, для регулировки громкости и баланса, а также в сервоприводе. Такие устройства широко применяются в мультимедийных устройствах для обработки звука, громкости и баланса. Кроме того, они всё больше проникают

в область контроля параметров в промышленных сферах производства.

Потенциометры DS1267 и DS1667, которые могут быть легко запараллелены и управляться через один микроконтроллер или процессор, дают пользователю возможность управления сразу несколькими параметрами системы с помощью одной 3-проводной последовательной шины. Такой тип управления не доступен для традиционных механических потенциометров. Помимо возможности объединения двух независимых потенциометров в одном корпусе, как это сделано в DS1667, устройства имеют два независимых операционных усилителя, которые могут использоваться как с потенциометрами, так и автономно.

DS1666 - цифровой нелинейный резистор для аудио применений. Данный потенциометр также управляется через три вывода (кнопочный UP/DOWN). Положение среднего вывода контролируется при помощи входных сигналов CS (активный низкий), U/D (активный низкий) и INC (активный низкий). Цифровой аудио потенциометр DS1666 имеет специальную конструкцию, которая обеспечивает резистивную характеристику, более близкую к логарифмической, чем к линейной. В низком диапазоне регулируемого сопротивления потенциометр добавляет по 1% от полного сопротивления при 3%-ном смещении по шкале (усиление составляет 1:3). Это дает возможность более точного усиления слабых звуковых сигналов. Верхняя половина шкалы потенциометра прибавляет по 2% сопротивления на 1% регулировки, таким образом, обеспечивая более низкую разрешающую способность по усилению, которая необходима для усиления звуковых сигналов большой громкости (усиление 2:1).

Электронные реостаты Dallastats DS1668 и DS1669 представляют новое поколение потенциометров Dallas Semiconductor. На сегодняшний день, это единственные потенциометры с энергонезависимой памятью. DS1668 выпускается в промышленном 6-выводном корпусе, в схему которого встроена кнопка для управления положением движка. DS1669 представляет собой более интегрированную версию DS1668 и выпускается в корпусах DIP-8 и SOIC-8. DS1669 предоставляет возможность пользовательского управления положением движка через внешнюю (установленную пользователем) кнопку.

Устройство может управляться через однокнопочную или двукнопочную конфигурацию. Помимо кнопочного управления, DS1668 и DS1669 могут контролироваться посредством источника цифрового сигнала, такого, как цифровой процессор. Кнопочное и цифровое управление максимально приближают потенциометр к типу управления механическим устройством, являясь при этом монолитной микросхемой. Такой интерфейс доказал свои преимущества в приложениях для управления контрастом ЖК дисплеев и, в некоторых случаях, уровнем громкости.

Дальнейшие разработки Dallas Semiconductors направлены на объединение 3-проводного последовательного интерфейса, кнопочного интерфейса и энергонезависимой памяти. Оба интерфейса будут обеспечивать, с одной стороны, легкость в перемещении движка, а с другой стороны, точное его положение.

Далее приведены примеры применения цифровых потенциометров в различных областях техники: регулировка контраста, громкости, управление сервоприводом (рис. 4-7).

### Цифровые потенциометры как замена механическим

Цифровые потенциометры значительно превосходят механические по своей надежности. Цифровые устройства гарантируют 50,000 рабочих циклов, в то время как механические элементы традиционного потенциометра обеспечивают только несколько тысяч регулировок, а иногда и несколько сотен. Разрешение цифровых потенциометров может варьироваться

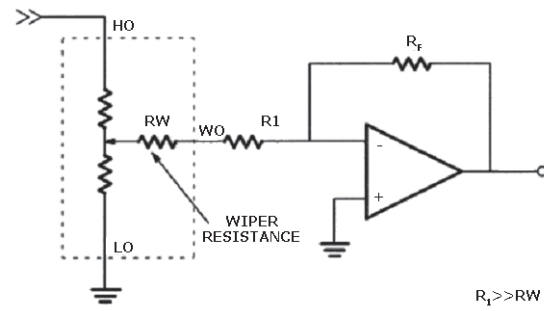


Рис. 4 Усилитель с постоянным коэффициентом усиления

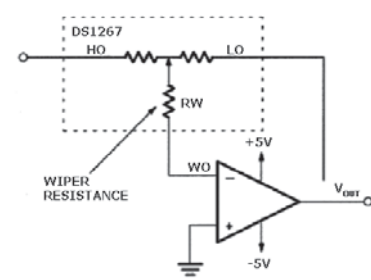


Рис. 5 Инвертированный нелинейный усилитель

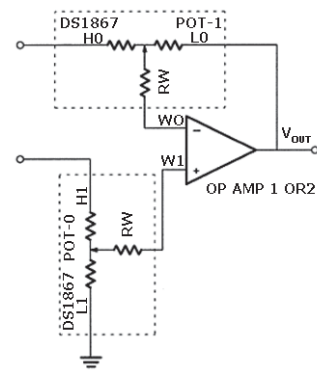


Рис. 6 Программируемый усилитель

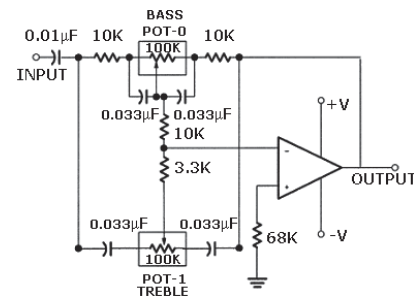


Рис. 7 Схема регулировки тембра

от 32 до 256 положений (5...8 бит) и более. Хорошее разрешение потенциометра критично, например, для регулировки контраста ЖК дисплеев, где динамический диапазон не является принципиальным моментом выбора компонента. Современные цифровые потенциометры с высоким разрешением позволяют достигать динамического диапазона до 90 дБ для некоторых аудио и Hi-Fi применений.

**Энергонезависимая память.** Для определенных условий применений требуется наличие энергонезависимой памяти цифрового потенциометра. Такие потенциометры наиболее близки по функциям своим механическим аналогам, поскольку они удерживают значение сопротивления вне зависимости от внешних условий, таких как, например, наличие питания в цепи.

Цифровые потенциометры с функцией энергонезависимой памяти широко используются в аудио оборудовании, поскольку сохраненные в памяти устройства параметры настройки устраняют необходимость проведения повторных установок резистора после выключения питания.

Цифровые потенциометры семейства MAX5427/MAX5428/MAX5429 предлагают уникальную опцию программирования. Каждое устройство имеет функцию однократного программирования (OTP, one-time program), которая устанавливает необходимое пользователю положение движка на уровне сброса по включению питания (POR). Положение движка всё еще может быть регулируемым, но оно всегда возвращается к запрограммированному положению при включении питания. В качестве альтернативы, однократно программируемая память позволяет пользователю отключить интерфейс и единожды зафиксировать движок в требуемом положении, предотвращая, таким образом, последующие нежелательные регулировки. В результате, устройство из потенциометра превращается в фиксированный делитель напряжения.

**Аудио применения.** По критерию зависимости изменения сопротивления от положением среднего контакта электронные потенциометры подразделяются на линейные и логарифмические. Последние часто используются для регулировки громкости в Hi-Fi аудио электронике, так как каждое положение движка в логарифмическом потенциометре приводит к линейному изменению громкости, а, как известно, человеческий слух имеет нелинейную функцию восприятия звука. Современные высоко интегрированные цифровые потенциометры могут объединять в одном корпусе до шести независимых потенциометров. Таким образом, интегрированные потенциометры могут управлять многоканальным аудио оборудованием, таким как стерео и Dolby системы.

При использовании в аудио приложениях потенциометров с

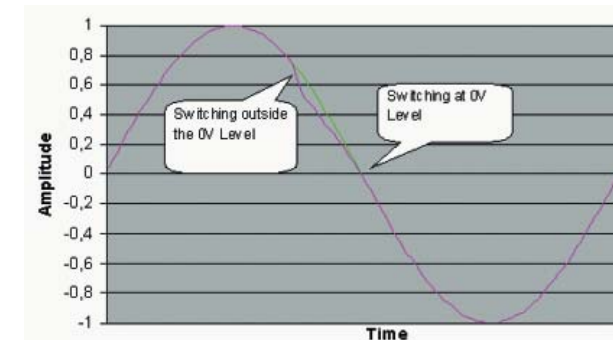


Рис. 8 Эффект включения на уровне 0 В на возникновение щелчков и треска

низкой разрешающей способностью, например, 32-позиционных, следует учитывать особенность переходов движка между инкрементами. При переходе через ноль могут возникнуть раздражающие щелчки и удары (рис. 8).

Тем не менее, цифровые потенциометры нового поколения имеют функцию детектирования переходов через ноль, что позволяет сократить аудио шум, создаваемый перемещением среднего контакта. Встроенные функции определения перехода через ноль и задержки по времени гарантируют изменение положения движка только после определения нулевого уровня или с задержкой 50 мс, в зависимости от того, что наступит раньше.

В дополнение к аналоговой природе потенциометра следует добавить, что каждый цифровой потенциометр имеет цифровой интерфейс. Большинство из них программируются через обычный последовательный интерфейс типа I2C или SPI, а некоторые имеют последовательный Up/Down интерфейс.

**Эффективность.** Цифровые потенциометры имеют еще одно преимущество перед их механическими аналогами. Потенциометры с цифровой регулировкой могут теперь монтироваться на плату непосредственно в тракт прохождения сигнала, устраняя, таким образом, необходимость в сложном и недешевом механическом соединении с элементами электронного контроля. Цифровые потенциометры имеют лучшие параметры подавления электрического шума и не имеют помех, наводящихся кабелем, который необходим для подключения к механическому потенциометру.

Обычные цифровые потенциометры не требуют глубоких знаний в применении, поскольку они предназначены для прямой замены традиционных механических устройств и имеют схожие с ними условия применения. Тем не менее, устройства, разработанные для узко-специальных применений (такие как, потенциометры для управления стерео звуком), требуют ознакомления с некоторыми их особенностями.

Узко-специальные устройства для аудио приложений часто имеют широкий диапазон напряжений для возможности их использования с различными типами аудио сигналов. Это часто логарифмические потенциометры, у которых число децибел на шаг увеличивается с движением среднего вывода, что более точно соответствует законам восприятия звуковых сигналов человеческим слухом. В некоторых случаях устройства имеют функцию подавления Mute, которая устанавливает движок в положение максимального ослабления (например, 30 дБ).

**Температурный коэффициент.** Одной из типичных характеристик любого потенциометра является его температурный коэффициент (TC), значение которого указывается в соответствии с рабочим диапазоном температур устройства. Для большинства потенциометров приводятся значения для двух типов температурных коэффициентов. Первый тип температурного коэффициента, абсолютный (коэффициент сквозного сопротивления), представлен большим значением, указывающим на абсолютное отклонение от сопротивления под воздействием температуры.

Он рассчитывается по формуле:

$$\Delta R = R_{UNCOMP} * TC * \Delta T / 10^6, \text{ где:}$$

$R_{UNCOMP}$  — некомпенсированное значение сопротивления

$TC$  — температурный коэффициент

$\Delta T$  — отклонение по температуре

Таким образом, цифровой потенциометр с номинальным сопротивлением, например, 20 кОм и абсолютным температурным коэффициентом 35 ppm будет иметь отклонение в 35 Ом (0.2%)

при температуре 50°C. Также, первоначальное значение 20 кОм указанного сквозного сопротивления может значительно варьироваться, например, в пределах от 15 до 25 кОм. В этом случае, изменение сопротивления для каждого из 32 положений среднего вывода составит от 480 до 780 Ом. Такие изменения, конечно, значительно выше, чем отклонение абсолютного температурного коэффициента.

Второй тип температурного коэффициента — метрический (коэффициент деления). Потенциометры часто используются в качестве делителей напряжения, особенно в приложениях, для которых абсолютное значение сопротивления менее критично, чем абсолютный температурный коэффициент и нестабильность шагового приращения. Потенциометры с температурным коэффициентом деления 5 ppm, например, идеальны для применения в приложениях, требующих использования делителей напряжения с низким температурным коэффициентом деления, типа УПКУ с низким дрейфом.

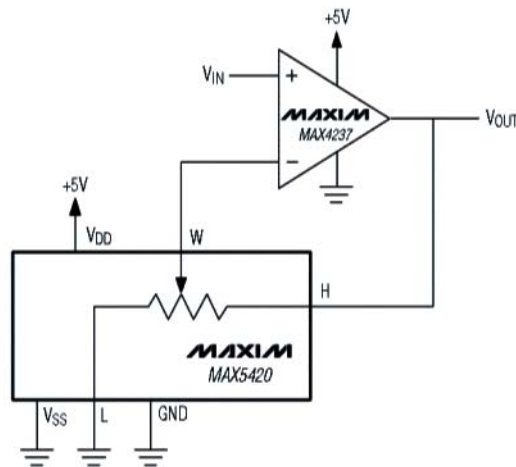
**Высокоточные потенциометры.** Цифровые потенциометры, используемые в усилителях с программируемым коэффициентом усиления (PGA) и инструментальных усилителях (IA), требуют более высокой точности, чем те, которые применяются в качестве стандартных средств регулировки (рис. 9).

Для таких применений требуется очень малая погрешность делителя, около 0.025%, в полном диапазоне температур, от -40 до 85°C.

**Выводы.** Таким образом, цифровые потенциометры имеют целый ряд преимуществ при сравнении с механическими устройствами. Помимо улучшенных параметров надежности, они требуют меньшего пространства платы при лучших рабочих параметрах. Секрет их высокой эффективности кроется в уменьшении паразитных помех и малой чувствительности к шумам. Цифровые потенциометры могут заменить механические практически в любых схемотехнических решениях, и предоставить разработчику, а затем и пользователю конечного устройства, ряд преимуществ.

### Что выбрать: цифровой потенциометр или ЦАП?

Традиционно, цифровые потенциометры воспринимаются разработчиками как замена привычным механическим переменным резисторам. Тем не менее, в связи с увеличением разрешающей



**Рис. 9** Операционный усилитель и цифровой потенциометр (нижняя микросхема на рисунке) выполняют функцию прецизионного усилителя с программируемым коэффициентом усиления.

способности потенциометров и интеграции дополнительных функций, цифровые потенциометры подчас могут заменить традиционные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Кроме того, стандартные корпуса ЦАПов имеют немалые габариты, а цена изделий не может конкурировать с цифровыми потенциометрами. Тем не менее, цена и размеры ЦАП также в последнее время стремятся к уменьшению, поэтому в некоторых применениях оба устройства могут быть использованы альтернативно.

Итак, разработчики, которым в работе требуется хорошо настроенный аналоговый выход, управляемый цифровым входом, имеют два выбора: цифровой потенциометр или цифро-аналоговый преобразователь. Оба устройства имеют цифровой входной сигнал для настройки аналогового выхода. Цифровые потенциометры позволяют регулировать аналоговое напряжение, в то время как ЦАПы регулируют ток, напряжение или эти оба параметра. Потенциометры имеют три вывода: высокий контакт, средний вывод (движок или аналоговый выход) и низкий контакт (1а на рис. 3).

Цифро-аналоговый преобразователь имеет сходную, но не идентичную конструкцию. В ЦАПх контакт высокого напряжения называется положительным, движок является выходом ЦАП, а контакт низкого напряжения подключен либо к земле, либо является отрицательным выводом (1b на рис. 3).

Цифровой потенциометр и ЦАП имеют несколько отличительных признаков. Самое принципиальное из них, наверно, заключается в том, что ЦАП обычно имеет интегрированный выходной усилитель или буфер, который отсутствует в конструкции потенциометра. Большинство цифровых потенциометров не может управлять низкоимпедансными нагрузками без внешнего буфера. В некоторых случаях выбор между ЦАП и потенциометром достаточно очевиден. Однако, встречаются случаи, когда применение обоих устройств не вызовет различий в эффективности.

### Основные характеристики ЦАП и его преимущества

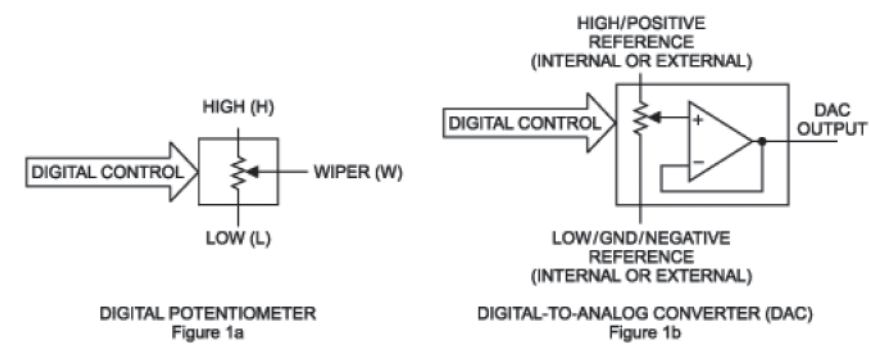
Цифроаналоговый преобразователь может иметь архитектуру с поразрядно взвешенными резисторами или многозвенную архитектуру лестничного типа (R-2R, ЦАП текущего управления).

Если ЦАП содержит цепочку резисторов, входы ЦАПа контролирует набор ключей, которые делят опорное напряжение между цепочкой согласованных резисторов. ЦАПы лестничного типа делят положительное опорное напряжение посредством переключения индивидуальных резисторов между источником положительного напряжения и отрицательным контактом этого источника (обычно землей). Таким образом, происходит преобразование тока. ЦАПы с токовым выходом либо напрямую подают на выход ток, либо используют усилитель для буферизации выхода.

Выбор цифроаналогового преобразователя осуществляется на основе сбалансированного набора его рабочих параметров: последовательный или параллельный интерфейс, разрешение и число битов, число входных каналов, выход по току или напряжению, цена, относительная точность.

ЦАПы могут иметь как параллельный, так и последовательный интерфейс. Последовательный интерфейс отправляет блоки данных последовательно, один за другим, по одной входной или выходной линии. Параллельный интерфейс позволяет передавать весь объем информации одновременно и требует отдельных контактов для каждого бита. Типы последовательного интерфейса обычно подразделяют на 2 категории: 3-проводной (SPI, QSPI, MICROWIRE) и 2-проводной (I2C). Некоторые трехпроводные интерфейсы, которые включают цифровую выходную линию, называют 4-проводными интерфейсами.

Для применений, требующих высокой скорости передачи данных, предпочтительней использовать параллельный интерфейс. Там, где важны габариты и конечная стоимость изделия, лучшим выбором будут 3- и 2-проводные последовательные интерфейсы,



**Рис. 3** ЦАП обычно включает выходной буфер, которого не имеет цифровой потенциометр.

т.к. они требуют меньшего числа контактов и имеют более низкую стоимость. Некоторые 3-проводные интерфейсы работают на частотах до 26 МГц, в то время как 2-проводные интерфейсы в настоящий момент поддерживают только 3.4 МГц. В разработках, где ЦАПы будут соединены последовательно, лучше использовать 3-проводной последовательный интерфейс. Оба 3- и 2-проводной интерфейсы могут считывать только что полученные данные. Следует отметить, что способность считывать данные сама по себе является преимуществом цифроаналоговых преобразователей перед цифровыми потенциометрами.

Другое преимущество ЦАПов — это их разрешающая способность. ЦАПы с высоким разрешением имеют 16- или 18-битные входы с разрешающей способностью вплоть до мВ. 18-битный ЦАП, например, с источником опорного напряжения 2.5 В имеет самый младший значащий бит 9.54 мкВ. Такая высокая разрешающая способность очень важна для промышленных устройств, таких, как робототехника и привода. Для сравнения, самое высокое разрешение цифровых потенциометров на сегодняшний день составляет 10-бит или 1024 положений.

Сегодня ЦАПы выпускаются с различными интегрированными преобразователями данных. Например, MAX5733 имеет 32 выхода с 16-битным разрешением каждого. Цифровые потенциометры, для сравнения, имеют не более 6 выходных каналов. DS3930, DS1806 и MAX5406 - вот несколько устройств с шестью независимыми потенциометрами, интегрированными в одном корпусе.

ЦАПы управляют выходами по току или напряжению посредством набора лестничных или согласованных резисторов, выходных усилителей и MOSFET транзисторов. Самое значительное отличие между большинством ЦАПов и цифровыми потенциометрами — это выходной усилитель цифроаналогового преобразователя. Он позволяет ЦАПам управлять низкоомными нагрузками. Однако, уже сегодня производится несколько моделей потенциометров,

конструкция которых также включает выходные усилители.

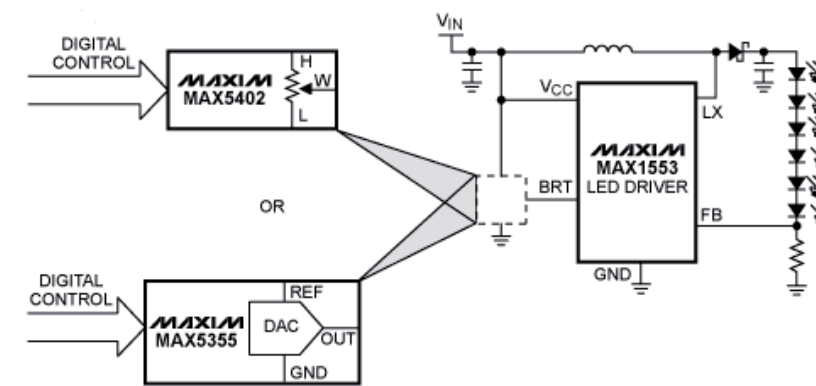
Дополнительные возможности для разработчиков открывает использование n- или p-канальных транзисторов в корпусе устройства, которые обеспечивают выходной втекающий или вытекающий ток. Так, 10-битный выход MAX5550 внутренне соединен с усилителем, p-канальным MOSFET транзистором, нагрузочным резистором для обеспечения вытекающего выходного тока до 30 мА. И наоборот, 10-битный MAX5547 интегрирует усилитель, n-канальный MOSFET транзистор и понижающий резистор для обеспечения втекающего выходного тока до 3.6 мА.

Кроме выходов по току, некоторые ЦАПы имеют усилитель, один из выводов которого выведен на внешний вывод микросхемы для предоставления дополнительных возможностей контроля. Такая группа цифроаналоговых преобразователей получила название force/sense ЦАПы.

В связи с тем, что ЦАПы часто имеют в своей конструкции усилитель, их стоимость немного выше стоимости цифрового потенциометра. Тем не менее, производители ЦАПов продолжают вести разработки в области уменьшения габаритных размеров и снижения себестоимости их производства.

### Основные характеристики цифровых потенциометров и их преимущества

Итак, цифровые потенциометры регулируют выходное сопротивление с помощью цифрового входа. Трехконтактный цифровой потенциометр, показанный на рис. 3 (1а), в сущности, является регулируемым резистивным делителем с фиксированным конечным сопротивлением. Цифровые потенциометры также выпускаются в виде двухконтактных переменных резисторов, где движок подсоединен к высокому или низкому контакту. В отличие от цифроаналоговых преобразователей, цифровые потенциометры



**Рис. 10** Уровень напряжение на выводе BRT MAX1553 устанавливается с помощью цифрового потенциометра или ЦАП для точной настройки тока светодиода, протекающего через цифровой вход.

могут работать с высоким контактом для высокого напряжения и с низким контактом для низкого напряжения, или наоборот.

Выбор цифрового потенциометра также основан на оценке нескольких ключевых параметров: линейная или логарифмическая зависимость сопротивления от положения движка, разрешение и количество положений, наличие энергонезависимой встроенной памяти, цена, интерфейс (Up/Down, SPI, I2C).

Линейные потенциометры более распространены, нежели логарифмические. Все резисторы, интегрированные в корпусе линейного потенциометра, имеют одинаковый номинал, поэтому изменение сопротивления при перемещении движка от низкого к высокому уровню происходит по линейной зависимости. Логарифмические потенциометры, в первую очередь, были разработаны для работы с различными типами аудио сигналов. С перемещением движка увеличивается шаг приращения усиления, что более точно соответствует законам восприятия звука человеческим слухом.

Связь с потенциометром осуществляется через несколько типов интерфейсов: I2C и SPI, 2-проводной Up/Down интерфейс, 3-проводной интерфейс или кнопочный Up/Down интерфейс. MAX5456 логарифмический потенциометр с 32 битным разрешением имеет разновидность 2-проводного кнопочного интерфейса, который позволяет независимо регулировать громкость и баланс. MAX5456 имеет 4-проводный интерфейс с отдельными входами кнопок увеличения или уменьшения громкости и изменения баланса.

### Приложения, затрудняющие выбор компонента

Многие приложения требуют использования ЦАП. Двигатели с высоким разрешением, сенсорное оборудование, робототехника обычно требуют высокого разрешения ЦАП. Высокоскоростные применения, такие как базовые станции и контрольно-измерительное оборудование, не могут обойтись без скорости, высокого разрешения и параллельного интерфейса цифроаналогового преобразователя.

Одно из применений, где удобней использовать цифровой потенциометр — это усилитель со схемой обратной связи. Это можно объяснить линейностью потенциометра. Логарифмические потенциометры наиболее пригодны для аттенюации аудио сигналов.

Тем не менее, разграничительная линия между потенциометром а ЦАП всё больше и больше размывается. На рисунке 10 показан пример, где драйвер светодиода MAX1553 может регулировать

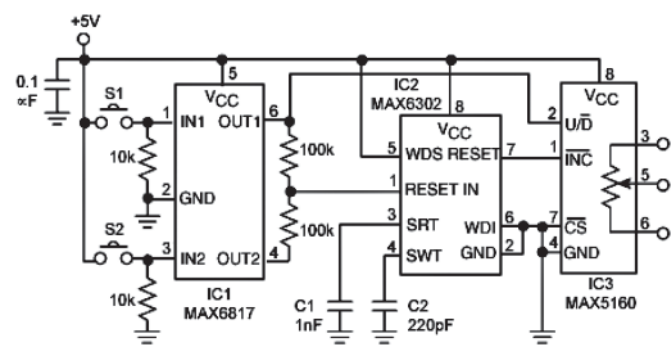


Рис.11 Схема ручного контроля цифрового потенциометра с использованием двух кнопок без микроконтроллера.

его яркость как с помощью потенциометра, так и с помощью цифроаналогового преобразователя. В этом случае, постоянное напряжение на входе BRT MAX1553 и значение резистора между выводами FB и GND определяют уровень тока светодиода.

### Ручное управление цифровым потенциометром без микропроцессора

Управление цифровым потенциометром может осуществляться без помощи микроконтроллера. Перемещение движка вверх/вниз может выполняться с помощью простой кнопочной схемы. Такое решение идеально для приложений, где стоимость конечной разработки является критичным моментом, а также там, где требуется ручное управление для выбора требуемого уровня параметра.

Цифровые потенциометры типа MAX5160 и MAX5161 могут служить хорошей заменой их механическим аналогам. Но есть одно "но": они были разработаны для управления через микроконтроллер. Однако на следующей схеме показан пример применения тех же цифровых потенциометров, но уже для ручного управления, где положение движка управляется только двумя кнопками (рис. 11).

Для сглаживания эффекта пошагового перехода в механических переключателях S1 и S2 используется двоянный ключ с противодребезговой защитой (IC1). Сигнал синхронизации к цифровому потенциометру поступает от супервизора IC2, управляемого микроконтроллером. Первоначально, выводы OUT1, OUT2, и RESET находятся в высоком состоянии. Если нажать и отпустить кнопку S2, выход OUT2 переведет вход RESET микросхемы IC2 в низкое состояние. При отпускании кнопки S2, контакты OUT2 и RESET вернуться в высокое состояние. 5-битный резистивный делитель, т.е. потенциометр IC3 (аналог 5-битного цифроаналогового преобразователя), осуществляет контроль положения среднего контакта. Таким образом, единичный цикл осцилляции понижает сопротивление среднего контакта на 1/32 от полного диапазона номинального сопротивления потенциометра.

Микросхема супервизора IC2 продолжает генерировать импульсы, если кнопка S2 нажата и удерживается. В результате этого, сопротивление уменьшится сразу на несколько шагов (рисунк 12). Аналогично, нажатие на кнопку S1 приведет к увеличению сопротивления потенциометра. Конденсаторы C1 and C2 устанавливают частоту осцилляции на уровне около 3 Гц.

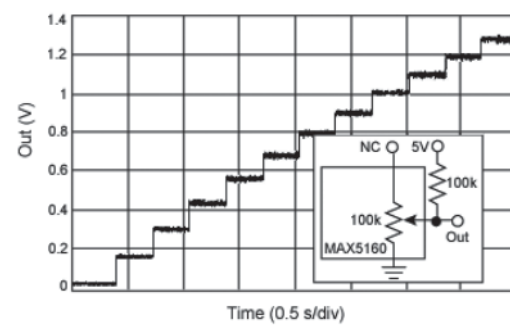


Рис. 12 Ступенчатое изменение сопротивления посредством добавления внешнего резистора к движку для реализации функции делителя напряжения.

## Потенциометры для аудио применений

### Создание нелинейной выходной характеристики с помощью линейного потенциометра

Для формирования специального динамического диапазона некоторые устройства используют в своих схемах компоненты с нелинейной выходной функцией. В круг специальных задач может входить как линеаризация сигналов компонентов цепи, так и формирование логарифмического выхода для контроля громкости.

Самое простое решение создания нелинейной выходной функции - это использование цифрового потенциометра в конфигурации простого делителя напряжения. В ниже приведенных примерах использовалась 50 кОм версия цифрового потенциометра MAX5130. В расчетах не учитывалась погрешность сквозного сопротивления устройства ( $\pm 25\%$ ), но данный параметр можно легко добавить самостоятельно.

Схема простого делителя напряжения показана на рисунках 13, 14 и 15. Для всех приведенных примеров подразумевается, что используется низкоомный источник напряжения ( $V_{in}$ ), а выход  $V_{out}$  находится в высокоимпедансном состоянии. На рисунке 13 показан простой делитель напряжения с разрешением  $V_{out} = V_{in}(R_b/R_{pot})$ , где  $R_{pot}=R_a+R_b$ , а  $R_a$  и  $R_b$  обозначают сопротивления от  $V_{in}$  до движка и от движка до земли, соответственно. Перемещая движок в сторону увеличения сопротивления при постоянном источнике напряжения 5 В, мы получаем линейную выходную функцию, которая показана на графике (рис.13) и в таблице.

Сопр.	Вых. напр.
0	0
1612.903	0.16129
3225.806	0.322581
4838.71	0.483871
6451.613	0.645161
8064.516	0.806452
9677.419	0.967742
11290.32	1.129032
12903.23	1.290323
14516.13	1.451613
16129.03	1.612903
17741.94	1.774194
19354.84	1.935484
20967.74	2.096774
22580.65	2.258065
24193.55	2.419355
25806.45	2.580645
27419.35	2.741935
29032.26	2.903226
30645.16	3.064516
32258.06	3.225806
33870.97	3.387097
35483.87	3.548387
37096.77	3.709677
38709.68	3.870968
40322.58	4.032258
41935.48	4.193548
43548.39	4.354839
45161.29	4.516129
46774.19	4.677419
48387.1	4.83871
50000	5

Добавив последовательный резистор в схему (R1 на рисунке 14), мы получим совсем иной результат. Зависимость выходного сопротивления от положения движка теперь будет больше

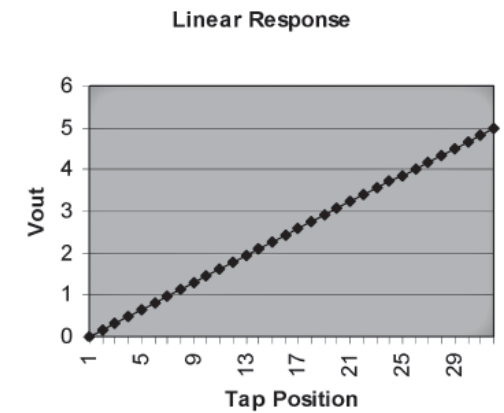
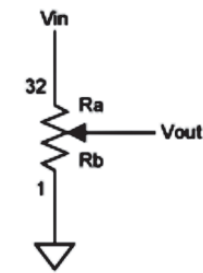


Рис. 13 Схема линейной выходной функции потенциометра

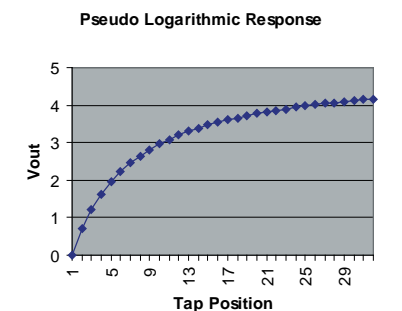
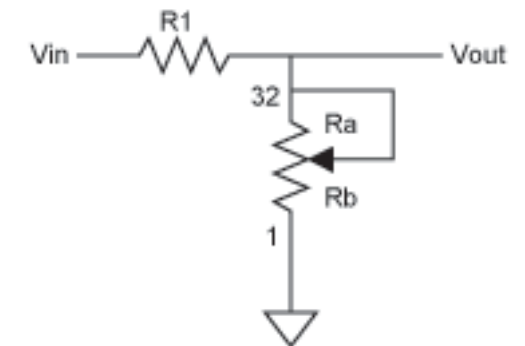


Рис. 14 График «псевдо-логарифмической» функции

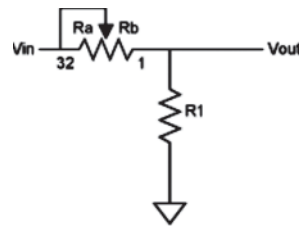
напоминать логарифмическую кривую, которую можно выразить уравнением:

$$V_{out} = V_{in}(R_b / (R_1 + R_b))$$

Посредством изменения номинального значения резистора R1 (в данном случае оно составляет 10 кОм), можно создать индивидуальную «псевдо-логарифмическую» функцию, необходимую для решения конкретной пользовательской задачи. На рисунке 14 показан график подобной «псевдо-логарифмической» функции.

Сопр.	Вых. напр.
0	0
1612.903	0.694444
3225.806	1.219512
4838.71	1.630435
6451.613	1.960784
8064.516	2.232143
9677.419	2.459016
11290.32	2.651515
12903.23	2.816901
14516.13	2.960526
16129.03	3.08642
17741.94	3.197674
19354.84	3.296703
20967.74	3.385417
22580.65	3.465347
24193.55	3.537736
25806.45	3.603604
27419.35	3.663793
29032.26	3.719008
30645.16	3.769841
32258.06	3.816794
33870.97	3.860294
35483.87	3.900709
37096.77	3.938356
38709.68	3.97351
40322.58	4.00641
41935.48	4.037267
43548.39	4.066265
45161.29	4.093567
46774.19	4.119318
48387.1	4.143646
50000	4.166667

Сопр.	Вых. напр.
0	5
1612.903	4.305556
3225.806	3.780488
4838.71	3.369565
6451.613	3.039216
8064.516	2.767857
9677.419	2.540984
11290.32	2.348485
12903.23	2.183099
14516.13	2.039474
16129.03	1.91358
17741.94	1.802326
19354.84	1.703297
20967.74	1.614583
22580.65	1.534653
24193.55	1.462264
25806.45	1.396396
27419.35	1.336207
29032.26	1.280992
30645.16	1.230159
32258.06	1.183206
33870.97	1.139706
35483.87	1.099291
37096.77	1.061644
38709.68	1.02649
40322.58	0.99359
41935.48	0.962733
43548.39	0.933735
45161.29	0.906433
46774.19	0.880682
48387.1	0.856354
50000	0.833333



Pseudo Inverse Log Response

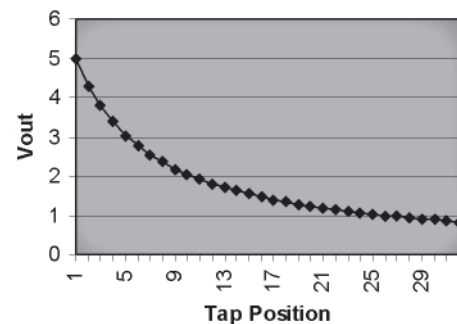


Рис. 15 График обратной «псевдо-логарифмической» функции

Также как и в предыдущем примере, выбор номинала резистора R1 непосредственно влияет на выходной динамический диапазон потенциометра.

Для несложных схемотехнических решений, таких, как приведенные выше, можно использовать указанные графики, изменив их в соответствии с практическими задачами пользовательского устройства.

Для построения собственного графика используйте формы,

приведенные на страницах сайта компании-производителя:

<http://www.maxim-ic.com/images/appnotes/838/A273LinearResponse.zip>

<http://www.maxim-ic.com/images/appnotes/838/A273LogResponse.zip>

<http://www.maxim-ic.com/images/appnotes/838/A273InvLogResponse.zip>

Для этого введите в форму значение напряжение питания в ячейку A3, значение сопротивления R1 в ячейку B3, номинальное значение сопротивления потенциометра в ячейку C3, разрешение потенциометра в ячейку D3. Затем скопируйте формулы ряда 34 в колонки E, F, G и H и протяните их на количество строк, соответствующих значению разрешения потенциометра. Переместите график в удобное для вас положение на странице и кликните на графике. В появившемся меню откройте закладку «источник данных», выделите с помощью мыши диапазон новых заполненных ячеек и нажмите ОК.

Примеры, приведенные в данном обзоре, являются достаточно общими, и не рассматривают такие параметры, как сопротивление движка, погрешность нуля и полной шкалы, погрешность конечного сопротивления потенциометра, температурный коэффициент и др. Однако, перечисленные параметры могут быть добавлены пользователем в графики самостоятельно.

### Создание логарифмической шкалы с линейным потенциометром

Цифровые потенциометры широко используются для управления громкостью в аудио оборудовании. При регулировке громкости закономерность изменений в громкости звука должна соответствовать законам человеческого восприятия, т.е. иметь логарифмическую зависимость. В некоторых случаях можно использовать простые недорогие линейные потенциометры вместо более дорогих логарифмических.

Благодаря своей надежности, малогабаритности и простоте в использовании, цифровые потенциометры всё чаще заменяют свои механические аналоги, особенно в сфере аудио регулировок. Несмотря на предпочтение, оказываемое логарифмическим потенциометрам в аудио устройствах, линейные потенциометры с высокой разрешающей способностью не уступают им по возможностям и эффективности.

На рисунке 16 показан пример использования линейного потенциометра в функции логарифмического (MAX5477, MAX5478, MAX5479).

Прибегнув к математическим расчетам и учитывая принципиальную схему строения линейного потенциометра, можно создать логарифмическую зависимость движка даже у линейного потенциометра. Так как потенциометр, по существу, является

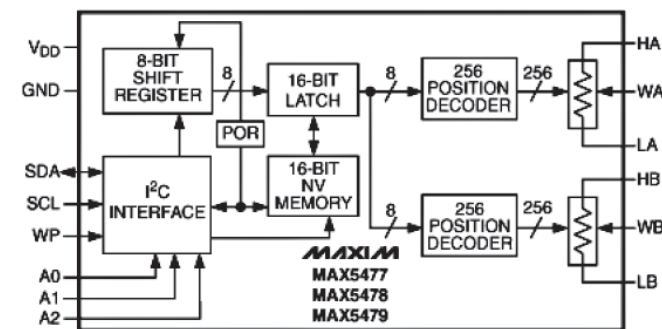


Рис. 16 Семейство цифровых потенциометров имеет стандартное подключение, где используются все контакты потенциометра: верхний, нижний и вывод движка.

делителем напряжения, его выходное напряжение (Vout) может быть выражено через значение напряжения на входе Vin, если Vin подается на RH:

$$V_{out} = V_{in}(R_{w-L} / R_{H-L}),$$

где  $R_{w-L}$  — сопротивление между контактом движка и низким контактом потенциометра,  $R_{H-L}$  — конечное сопротивление потенциометра.

Аттенуация сигнала в децибелах можно определить по следующей формуле:

$$\text{Усиление (дБ)} = 20 * \log(V_{out} / V_{in})$$

Подставляя значение Vout из формулы 1 в формулу 2, получаем следующее равенство:

$$\text{Усиление (дБ)} = 20 * \log[V_{in}(R_{w-L} / R_{H-L}) / V_{in}] = 20 * \log(R_{w-L} / R_{H-L})$$

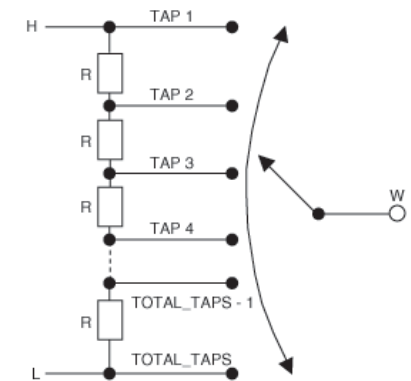


Рис. 17 Положения линейного движка разделяют одинаковые резисторы во всем рабочем диапазоне сопротивлений.

Положение движка ( $R_{w-L}$ ) может быть выражено как:

$$R_{w-L} = (\text{Total\_Taps} - x) * R,$$

где  $x = 1, 2, 3...$  количество шагов.

Так как первое положение движка (минимальное усиление) не имеет значения сопротивления на полной шкале, полное сопротивление может быть выражение как

$$R_{H-L} = (\text{Разрешение} - 1) * R.$$

Теперь, уравнение усиления принимает следующий вид:

$$\text{Усиление (дБ)} = 20 * \log[(\text{Разрешение} - x) / (\text{Разрешение} - 1)],$$

где  $x$  не равен разрешению.

Если  $x =$  разрешающая способность потенциометра, усиление приближается к бесконечности.

Преобразование линейного цифрового потенциометра в логарифмический особенно эффективно при высокой

разрешающей способности потенциометра (128 шагов и более), т.к. логарифмическая разрешающая способность 128-битных потенциометров достаточно ограничена. Также, особенности топологии платы (электростатическая защита, нелинейное сопротивление проходного транзистора в качестве ключа) могут вызвать неточности в крайних положениях движка.

Далее приводится код программы, которая рассчитывает значение усиления в зависимости от положения среднего контакта потенциометра (рис. 18), и наоборот (рис. 19).

```

//-----
// _int16 DB_to_Tap(double dB, _int16 TotalTaps);
// input: dB -- double, db should be less than or equal to 0
// TotalTaps -- _int16, TotalTaps should be bigger than 0
// output: Function will returns the Tap number as _int16
_int16 DB_to_Tap(double dB, _int16 TotalTaps)
{
    _int16 Closest_Tap;
    double Raw_Value;

    if(dB > 0) // Check the input
    {
        Closest_Tap = 1;
    }
    else
    {
        // Convert to the closest Tap number
        Raw_Value = TotalTaps - (pow(10, (dB/20)) * (TotalTaps - 1));
        Closest_Tap = (_int16)(Raw_Value + 0.5);
    }

    return(Closest_Tap);
}
//-----

```

Рис. 18 Код программы для определения положения движка по требуемому уровню усиления.

```

//-----
// double Tap_to_DB(_int16 Tap, _int16 TotalTaps);
// input: Tap -- _int16, Tap should be greater then 0 and less than TotalTaps.
// If Tap equal to TotalTaps, the result should be negative infinity
// TotalTaps -- _int16, TotalTaps should be bigger than 0
// output: Function will returns the dB value as double
double Tap_to_DB(_int16 Tap, _int16 TotalTaps)
{
    _int16 tmp_a;
    double dB_Value, tmp_b;

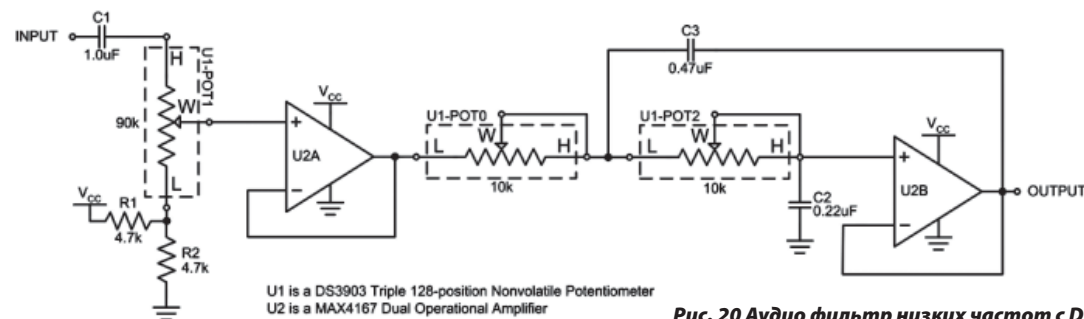
    // Check input value
    tmp_a = Tap;
    if(Tap >= TotalTaps) tmp_a = TotalTaps - 1;
    if(Tap < 1) tmp_a = 1;

    // Convert to dB value
    tmp_b = (double)(TotalTaps - tmp_a);
    tmp_b = tmp_b / (TotalTaps - 1);
    dB_Value = 20 * log10(tmp_b);

    return(dB_Value);
}
//-----

```

Рис. 19 Код программы для определения усиления по положению движка.



U1 is a DS3903 Triple 128-position Nonvolatile Potentiometer  
U2 is a MAX4167 Dual Operational Amplifier

Рис. 20 Аудио фильтр низких частот с DS3903.

## Управление цифровым потенциометром фильтром НЧ

Цифровые потенциометры — достаточно гибкие устройства, которые могут применяться в самом широком спектре устройств, в том числе, и для создания низкочастотного фильтра с регулируемой полосой пропускания.

**Простой НЧ фильтр.** На рисунке 20 показан аудио НЧ фильтр, построенный с помощью DS3903. Схема питается от одиночного источника 2.7...5.5 В и имеет каскад предварительного усиления с максимальной амплитудной нагрузкой 5 В (1.77 V<sub>RMS</sub>) от источника питания 5 В. Для создания низкочастотного фильтра с двумя полюсами (12 дБ приращения) на одной частоте, номинал конденсатора С3 должен в два раза превышать номинал С2. Потенциометры POT0 и POT2 запрограммированы на одинаковые значения. Пороговая частота при такой конфигурации составит:

$$f_c = \frac{1.414}{6.28R_{POT}C_3}$$

где R<sub>POT</sub> — значение сопротивления, соответствующее цифровому значению, запрограммированному в POT0 и POT2.

Входной каскад схемы (С1, U1-POT1, U2A, R1, и R2) отвечает за контроль громкости. Также, он необходим для смещения DC напряжения аудио сигнала на уровень V<sub>CC</sub>/2 для того, чтобы сигналы прошли через цифровой потенциометр и операционные усилители без изменения формы импульсов. Такая топология позволяет схеме работать с любым значением V<sub>CC</sub> между 2.7 и 5.5 В, так как схема не может превысить выходное напряжение над напряжением питания. DC уровень выхода останется на уровне V<sub>CC</sub>/2 до тех пор, пока входное напряжение не вышло за пределы напряжения питания.

В приложениях, которые уже имеют схему ограничения напряжения питания, входной каскад может быть удален и использовано прямое подключение к фильтру. Если входная цепь удалена, выходной сигнал будет равняться входному сигналу, отфильтрованному через 2-полярный фильтр с пороговой частотой (f<sub>c</sub>), включающей постоянную составляющую входного сигнала.

Посредством изменения номинального значения конденсатора или выбора цифрового потенциометра с другим полным сопротивлением можно добиться пороговой частоты до 500 кГц.

Модель резистора для расчета R<sub>POT</sub> показана на рисунке 21.

Для определенных положений движка ключ будет находиться в закрытом состоянии, а для других положений он будет разомкнут. Каждое изменение положения движка в сторону увеличения может расцениваться как увеличение сопротивления на 1 LSB (10 кОм/125=78 Ом для DS3903), за исключением максимального положения, где параллельная комбинация сопротивлений потенциометра и движка может вызвать некоторую нелинейность.

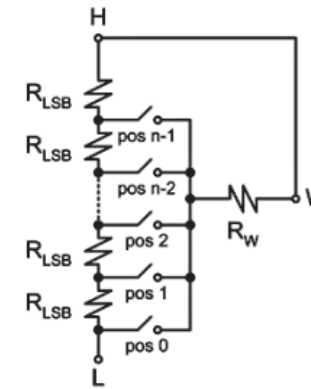


Рис. 21 Принципиальная схема цифрового потенциометра.

Формула для расчета R<sub>POT</sub>:

$$R_{POT} = \frac{R_W R_{LSB} (a - n)}{R_W + R_{LSB} (a - n)} + n R_{LSB}$$

где: R<sub>LSB</sub> - эквивалентное полное сопротивление, приводимое в документации, разделенное на количество шагов потенциометра (a).

R<sub>W</sub> - сопротивление движка, указанное в документации изделия.

n - программируемые положения потенциометра.

a - количество шагов цифрового потенциометра.

Зависимость значения сопротивления R<sub>POT</sub> для DS3903 с номинальным значением 10 кОм показана на рисунке 22. График подразумевает, что конечное сопротивление составляет ровно 10 кОм и импеданс движка не превышает 500 Ом. Оба эти параметра подвержены значительным изменениям, но отклонения, в первую очередь, влияют на минимальную и максимальную пороговую частоту. Действительное значение пороговой частоты может быть настроено в любой точке диапазона от минимального до максимального значений. Поэтому выберите номинал конденсатора, который устанавливает требуемую пороговую частоту по центру настраиваемого схемой диапазона.

Работа цепи, представленной на рисунке 20, была протестирована с помощью аудио тестера. На рисунках 23-25 показаны результаты тестов эффективности усиления и THD+N.

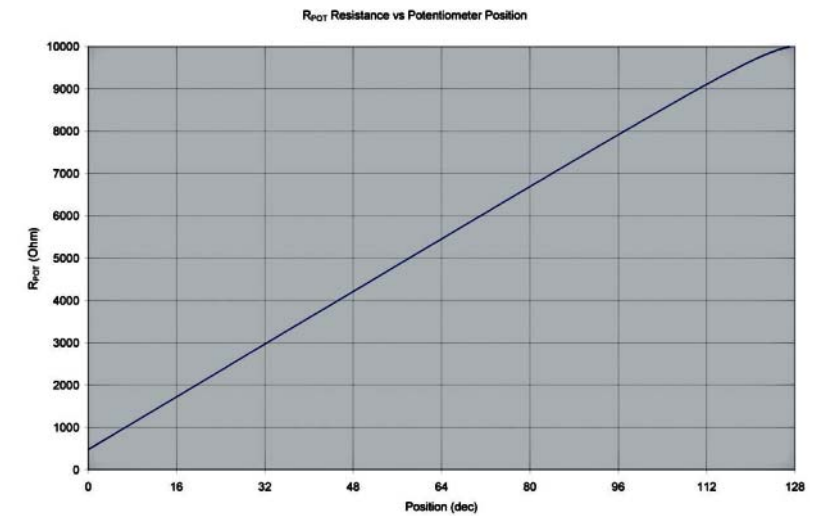


Рис. 22

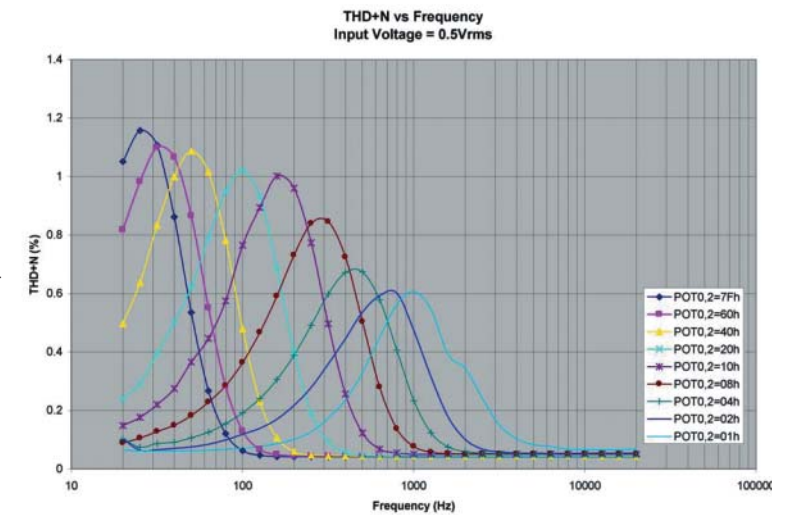


Рис. 23

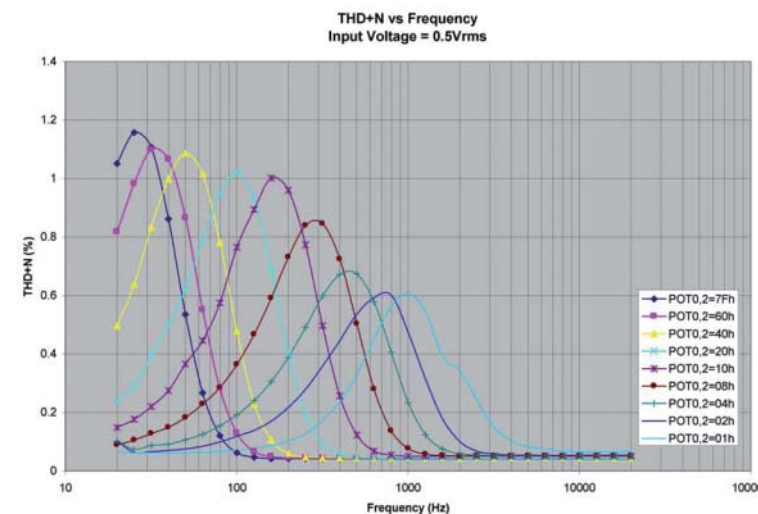


Рис. 24

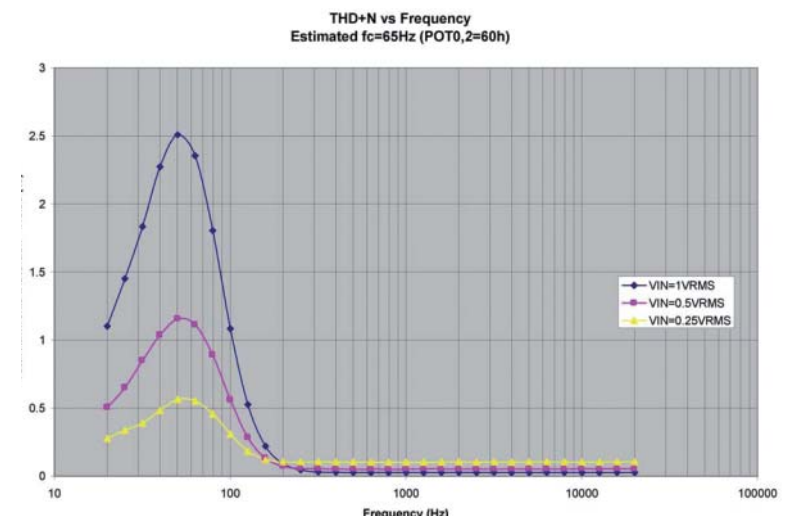


Рис. 25

выборе цифрового потенциометра в качестве фильтра низких частот следует рассмотреть несколько вопросов. Возможно, самое большое ограничение, которое накладывает использование цифрового потенциометра, связано с тем, что напряжение на выводах потенциометра должно быть в диапазоне  $V_{CC}$  - земля, чтобы диоды с ESD защитой не искажали аудио сигналы. Потенциометр DS3903 имеет защиту от ESD, при этом устройство позволяет поддерживать входное напряжение в диапазоне 6 В... земля, если напряжение питания находится в пределах нормы (2.7...5.5 В). Это дает некоторую свободу для разработки схем, где входные сигналы могут превышать уровень  $V_{CC}$ . Однако, в схеме на рис. 25 можно попробовать поработать с 6 В ампл. сигналом, т.к. операционный усилитель в любом случае отрежет сигнал, пока его питание не достигнет уровня 6 В. Способность потенциометра DS3903 выдерживать большие сигналы может быть использована в том случае, если операционные усилители запитать от источника большего напряжения.

Выбор типа потенциометра (линейного или логарифмического) повлияет на характер регулировки пороговой частоты: линейный или логарифмический, соответственно. Для фильтра аудио диапазона, который представлен на рисунке 20, желательно использовать потенциометр с линейной зависимостью, т.к. это расширит диапазон возможной частоты среза фильтра от 40 до 800 Гц.

От разрешающей способности выбранного типа потенциометра (например, 128 или 256 шагов) будет зависеть насколько точно можно настроить частоту среза. Чем выше разрешение потенциометра, тем точнее настройка частоты. Как правило, вероятность того, что в аудио приложении может потребоваться потенциометр с разрешением более 64 или 128 положений, не велика. Желательно использовать потенциометр с высокой разрешающей способностью для устройств, где полоса пропускания фильтра регулируется в широком диапазоне частот.

Некоторые цифровые потенциометры имеют встроенную энергонезависимую память, которая позволяет сохранять положение среднего контакта после отключения и включения питания. Такую опцию можно использовать для калибровки положения фильтра и не регулировать его при последующих включениях питания. Потенциометры без энергонезависимой памяти запускаются с предварительно установленного положения, т.е. требуют повторных регулировок.

Цифровые потенциометры имеют большую погрешность конечного сопротивления и сопротивления движка. В идеале, для схемы 20, где два потенциометра (POT0 и POT2) должны иметь одинаковые значения, они должны располагаться на одном кристалле. Несмотря на то, что точные значения потенциометров всё еще будут расходиться (обычно погрешность составляет  $\pm 20\%$  от полного сопротивления), их относительные значения будут совпадать.

Кроме того, цифровые потенциометры содержат некоторую внутреннюю паразитную емкость, которая будет ограничивать максимальную рекомендуемую частоту среза фильтра. Не рекомендуется использовать 10 кОм потенциометры с частотой среза более 500 кГц, потенциометры 50 кОм — с частотой более 100 кГц, и потенциометры 100 кОм — с частотой более 50 кГц. Для аудио приложений существующая полоса пропускания вполне достаточна, но для широкополосных устройств об этом не следует забывать.

**Выбор операционного усилителя.** Основные требования к выбору операционного усилителя для данной схемы касаются параметра минимального стабильного усиления и амплитуды входного и выходного напряжения. И входной каскад схемы, который получает сигнал и усиливает постоянную составляющую до  $V_{CC}/2$ , и сам фильтр представляют собой усилительный каскад с единичным усилением. Таким образом, для правильной работы необходимо использовать усилитель с коэффициентом усиления,

равным единице. Кроме того, желательно использовать усилитель с rail-to-rail входами и выходами для того, чтобы входной сигнал оставался как можно выше из-за низкого питающего напряжения схемы.

**Выводы.** Итак, как было показано выше, цифровой потенциометр может быть использован для построения низкочастотного фильтра с цифровым интерфейсом управления. Такой двуполярный фильтр имеет хорошие рабочие характеристики в аудио устройствах. Для построения специальных фильтров могут быть использованы конденсаторы и потенциометры различных номиналов для создания частотного среза до 500 кГц.

## Управление громкостью с помощью цифровых потенциометров

По сравнению с громоздкими механическими устройствами, цифровые потенциометры предоставляют значительные преимущества в области звукового контроля, особенно там, где речь идет о портативной электронике, MP3 плеерах, мобильных телефонах, стерео AM/FM радио.

Многие современные портативные устройства предлагают пользователям в качестве дополнительной функции стерео аудио приемник, например, для воспроизведения MP3 файлов или прослушивания радио on-line через интернет.

Для таких схем сегодня применяются множество специализированных микросхем, тем не менее, для здесь могут быть так же эффективно применены стандартные компоненты с малой мощностью потребления.

Исторически сложилось, что для контроля громкости звучания применяют специальные потенциометры с логарифмической зависимостью. Нелинейность выходной характеристики таких устройств отвечает особенностям человеческого восприятия звуковых сигналов.

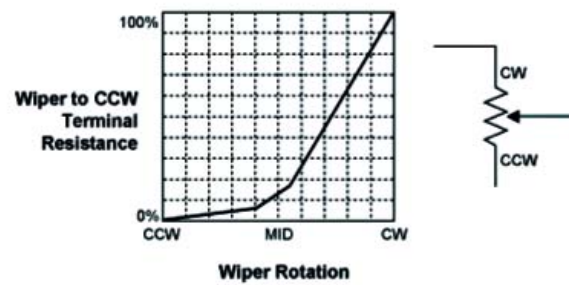


Рис. 26

Как правило, в центральном положении среднего контакта логарифмические потенциометры давали 20 дБ приращения, затем аттенюация значительно увеличивалась при вращении движка от средней точки против часовой стрелки и уменьшалась при вращении по часовой стрелке (в сторону усиления громкости).

Несмотря на ряд преимуществ, было несколько причин, мешающих использованию потенциометров в портативной электронике, в числе которых можно назвать ограничение по площади, занимаемому устройством на плате, а также вопросы надежности. В то же время, сочетание кнопок и какого-либо головного процессора стало широко распространенной практикой для управления громкостью. Такое решение было недорогим и очень удобным в схемотехническом отношении.

Поворотные стерео потенциометры также имеют проблемы с механическим конструктивом, погрешность регулировки

значительно увеличивается при повороте ручки вправо и влево. Кроме того, необходимо учитывать для какого типа регулировки будет использован данный механический потенциометр: для регулировки в полном диапазоне громкости, для регулировки баланса в 30 дБ от полного диапазона, но без возможности регулировки полного диапазона.

**Выбор цифрового потенциометра для регулировки громкости.** В последние несколько лет были разработаны цифровые потенциометры с резистивной архитектурой лестничного типа и интегрированными транзисторами с цифровым управлением для полной замены механических потенциометров в ряде применений. С первого взгляда, использование пары потенциометров покажется логичным решением для регулировки звука в стерео системах, тем не менее, есть ряд замечаний, которые необходимо учитывать перед выбором потенциометра.

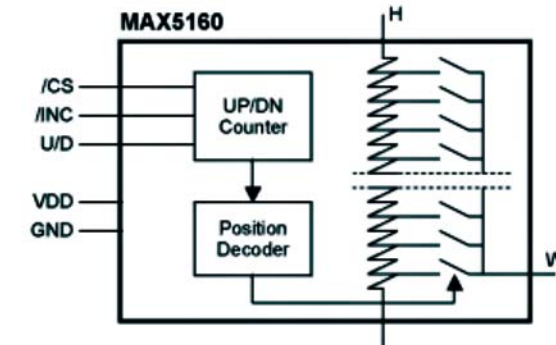


Рис. 27

Наиболее широко доступными устройствами являются линейные потенциометры, перемещение движка которых приводит к равным изменениям величины сопротивления. Закономерность равных изменений дБ на шаг достаточно удобна для аудио контроля, поэтому дополнительная схема должна только эмулировать каким-либо образом логарифмический эффект. Таким образом, отпадает необходимость в использовании механического потенциометра аудио типа.

Второй вопрос для рассмотрения заключается в том, что в то время как цифровой потенциометр выдает линейный выходной сигнал, сквозное сопротивление разных потенциометров при одном и том же положении среднего контакта значительно различается и может достигать  $\pm 30\%$ . Это следует учитывать при разработке схем, где требуется согласованность двух каналов, для которых используются два отдельных потенциометра.

Дополнительным требованием аудио систем является качество перехода между положениями движка, который не должен вызывать эффект щелчка. Поэтому обязательным условием является наличие функции детектирования перехода через ноль.

**Электрическая схема.** Ниже приведены несколько примеров регулировки баланса и громкости звука: при регулировке аттенюации, который не достигает полного размаха, а регулировка громкости происходит в полном диапазоне переключателя (по и против часовой стрелки). Схемы предполагают, что напряжение питания находится в диапазоне 2.7...5 В при низком импедансе  $V_{REF} = V_{CC}/2$ . Входной сигнал должен поступать от низкоимпедансного источника напряжения.

На рисунке 28 представлена схема, в которой используются два потенциометра MAX5160L (предполагается, что их цифровые входы подключены к цифровому устройству управления) и операционный усилитель MAX4252.

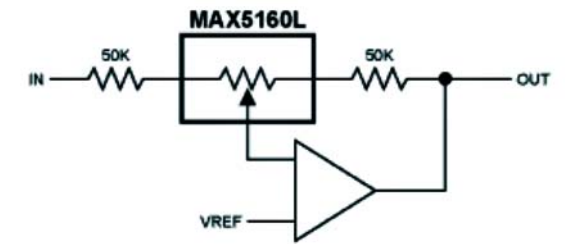


Рис. 28 Контроль баланса в стерео системах  $\pm 6$  дБ, 32 положения (показан один канал).

Схема обеспечивает одинаковое динамическое усиление  $\pm 6$  дБ. Схема будет работать при подаче питания более  $V_{CC}$  от 2.7 до 5 В, будет иметь 32 положения регулировки, а опция сброса по включению питания даст приблизительную согласованность регулировки усиления двух потенциометров. Узким местом такой схемы является погрешность  $\pm 25\%$  сквозного сопротивления цифрового потенциометра. Это может привести к большей погрешности усиления двух потенциометров, особенно при регулировках в крайних положениях ползунка. Например, учитывая, что резистор 50 кОм имеет погрешность  $\pm 1\%$ , то номинальная максимальная установка +6 дБ может варьироваться в пределах следующих значений:

$$Av1 = -(50.5K + 62.5K)/49.5K = -2.283 \text{ V/V или } 7.16 \text{ дБ}$$

$$Av2 = -(49.5K + 37.5K)/50.5K = -1.723 \text{ V/V или } 4.73 \text{ дБ}$$

Такое несоответствия право- и левосторонних регулировок легко улавливается на слух. Поэтому данную схему можно использовать при добавлении специальных резисторов (или другого цифрового потенциометра), поэтому ее невозможно реализовать в массовом производстве. Необходимо найти новые решения для минимизации или устранения погрешности усиления.

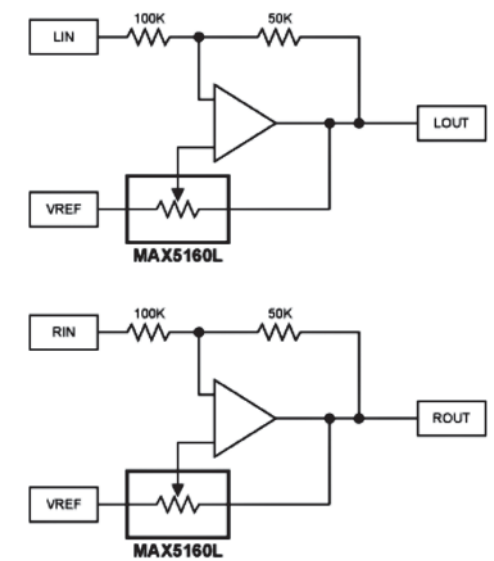


Рис. 29 Контроль усиления в стерео системах  $\pm 6$  дБ, 17 положений движка, улучшенная топология.



В схеме 29 использовался цифровой потенциометр MAX5160L в цепи делителя, сигнал которого заводится на одно из плеч операционного усилителя MAX4252. Сигнал на другое плечо операционного усилителя заводится с делителя, образованного резистором 100 и 50 кОм, включенного между линейным выходом и входом. Резисторы 100 и 50 кОм образуют дополнительную положительную обратную связь.

Расчет усиления можно сделать по формуле:  
 $AV = (1 - K_n) / (K_p - K_n)$ , где  
 $K_n$  – отрицательная обратная связь  
 $K_p$  – положительная обратная связь  
 Например, в схеме 29  $K_n = 100k / (100k + 50k)$  или  $2/3$ , а  $K_p$  является переменной величиной.

При подключении среднего контакта MAX5160L к VREF выводу, усиление цепи составит  $-0.5$  В/В, т.к. будет отсутствовать положительная обратная связь. При перемещении движка в центральное положение  $K_p$  составит  $0.5$ , и усиление теперь будет  $-2$  В/В. Следовательно, используя только 17 положений в диапазоне напряжений от VREF до середины шкалы, усиление может варьироваться в пределах  $\pm 6$  дБ. Оставшиеся 15 положений не используются из-за повторяемости, т.к. значение усиления не зависит от погрешности сопротивления цифрового потенциометра, как это было в схеме 28. Теперь погрешность усиления ограничена в пределах  $\pm 1\%$ , благодаря  $100$  кОм/ $50$  кОм резисторам и погрешности INL/DNL потенциометра MAX5160L ( $\pm 4.6\%$  макс.).

Интересно отметить, что предел стабильности в данной схеме будет достигнут при условии  $K_p > 2/3$ , когда положительная обратная связь совпадет или превысит отрицательную. Головной процессор, осуществляющий управление потенциометрами MAX5160L должен предотвратить возникновение подобной ситуации.

Теперь обратимся к вопросу регулировки громкости с помощью цифровых потенциометров. На рисунке 30 приведена традиционная схема контроля громкости с помощью цифровых потенциометров. Все положения потенциометра являются рабочими, регулировка осуществляется в полном диапазоне аттенюации. В таблице 1 приведены расчетные данные усиления для потенциометра MAX5160L с разрешающей способностью 32.

Таблица 1. Расчетные параметры для схемы 28

Положение движка	Усиление	Положение движка	Усиление
0	0.00	16	-6.31
1	-0.28	17	-6.90
2	-0.58	18	-7.55
3	-0.88	19	-8.24
4	-1.20	20	-9.00
5	-1.53	21	-9.83
6	-1.87	22	-10.74
7	-2.22	23	-11.77
8	-2.59	24	-12.93
9	-2.98	25	-14.26
10	-3.38	26	-15.85
11	-3.81	27	-17.79
12	-4.25	28	-20.28
13	-4.72	29	-23.81
14	-5.22	30	-29.83
15	-5.74	31	полное

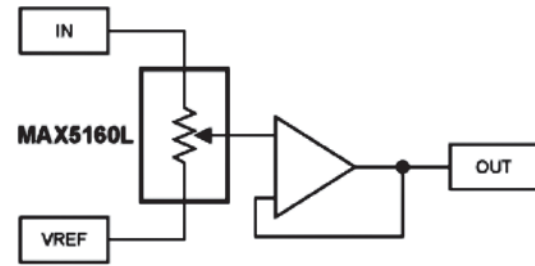


Рис. 30 Традиционная схема управления громкостью (приведен один канал).

Обратите внимание на распределение усиления. При переходе через первые 15 положений усиление не превысит 6 дБ при том, что первые четыре переключения не усиливают звук более чем на 1 дБ, поэтому не имеют практической значимости. Интересно, что, выбрав потенциометр с более высокой разрешающей способностью, вы, тем не менее, получите те же 6 дБ на половину диапазона перемещения движка.

В таких случаях иногда выбирается некий набор положений для получения стабильных усилений дБ/шаг. Например, используя потенциометр, параметры которого приведены в таблице 1, можно получить усиление 3 дБ/шаг при 11 переключениях. Это хорошо работает в тех случаях, когда выбранный цифровой потенциометр имеет высокое разрешение (256 и выше). Однако, такие компоненты гораздо дороже, и при условии, что большинство положений потенциометра не будет использоваться, может оказаться более эффективным использовать большее число существующих положений, применив другую топологию схемы.

Добавление резистивной нагрузки к среднему контакту линейного потенциометра для изменения выходной характеристики уже вошло в привычную практику. Обычно, номинал нагрузочного резистора составляет  $1/20$  от номинала линейного потенциометра. Такая практика имеет два недостатка при работе с линейным потенциометром: входной импеданс потенциометра теперь зависит от установки усиления (минимального при максимальной громкости), и негативные последствия большой погрешности сквозного сопротивления снова приведут к несогласованным право- и левосторонним изменениям ручки громкости.

На рисунке 31 показан такой вариант схемы.

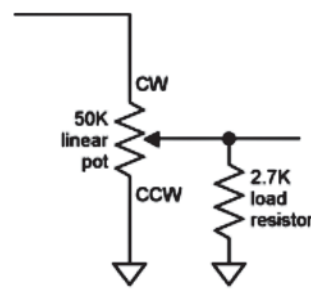


Рис. 31

Схема 32 уступает традиционным характеристикам управления громкостью, также как и схема 30.

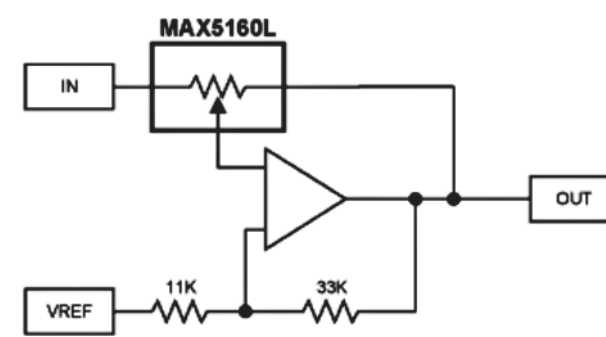


Рис. 32 Улучшенная топология практически гладких изменений дБ/шаг (показан один канал)

Однако, здесь появляется небольшая положительная обратная связь для выравнивания разрешающей способности положений движка до 1.6 дБ/шаг в «полезном» рабочем диапазоне. Такое решение имеет один недостаток: отрицательная обратная связь ( $K_n$ ) должна быть не менее  $0.5$ , а лучше выше, для достижения желаемого результата (несмотря на то, что  $0.25$  является пределом стабильности). Это значит, что около половины положений движка не используются для обеспечения жизнедеятельности схемы. Тем не менее, оставшиеся 17 используются полностью (без разрывов, который был отмечен в схеме 31). Результаты показаны в таблице 2. В третьей колонке приведена дельта между шагами, показывая ровность характеристики во всем диапазоне аттенюации. На рисунке 33 показан эффект линеаризации, где шкала Y – усиление в дБ, шкала X – количество шагов потенциометра. Теперь преимущества над схемой 31 видны наглядно. На 11 шагов приходится усиление по 3 дБ.

Таблица 2. Результаты значений для схемы 32.

Положение движка	Усиление	Дельта	Положение движка	Усиление	Дельта
16	6.88		24	-5.60	1.61
17	5.19	1.68	25	-7.32	1.71
18	3.60	1.59	26	-9.17	1.86
19	2.06	1.54	27	-11.25	2.07
20	0.56	1.50	28	-13.65	2.40
21	-0.93	1.50	29	-16.59	2.94
22	-2.44	1.51	30	-20.53	3.94
23	-3.99	1.55	31	-26.95	6.42
			32	полное	-

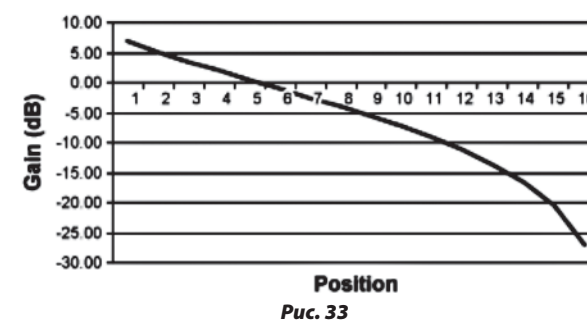


Рис. 33

Односторонний эффект такой схемы заключается в том, что в середине шкалы цифрового потенциометра возникнет скачок в 6 дБ. Однако некоторый сдвиг в усилении практически неизбежен на полной шкале аудио дорожки.

На схеме 34 используются четыре потенциометра MAX5160L для обеспечения высокой разрешающей способности и управления стерео звуком. Число возможных рабочих положений на канал значительно увеличилось и составило  $32 \times 32$  или 1024 бита. Также, сквозное полное сопротивление не влияет на первые несколько битов (благодаря буферу между двумя потенциометрами). Разбаланс право- и левонаправленных регулировок зависит только от согласованности пошагового переключения движка. Сопротивление движка имеет малый нагрузочный эффект, т.к. каждый движок подключен к высокоимпедансному входу операционного усилителя.

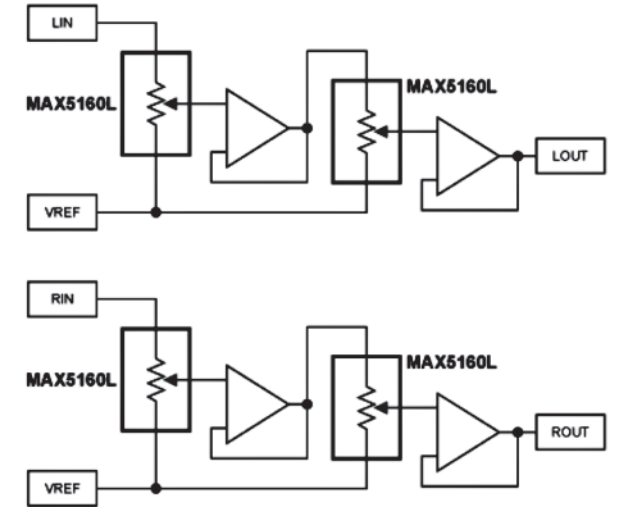


Рис. 34

Из 1024 бит некоторые биты дают двойное усиление (например, первый потенциометр  $-6$  дБ, второй – полное значение, в результате получается  $-6$  дБ; аналогично, когда первый потенциометр дает полное усиление, второй дает только  $-6$  дБ). Если один из потенциометров установлен на полную аттенюацию, любые установки второго потенциометра считаются недействительными, общее число составляет около 348 уникальных установок регулировки от 0 до  $-60$  дБ (если быть точными, то  $-59.66$  дБ). Для выражения такой зависимости в числовом эквиваленте, необходимо построить график. Ниже показан размах полученного усиления, включая задвоенные значения.

На графике 35 видно, что большинство шагов имеет усиление в диапазоне  $0 \dots -40$  дБ. Дельта, или размер шага между каждым значением аттенюации может быть выражена графически также, как это было сделано в таблице 2, для предоставления визуальной детализации перемещения движка.

На основании детализированного графика можно утверждать, что

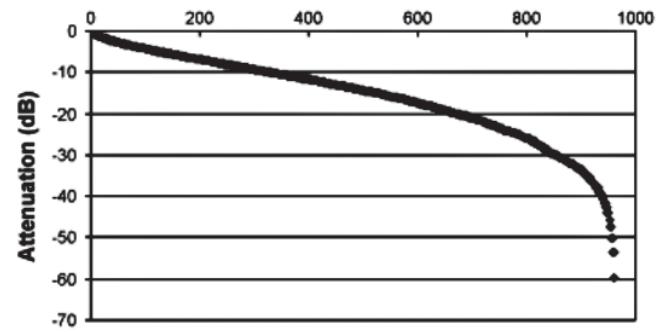


Рис. 35

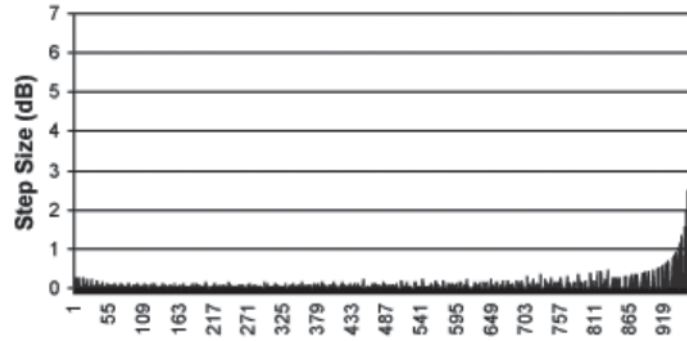


Рис. 36

усиление с каждым шагом достаточно ровное. Несогласованность между шагами не превышает 0,5 дБ и может достигать 1дБ при -41.6 дБ и 6 дБ между -53.6 и -59.6. Повторяющиеся шаги показаны на графике как нулевые значения дельты.

Это создает некий диапазон управления и высокий уровень детализации, требуемый во многих профессиональных аудио системах контроля громкости.

Тем не менее, и здесь есть некоторые ограничения. Очевидно, что такая схема вызывает ряд трудностей (возможно, это может быть использование таблиц зависимостей для получения значений или использование алгоритма ранжирования для достижения плавной регулировки звука). Но, в отличие от схемы 34, здесь нет условий, которые могли бы повлиять на стабильность. Однако рассогласованность сопротивлений между первым и вторым цифровыми потенциометрами не может гарантировать согласованности регулировок. Использование дополнительного набора битов (разумеется, с грубыми регулировками) может быть одним из способов достижения идентичности изменений положения движков, но при этом придется пожертвовать точностью пошаговых изменений.

Теоретически, несмотря на то, что каскадированная схема на рисунке 34 дает якобы впечатляющие результаты при первом приближении, практическое применение такой топологии представляется проблематичным.

Итак, схемы 30 и 31, пожалуй, дают лучший компромисс между ценой, гибкостью топологии, сложностью и эффективностью для большинства применений. Также, компания Maxim выпускает потенциометры моделей MAX5400/1/2 с 3-проводным интерфейсом. Они имеют разрешение 256 положений и 3-проводной протокол управления.

### Аудио микшер с MAX5456/MAX5457

С аудио логарифмическими потенциометрами MAX5456/MAX5457 можно разработать схему управления громкостью, балансом и микшером, которая будет работать от простого кнопочного UP/DOWN интерфейса.

MAX5456/MAX5457 – сдвоенные стерео логарифмические цифровые потенциометры с простым кнопочным Push-Button интерфейсом, предназначенные для управления громкостью и балансом в аудио устройствах. Каждый потенциометр имеет 32 положения среднего контакта. В конструкции потенциометров применена уникальная собственная разработка Maxim - SmartWiper™ технология движка, благодаря которой для изменения скорости перемещения среднего контакта потенциометра не требуется микроконтроллер.

Если удерживать в течение секунды контакты DN/BAL или UP/BAL1, скорость перемещения движка увеличится до 4 Гц в течение первых четырех секунд. Если после этого кнопка не была отжата, скорость еще увеличится до 16 Гц.

В режиме регулировки громкости движки перемещаются одновременно, регулируя уровень громкости обоих каналов. Управление балансом каналов при этом разделено. В режиме регулировки баланса потенциометры MAX5456/MAX5457 настраивают баланс между каналом 0 и каналом 1, при этом параметр громкости является автономным.

В число дополнительных возможностей потенциометров входят: однополярное и двуполярное питание, детектор перехода через ноль, функция Mute (все движки потенциометров устанавливаются в положение максимального ослабления до -90 дБ), сброс по включению питания (-12 дБ), малые искажения высшими гармониками (0,01%), а также миниатюрные 16-выводные корпуса QSOP/TQFN.

При использовании потенциометров в схеме с АС сигналами, необходимо рассмотреть следующие вопросы. В первую очередь, необходимо понимать, как смещать АС сигнал в диапазон DC питания. Во-вторых, в то время как цифровой потенциометр предназначен для равномерного изменения сопротивления, его сквозное сопротивление у разных изделий может варьироваться в пределах ±30%.

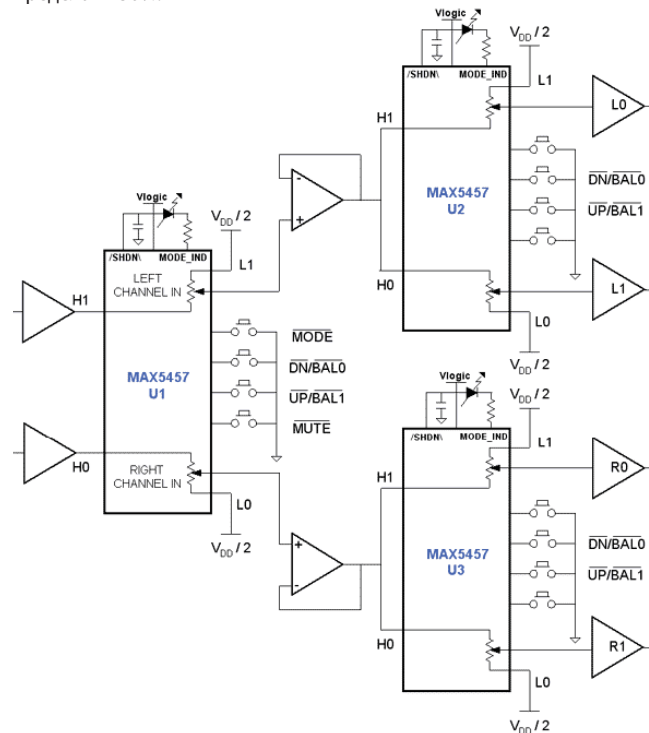


Рис. 37 Блок-диаграмма регулятора громкости, баланса и микшера сигналов с помощью трех потенциометров MAX5456/MAX5457

Потенциометр MAX5457 имеет возможность переключения между режимами регулировки громкости и баланса (активный низкий вход MODE). Светодиодный индикатор выхода показывает в каком режиме находится потенциометр: регулировки громкости или регулировки баланса. На приведенной схеме потенциометр U1 управляет балансом и громкостью входного стерео сигнала и передает сигналы правого и левого каналов на микшер, который формируется из потенциометров U2 и U3.

В режиме регулировки громкости все настройки производятся с активно-низкими кнопками потенциометра U1 DN/BAL0 или UP/BAL1. Для регулировки баланса переключитесь в режим MODE (активный низкий) и используйте активные низкие кнопки DN/BAL0 или UP/BAL1.

Потенциометры U2 и U3 составляют микшер сигналов для левого и правого каналов, соответственно. Посредством регулировки баланса потенциометра U2, сигнал левого канала может находиться в пределах от уровня L0 до уровня L1. Аналогичным образом, посредством регулировки баланса потенциометра U3 сигнал правого канала U1 может находиться в пределах от уровня R0 до R1.

Обычно, потенциометры U2 и U3 не используются для регулировки громкости, т.к. эту функцию выполняет первый потенциометр U1. Однако, регулировка звука через потенциометры U2 и U3 иногда может быть полезной для компенсации рассогласований в аудио канале.

Операционный усилитель в схеме перед потенциометром U1 усиливает уровень линии или высокоимпедансные входные сигналы от источника стерео звука. Учитывая, что минимальное сквозное сопротивление потенциометров MAX5456/MAX5457 составляет 7 кОм, на вход правого или левого канала потенциометра U1 поступит 7 кОм (худший вариант) или 10 кОм (номинальное значение). Два усилителя на выходах U1 используются в качестве буферов и ограничивают нагрузку для минимизации искажений высоких гармоник. И, наконец, в выходном каскаде схемы использованы четыре усилителя для минимизации тока среднего контакта и усиления сигнала, поступающего в динамики.

### Создание аудио предусилителя с аттенуатором с помощью потенциометра DS1802

DS1802 является сдвоенным потенциометром с аудио (логарифмической) резистивной характеристикой 1 дБ на шаг. Максимальная аттенуация потенциометра составляет 63 дБ, при этом устройство имеет функцию Mute – функцию максимального затухания, когда все движки потенциометра устанавливаются в положение максимального ослабления (90 дБ).

Микросхема DS1802 имеет четыре входа с контактным интерфейсом, поэтому может быть использована или как контроллер громкости и баланса аудио устройств, или как потенциометр с возможностью независимой регулировки положений среднего контакта двух интегрированных потенциометров.

Также, потенциометр оснащен функцией детектирования перехода через ноль, поэтому при регулировке громкости не возникнет дребезга при переключении. Микросхема выпускается в корпусах 20-pin DIP, 20-pin SOIC, и 20-pin TSSOP.

DS1802 разработан преимущественно для тех аудио систем, где необходим кнопочный интерфейс управления выходным сопротивлением. Однако микросхема может управляться и через 3-проводной интерфейс, например, от микроконтроллера или компьютера.

Аудио схема источника питания. Перед включением в схему аудио потенциометра DS1802 необходимо рассмотреть проблему смещения АС сигнала в диапазон питания DC. Это связано с тем, что потенциометр DS1802 отрежет аудио сигналы, которые находятся за пределами диапазона GND...VCC. Устройство работает от источника питания 3 – 5 В, но следует учитывать, что выбор напряжения

питания также повлияет на максимальную амплитуду аудио сигнала. Поскольку обычно аудио сигналы являются симметричными, лучше установить DC смещение до VCC/2 для получения максимальной амплитуды аудио сигнала.

Для этого можно использовать мост Уитсона, показанный на рисунке 38.

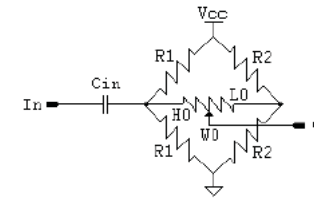


Рис. 38 Мост Уитсона для смещения постоянным током

Приведенная схема является классической, поскольку допускает прохождение АС сигналов через средний резистор (или потенциометр) с автоматическим смещением на половину питания. Это критично для цифрового потенциометра, поскольку детектор перехода через ноль переключает положение движка при детектировании нулевого напряжения в диапазоне номинального сопротивления. Таким образом при применении данной схемы, на потенциометре не будет падать дополнительное напряжение, которое может вызвать помехи при переключении.

Существует три критических компонента в схемах АС и DC на рисунке 39. В первую очередь, Cin должен быть хорошим конденсатором, который будет блокировать DC сигнал. Это позволит установить смещение через резисторную сборку. Далее, конденсатор должен иметь достаточно большую емкость, чтобы пропускать низкочастотную составляющую сигнала. Если емкость конденсатора достаточная, система будет работать во всем аудио диапазоне. Во-вторых, номинал резистора R2 должен быть меньше, чем полное сопротивление потенциометра. АС сигнал разделится между потенциометром и двумя параллельными R2 резисторами. Если установить резистор R2 слишком большого номинала, большая часть АС сигнала может быть потеряна, что сократит сигнал до уровня шума. Рекомендуется выбрать относительно небольшие номиналы для R2, однако, это также может повлиять на постоянный ток системы. Последний критический момент схемы – два резистора R1, которые должны иметь достаточно большой номинал, иначе АС входной импеданс окажется слишком малым для практического применения. Большинство компонентов аудио систем имеют относительно высокие входные импедансы. Номинал резисторов R1 и сквозное сопротивление потенциометра имеют большое влияние на АС входной импеданс схемы. Входной импеданс не так зависит от R2 или Cin, поскольку эти импедансы будут небольшими по сравнению с двумя остальными.

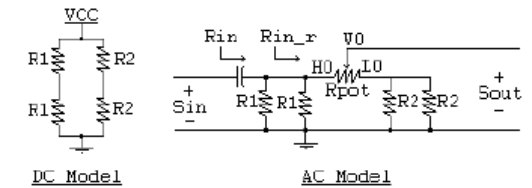


Рис. 39 DC и AC модели для схемы моста Уитсона

DC схема легко поддается анализу, так как входной конденсатор изолирует резисторную сборку от любых DC входов, а оба вывода потенциометра находятся в состоянии VCC/2, поэтому постоянный ток не попадет на потенциометр. Таким образом, определить потребляемый постоянный ток схемы можно по формуле 4. Он является суммой токов, протекающих от Vcc до GND через 2R1 и 2R2. Формула была упрощена до одной дроби. Необходимо учесть, что в нее не включен небольшой ток самого потенциометра DS1802.

$$\text{Eq. 1} \quad R_{in} = \frac{1}{j2\pi C_{in}} + R_1 \parallel R_1 \parallel (R_{pot} + R_2 \parallel R_2)$$

$$\text{Eq. 2} \quad R_{in\_r} = R_1 \parallel R_1 \parallel (R_{pot} + R_2 \parallel R_2)$$

$$\text{Eq. 3} \quad g = 20 \log_{10} \left[ \left( \frac{R_{in\_r}}{R_{in}} \right) \left( \frac{R_{pot}}{R_{pot} + R_2 \parallel R_2} \right) \right]$$

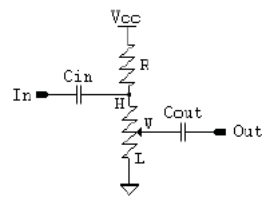
$$\text{Eq. 4} \quad I_{DC} = \frac{V_{CC}(2R_1 + 2R_2)}{4R_1 R_2}$$

Если рассмотреть АС модель этой схемы, то Vcc можно считать землей для переменного сигнала, в этом случае анализ импедансов для определения номиналов резисторов упростится. Формула расчета Rin показана на Eq.1, и номинал резистора Rin\_r, без учета влияния входной емкости, определяется по формуле Eq. 2. Суммарные потери пропорциональны отношению Rin\_r / Rin и Rpot / (Rpot + R2||R2). Отношение Rin\_r / Rin определяет падение напряжения на входном конденсаторе при расчете импеданса моста Уитсона.

Выражение Rpot / (Rpot + R2||R2) определяет потери, связанные с делением напряжения АС сигнала между потенциометром и двумя резисторами на низкоуровневом контакте потенциометра. Если емкость Cin достаточно большая, а номинал резистора R2 небольшой, потери сигнала будут незначительными. Так же, частотная зависимость потерь АС сигнала может возникнуть только по причине входного конденсатора, который при соединении с входным сопротивлением моста Уитсона создает конденсаторный фильтр в данной схеме. Если импеданс входной емкости мал в сравнении с суммарным импедансом резисторов моста, то частотная зависимость АС сигнала в данной схеме не проявляется. Т.к. схема фактически является фильтром низкой частоты, то имеет смысл считать его на частоте не меньше чем 20Гц. Более низкие частоты в аудио приложении не играют существенной роли.

Не следует делать распространенную ошибку, когда при применении цифрового потенциометра механически повторяют схемотехнические решения, отработанные на механических потенциометрах.

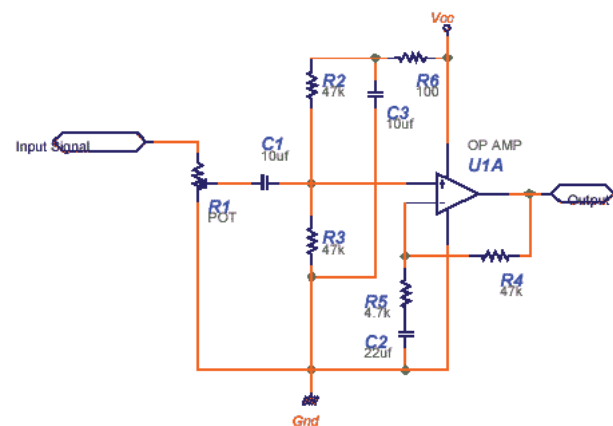
На рисунке 40 показана простая схема использования механического потенциометра, которую нежелательно применять с цифровым потенциометром.



**Рис. 40 Простая схема с механическим потенциометром**

Такая схема предназначена для механического потенциометра, поскольку уровень выходного DC сигнала меняется при смене потенциометра. Входной каскад схемы останется на неизменном уровне: Vcc/2 (при условии, что R1 равняется полному сопротивлению потенциометра). При смене механического резистора изменения будут постоянными и неопределенными. DC выходной уровень будет меняться медленно и непрерывно. Таким образом, Cout позволит АС выходному сигналу остаться на уровне земли DC. Цифровой потенциометр меняет положение движка мгновенно и дискретно. Изменение напряжения уровня DC приведет к формированию импульса тока через Cout, и

вызовет нежелательные звуковые эффекты. Аналогичный эффект можно заметить и у дешевых аудио устройств, где используются механические потенциометры плохого качества. Другая особенность анализируемой схемы заключается в том, что она не позволяет использовать детектор перехода через ноль, поскольку высоковольтный контакт потенциометра (H) смещен на Vcc/2, а низковольтный - (L) привязан к земле. Поэтому пока амплитуда АС сигнала не будет равна Vcc/2, высоковольтный и низковольтный контакты никогда не будут иметь одинаковую разницу потенциалов, а детектор перехода через ноль всегда будет иметь задержку в срабатывании и переключаться только при появлении на потенциометре разницы потенциалов. Несмотря на то, что проблемные места этой схемы достаточно очевидны, многие разработчики используют ее для установки цифровых потенциометров вместо механических. Типичный пример «модернизации» схемы механического потенциометра для установки цифрового аналога показан на рисунке 41.



**Рис. 41 Схема с механическим потенциометром для преобразования в цифровой потенциометр**

Потенциальные проблемы, которые необходимо заранее рассмотреть, следующие. Входной сигнал соединен на землю через потенциометр. Если на вход подать аудио сигнал со смещением 0В DC, на высоковольтном контакте потенциометра появится отрицательное напряжение. DS1802 срежет сигналы ниже уровня земли, благодаря встроенной ESD защите. Согласно спецификации максимальных параметров потенциометра сигнал -0.5 В не создаст особых проблем. Однако, схема ESD защиты у DS1802 срабатывает в любом диапазоне ниже GND и выше Vcc. Несмотря на то, что устройство не пострадает, входной аудио сигнал исказится. Схема будет хорошо работать с детектором перехода через ноль, если оба контакта потенциометра смещены на 0 В DC. Однако отсутствие отрицательной волны сигнала может вынудить разработчика сместить вход до Vcc/2.

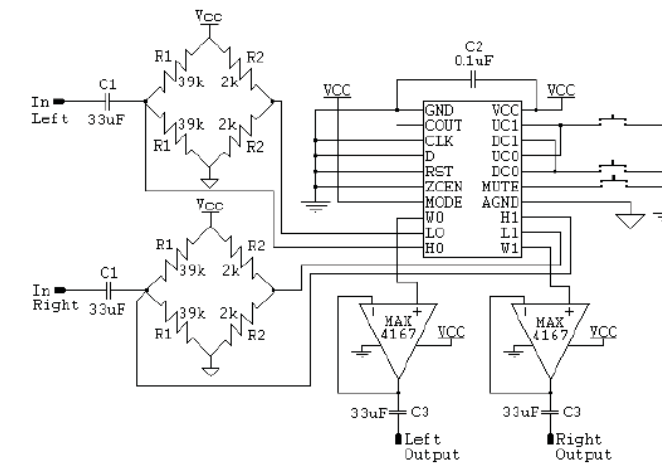
После изменения смещения входного сигнала возникнут те же проблемы с детектором перехода через ноль, что и в схеме 40. высоковольтный и низковольтный контакт потенциометра теперь имеют разные DC потенциалы, и мгновенные изменения DC уровня (и соответственно тока) среднего контакта пройдут через C1 на выход.

Данные примеры были приведены для того, чтобы показать важность анализа всех DC рабочих точек и путей АС сигнала при работе с цифровыми потенциометрами. Такие устройства легки и удобны в работе, однако, они не тождественны механическим потенциометрам. Цифровые потенциометры, в первую очередь, активные компоненты, и требуют взвешенного подхода к их использованию в схеме.

Пример построения стерео предусилителя с кнопочным управлением. Помимо смещения аудио сигнала до DC уровня

Vcc/2 и удерживания высоковольтный и низковольтный контакта потенциометра на уровне одинаковой разницы потенциалов, построение предусилителя с DS1802 имеет еще несколько проблемных моментов. Входной импеданс моста Уитсона должен быть достаточно большим, чтобы внешний источник мог подавать сигнал в предусилитель. Входной конденсатор должен иметь высокую емкость, чтобы не усиливать частотную характеристику по низким частотам, а резистор R2 необходимо выбрать с малым номиналом, чтобы не усиливать сигнал на цифровом потенциометре.

Схема 42 имеет минимальные потери сигнала и хорошую частотную характеристику.



**Рис. 42 Препусилитель с кнопочным аттенуатором**

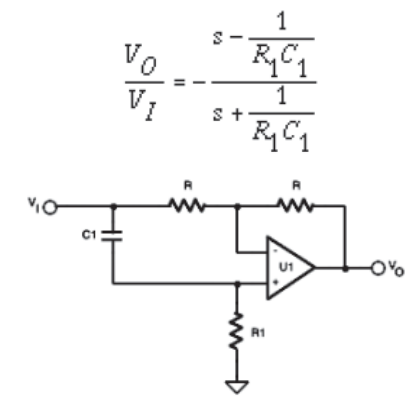
Схема создает входной импеданс более 13.7 кОм. Потери сигнала на мосту Уитсона и входном конденсаторе при 20 Гц составляют 1.2 дБ. Поскольку большинство динамиков в лучшем случае имеют частотную характеристику менее 50 Гц, входная аттенуация на 50 Гц составляет 0.6 дБ. Также необходимо учесть, что кнопочные переключатели просто соединены с землей, поскольку DS1802 внутренне устраняет дребезг входных контактов. Показанная кнопочная конфигурация позволяет увеличивать громкость аудио сигнала, уменьшать ее, активировать режим Mute (максимальное ослабление). В спецификации на DS1802 показан порядок конфигурации потенциометра со стерео контроллером и схема независимого управления потенциометрами с кнопками.

Операционные усилители необходимы в этой схеме, поскольку DS1802 имеет относительно высокое выходное сопротивление. Без буферизации, потенциометр может управлять нагрузкой до 1 мА. Кроме того, если нагрузка емкостная, при высоком выходном сопротивлении аттенуатор будет фильтровать высокие частоты. Поскольку операционный усилитель имеет высокий входной импеданс, он не нагружает потенциометр и формирует достаточный ток управления для последующего усилительного каскада. Два конденсатора C3 необходимы для последующего сдвига DC уровня аудио сигнала в усилительном каскаде. Если в этом каскаде установлен входной конденсатор или каскад работает на том же уровне смещения, необходимость в конденсаторах отпадает.

## Цифровое управление сдвигом фазы

Для построения схемы управления сдвигом фазы потребуется минимум компонентов: цифровой потенциометр, пассивные компоненты (резисторы и конденсаторы) и операционный усилитель. Для примера будет взят потенциометр DS1669, хотя может использоваться любой другой потенциометр с достаточной полосой пропускания для передачи аудио сигнала.

Изменение фазочастотной характеристики сигнала без изменения его амплитудной характеристики обычно достигается с помощью частотнонезависимого фильтра, как показано на рисунке 43. Изменение фазочастотной характеристики рассчитывается:



**Рис. 43 Простая схема сдвига фазы с помощью частотнонезависимого фильтра.**

Поскольку частота сигнала варьируется от DC до бесконечности, сдвиг фазы варьируется от 0 до +180 градусов. Так же видно, что, изменяя номинал резистора R1, можно получать изменения фазового сдвига с определенной частотой. Если поменять местами R1 и C1, как показано на рисунке 44, обратная функция получает следующее выражение:

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{s - \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_1 C_1}}$$

а фаза меняется в диапазоне -180...0 градусов. Сдвиг фазы, который создается такой схемой при определенной частоте, можно рассчитать по формуле:

$$\text{Phase}(\text{rad}) = \tan^{-1} \left[ \frac{2\omega}{\omega^2 - \left[ \frac{1}{R_1 C_1} \right]^2} \right]$$

, где  $\omega$  – частоты в rad/s, или  $2\pi \cdot f$  (частота выражена в Герцах).

На практике, большинство схем такого типа может охватывать сдвиги фаз до 120 градусов с операционным усилителем и обязательными компонентами.

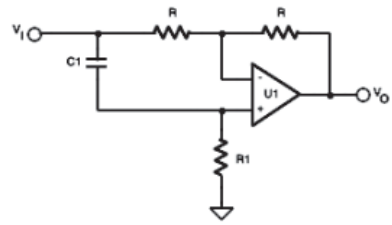


Рис. 44 На схеме с фильтром поменяли местами R1 и C1.

**Цифровое управление фазовым смещением.** Топология схемы позволяет использовать цифровые потенциометры вместо R1. Пример схемы показан на рисунке 45. Схема оптимизирована на сдвиг фазы в аудио диапазоне, и теперь фаза управляется на определенной частоте через цифровой сигнал. Положение движка потенциометра DS1669 может устанавливаться с помощью простой линии цифрового управления. Управление движком осуществляется через импульсный интерфейс (кнопочный). Добавление генератора к цифровому входу вызовет постоянное качание фазы, эффект, часто используемый в записи современной музыки. Следует учитывать, что так как схема имеет одиночный источник питания, цифровой потенциометр будет иметь смещение  $1/2 V_{CC}$ .

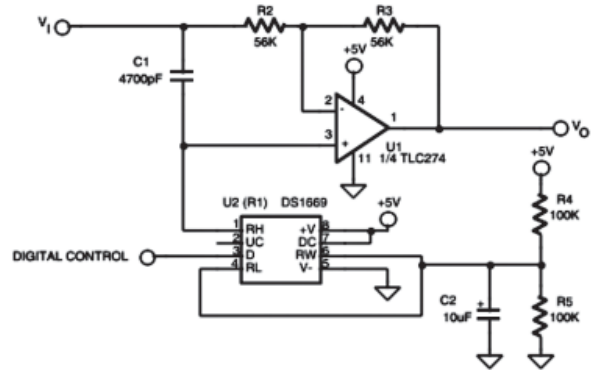


Рис. 45 Замена резистора R1 цифровым потенциометром для цифрового управления сдвигом фазы.

**Эффект полного сдвига аудио фазы.** Для получения большего угла сдвига фазы такие секции можно каскадировать. Для управления всеми секциями посредством микропроцессора можно использовать интегрированные сдвоенные, счетверенные и шестиренные цифровые потенциометры. Пример фазорегулятора/стерео синтезатора показан на рисунках 46-50.

Положение движков шести потенциометров, интегрированных в корпусе микросхемы DS1806, управляется посредством простого трехпроводного цифрового интерфейса, который измеряет настройки движка через DQ линии, в то время как /RST линия находится в высоком состоянии. Когда /RST снижается, движок перемещается в новое положение.

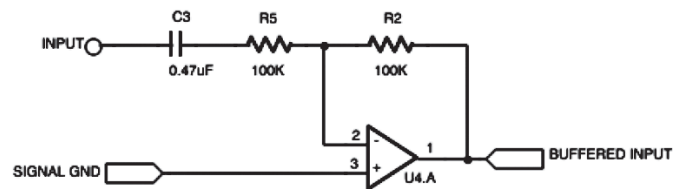


Рис. 46 Входной каскад фазорегулятора обеспечивает буферизованный сигнал, связанный по переменному току

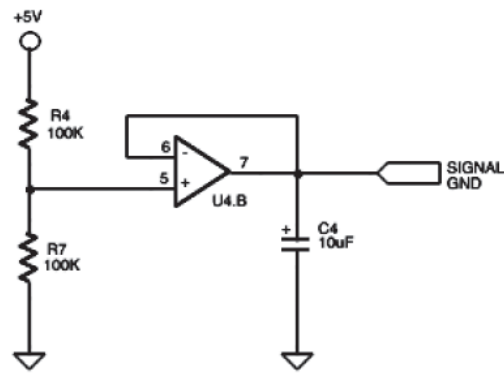


Рис. 47 Схема питается от одиночного источника и генерирует сигнал, заземленный для остальной цепи. U4 – операционный усилитель с одиночным питанием (TLC274).

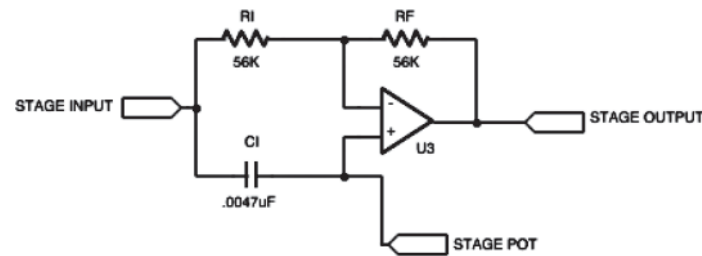


Рис. 48 Один каскад (из четырех) для сдвига фазы. Схема аналогична рис.50 за исключением резистора R1, который заменен секцией шестиренного потенциометра, обозначенного как «stage pot».

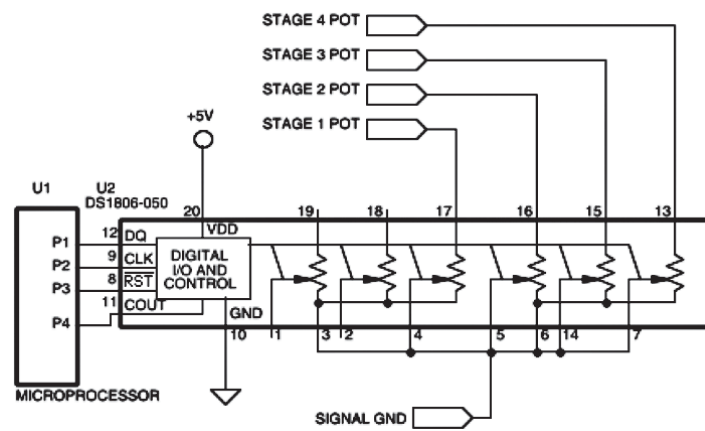


Рис. 49 Четыре секции DS1806 используются для управления сдвигом фазы каждого каскада с помощью микропроцессора. Учтите, что две секции потенциометра не используются, и могут быть применены, например, для контроля уровня громкости.

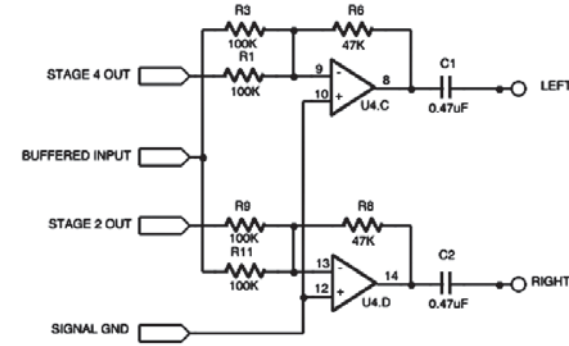


Рис. 50 Последний выходной каскад представляет собой микшер, который объединяет выходные сигналы разных каскадов для создания фазового вектора, а также псевдосtereo выхода.

# ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ДЛЯ ОПТОВОЛОКОННЫХ КОММУНИКАЦИЙ

## Сравнительный анализ микросхем для оптоволоконных систем

Несмотря на то, что цифровые потенциометры имеют очень широкий круг применений, только некоторые модели соответствуют требованиям, которые предъявляются рынком оптоволоконных и оптических средств коммуникации и управления.

Dallas Semiconductor представляет на рынке широкий спектр продукции для волоконно-оптических систем управления и мониторинга. Такие устройства работают с оптоволоконными стандартами SFP, XFP, SFF, GBIC, и PON и совместимы с различными драйверами. Многие характеристики таких компонентов были специально оптимизированы для рынка оптоволоконных коммуникаций.

В таблицах 1 и 2 представлены наиболее важные параметры компонентов для оптоволоконных сетей. Компоненты, приведенные в таблице 1, используются в оптоволоконных сетях стандарта SFF-8472 MSA, XFP (DS1862) и PON (DS1863).

Устройства, перечисленные в таблице 2, можно использовать для контроля смещения и тока модуляции.

Таблица 1. Сравнительная таблица устройств SFP, XFP и PON стандартов

Features	DS1858	DS1859	DS1862	DS1863	DS1864	DS1865
SFF-8472 Compliant	●	●	●	●	●	●
Burst Mode	●	●	●	●	●	●
Fast Trip Comparators	●	●	●	●	●	●
Alarm Flags	●	●	●	●	●	●
Warning Flags	●	●	●	●	●	●
FETG Driver	●	●	●	●	●	●
Rx Power Monitor	●	●	●	●	●	●
Rx Power Monitor with Extended Range	●	●	●	●	●	●
Analog Monitoring Inputs	●	●	●	●	●	●
Laser Bias Automatic Power Control (APC)	●	●	●	●	●	●
Extinction Ratio Control	●	●	●	●	●	●
Internal Calibration	●	●	●	●	●	●
Internal Temperature Sensor	●	●	●	●	●	●
Vcc A/D Converter (ADC)	●	●	●	●	●	●
User EEPROM	●	●	●	●	●	●
40h EEPROM	●	●	●	●	●	●
Pin-Controlled Write Protection	●	●	●	●	●	●
Password-Controlled Write Protection	●	●	●	●	●	●
Software-Selectable I <sup>2</sup> C Address	●	●	●	●	●	●
Temperature-Controlled Resistors	●	●	●	●	●	●
Manual Resistor Control	●	●	●	●	●	●
Temperature-Controlled DACs	●	●	●	●	●	●
Manual DAC Control	●	●	●	●	●	●
High-Impedance Control	●	●	●	●	●	●

Таблица 2. Сравнительная таблица устройств для контроля смещения и тока модуляции.

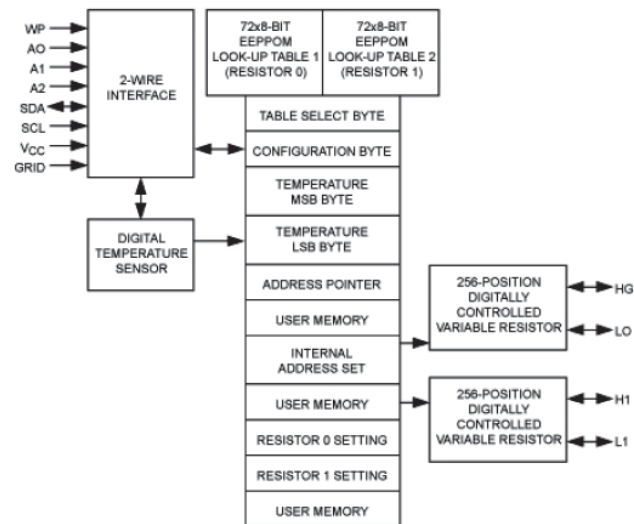
Features	DS1847	DS1848	DS1855	DS3901	DS3902
Internal Temperature Sensor	●	●	●	●	●
User EEPROM	●	●	●	●	●
Pin-Controlled Write Protection	●	●	●	●	●
Password-Controlled Write Protection	●	●	●	●	●
I <sup>2</sup> C Address Pins	●	●	●	●	●
Hardware-Selectable I <sup>2</sup> C Address	●	●	●	●	●
Software-Selectable I <sup>2</sup> C Address	●	●	●	●	●
Temperature-Controlled Resistors	●	●	●	●	●
Manual Resistor Control	●	●	●	●	●
High-Impedance Control	●	●	●	●	●

- DS1847 Сдвоенный потенциометр, встроенный датчик температуры, энергонезависимая память
- DS1848 Сдвоенный потенциометр с датчиком температуры, энергонезависимая память
- DS1855 Сдвоенный потенциометр с памятью защиты
- DS1856 Сдвоенный потенциометр с датчиком температуры, защитой пароля и калиброванными мониторами питания
- DS1859 Сдвоенный потенциометр с датчиком температур с калиброванными мониторами питания, EEPROM
- DS1862 Интегральная схема управления и цифровой диагностики лазерных систем XFP
- DS1863 PON контроллер с интегрированным мониторингом
- DS1864 Интегральная схема управления и цифровой диагностики лазерных систем SFP
- DS1865 PON контроллер со схемой мониторинга
- DS3901 Строчный потенциометр с 8-бит энергонезависимой памятью и памятью пользователя EEPROM
- DS3902 Сдвоенный потенциометр с энергонезависимой памятью и пользовательской EEPROM

## Потенциометры Dallas для оптоволоконных каналов связи

Модули оптических приемопередатчиков сегодня предлагаются широким кругом поставщиков. Такие модули применяются в синхронизированных оптических сетях (SONET), синхронной цифровой иерархической структуре (стандарт SDH), в асинхронном режиме передачи (ATM), в распределенных интерфейсах передачи данных по волоконно-оптическим каналам (FDDI), высокоскоростном и гигабитном Ethernet.

Модуль конвертирует получаемые на входе световые волны в электрические сигналы и электрические сигналы на выходе в световые волны. Важно отметить, что оптические приемопередатчики основаны на полупроводниковой лазерной технологии. Модуль представляет собой печатную плату, где оптический источник требуемого диапазона – миниатюрный полупроводниковый кристалл: лазерный диод или светодиода. На



частотах, близких к инфракрасному спектру, лазерный сигнал может быть модулирован в десятки гигагерц.

Порт приемника модуля подключен к оптоволокну. Фотодетектор преобразует световой поток в электрический сигнал, который затем усиливается для восстановления, распаковки и отправки по интерфейсу сигнала синхронизации и сигнала данных. Фотодиод нуждается в схеме с автоматическим контролем смещения для генерации постоянного рабочего напряжения (рис. 51). В то же время, на передающей стороне модуля сигналы синхронизации и бит данных синтезируются и посылаются в драйвер лазера. Наконец, драйвер лазера отправляет сигнал электрического тока в лазерный диод, который конвертирует энергию электронов в световой поток.

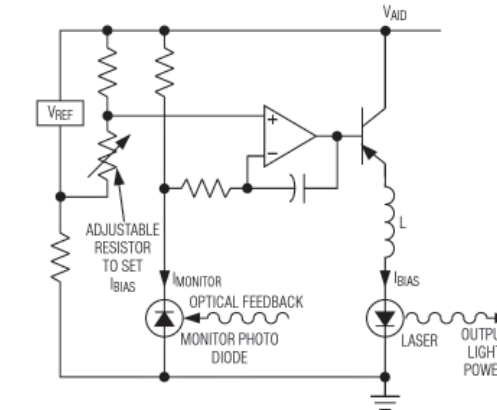


Рис. 51 Типичная схема управления мощностью с применением фотодиода и переменного резистора для регулировки тока смещения.

В связи с тем, что скорость передачи данных в сетях непрерывно растет, фото-компоненты оптических модулей требуют более точного и надежного управления мощностью для предотвращения выхода из строя лазера, увеличения срока службы устройства и предоставления требуемых выходных параметров.

Единственный способ контролировать ток через лазерный диод или VCSEL, и таким образом контролировать выходную мощность, - это управление сопротивлением. Когда-то технические специалисты вручную подстраивали переменный резистор, в надежде получить хорошую глазковую диаграмму. Более эффективное решение такой задачи – это использовать электронное программируемое устройство, которое может реагировать на температурные изменения, т.е. цифровой потенциометр.

Несмотря на то, что рынок коммуникаций не является целевым для компании Dallas Semiconductor, она имеет большой опыт в разработке некоторых релевантных технологий: цифровых переменных резисторов (потенциометров), EEPROM памяти, температурных датчиков и CMOS устройств со сверхнизкой мощностью потребления.

Для удовлетворения спроса рынка гигабитных оптических технологий, разработчики компании Dallas выпустили семейство потенциометров с новым набором возможностей. Сдвоенные DS1845 потенциометры стали первыми на рынке цифровыми полупроводниковыми потенциометрами со встроенным блоком памяти. Особое преимущество такие компоненты получили во вставных гигабитных модулях приемопередатчиков.

DS1845 объединяет два потенциометра с линейной зависимостью сопротивления с EEPROM памятью на 256 байт, что соответствует MSA стандарту. Потенциометры с высоким разрешением на 256 положений могут использоваться для управления током модуляции, а 100 положений движка могут контролировать ток смещения. Пользователь может конфигурировать оба типа выходов и сохранять на кристалле устройства настройки движка, а также пользовательские данные; несколько байтов EEPROM

зарезервированы для обеспечения правильной работы устройства.

Для модулей, предназначенных для установки в SFP, высокоплотный монтаж компонентов (память и два независимых потенциометра конфигурированы в одном корпусе) позволяет экономить пространство платы и заменить многочисленные элементы одним интегрированным устройством. Кроме того, двухпроводной интерфейс DS1845 полностью удовлетворяет требованиям производителей приемопередатчиков для внутрисхемного программирования и обеспечения совместимости с существующей 2-проводной микросхемой EEPROM.

Для удовлетворения более специализированных запросов, разработчики Dallas предлагают использовать DS1846, который объединяет три линейных потенциометра, блок энергонезависимой памяти и ЦПУ супервизор в уменьшенном TSSOP корпусе. Высокий уровень интеграции в таком малом чипе экономит пространство платы, сокращает затраты и время сборки. Так же как и в потенциометре DS1845, энергонезависимая память служит для конфигурации и хранения специализированной калибровочной информации.

Также, для управления настройками движка каждого потенциометра предусмотрены байты адресного пространства, где могут располагаться специализированные пользовательские данные.

Встроенный на чипе DS1846 микромонитор питания контролирует рабочее напряжение устройства. При обнаружении большой погрешности уровня напряжения, микромонитор питания инициирует перезапуск системы и удерживает устройство в соответствующем состоянии до тех пор, пока не будут возобновлены номинальные рабочие параметры питания. Монитор питания может быть запрограммирован на различные уровни напряжения и имеет дополнительный ручной режим перезапуска.

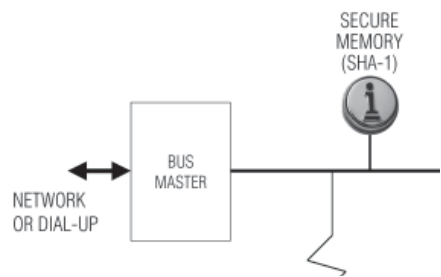
Третий встроенный потенциометр может быть использован для управления другим параметром или для грубой настройки одного или другого резистора.

Для работы в ответственных лазерных приложениях предназначены потенциометры DS1847 и DS1848, которые компенсируют температурные характеристики лазера во всем рабочем диапазоне температур (рисунок 52). DS1848 имеет дополнительные 128 байт EEPROM памяти для общего применения. Остальные параметры потенциометров идентичны. Кристаллы сохраняют зависимость параметров сопротивления от температуры в таблице соответствия (LUT). Встроенный датчик температуры непрерывно изменяет температуру рабочего лазера. DS1847 и DS1848 сравнивают показания с ранее сохраненными в таблице значениями и подстраивают сопротивление в соответствии с характеристиками сопротивления, определенными пользователем.

Значение, зафиксированное датчиком температуры, также сохраняется в EEPROM память (обновление каждые 10 мс) и может быть доступно пользователю через 2-проводную шину. Следует заметить, что потенциометры DS1847 и DS1848 работают в автоматическом режиме. При детектировании изменения температуры, схема управления автоматически подстраивает сопротивление для получения тока компенсации без каких-либо вмешательств со стороны пользователя.

В целом, все разработки компании Dallas выполнены по маломощной CMOS технологии, целью которой является выбор оптимального энергетического потенциала. Все устройства работают в промышленном температурном диапазоне от источников питания 3 или 5 В.

Очевидно, что на огромном, сложном и растущем рынке оптических коммуникационных сетей разные производители заняли свои ниши. Однако успех развития лазерных технологий может напрямую зависеть от такого старого и хорошо знакомого компонента, как скромный резистор.



**Рис. 52 Оптический передатчик – переменный цифровой резистор, разработанный для оптических передатчиков, автоматически калибрует каждый диод с большей эффективностью, чем механический потенциометр.**

## Способы управления драйвером лазера: цифровой потенциометр и ЦАП

Для контроля токов модуляции и смещения драйвера лазера разработчик имеет достаточно широкий выбор комплектующих: постоянный резистор, механический переменный резистор, цифровой потенциометр или цифроаналоговый преобразователь. Преимущества программных методов (используемых цифровыми потенциометрами и ЦАПами) заключаются в том, что производственный процесс может быть автоматизирован с применением цифрового управления (например, для компенсации температурных изменений). Использование в схеме вместо ЦАПа цифрового потенциометра не вызывает трудностей. Кроме того, можно сэкономить на разнице в цене. Однако работа с ЦАП имеет ряд своих преимуществ, в число которых входят хорошая линейность (а значит и простота работы с программным обеспечением и возможность превзойти требуемый уровень точности), повышение плотности монтажа платы, широкий выбор разрешений, лучший диапазон оптимизации, легкость при работе с отрицательным напряжением драйвера лазера и хорошая повторяемость параметров при замене компонентов.

Некоторые семейства лазерных драйверов от различных производителей предназначены для работы с резисторами для управления токами модуляции и смещения, подающимися с драйвера. Для управления этими же параметрами можно использовать ЦАП или цифровой потенциометр. Использование любого из компонентов имеет свои плюсы, минусы и компромиссы, которые непосредственно отражаются на эффективности работы драйвера.

Для разбора преимуществ и недостатков, которые имеют перечисленные компоненты, обратимся к базовым понятиям работы драйвера лазера и оптоволоконного модуля.

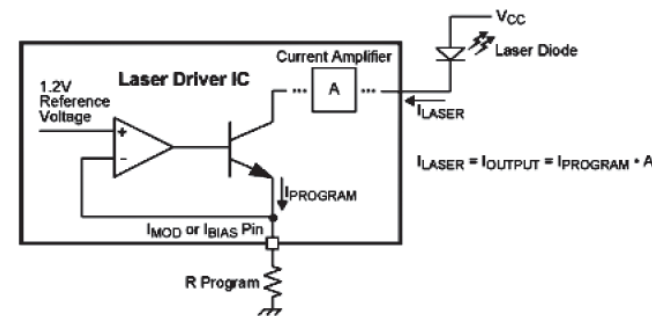
Как уже отмечалось, для управления токами модуляции и смещения раньше использовались резисторы. Как самый дешевый компонент, резистор не предоставляет возможности регулировки в режиме реального времени, а подстройка в процессе калибровки при производстве достаточно затруднена и отнимает много времени. Лучшим решением будет использовать переменный резистор, который дает возможность ручной регулировки.

Для увеличения объемов выпускаемой продукции и расширения области автоматизированных процессов механические потенциометры могут быть заменены цифровыми аналогами. Дополнительным их преимуществом теперь станет цифровое управление. Цифровое управление – это техника управления рабочим параметром (например, выходной мощностью) посредством измерения его с помощью АЦП, обработки результатов цифровым методом и использование полученных данных для

регулировки параметра (например, выходного тока драйвера лазера). Цифровой движок может компенсировать температурную зависимость лазерных драйверов. Цифроаналоговые преобразователи могут использоваться там же, где и цифровые потенциометры, и предоставлять дополнительные преимущества, в зависимости от топологии схемы.

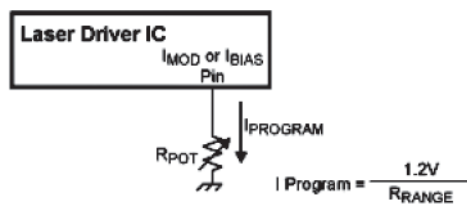
**Блок управления лазерным драйвером.** Многие драйверы имеют достаточно простую структуру, которая преобразовывает запрограммированный уровень сопротивления (RPROGRAM) в выходной ток смещения и модуляции (рисунок 53). Обычно, внутренняя схема после выводов управления током драйвера (например, I<sub>MOD</sub>, I<sub>BIAS</sub>) имеет внутренний опорный источник напряжения. Выходной ток этого источника напряжения измеряется, усиливается через усилитель тока, выход которого является выходом лазерного драйвера.

Простой резистор, подключенный между землей и данными контрольными выводами, обеспечивает непрерывный контроль тока схемы. Следует заметить, что лазерный драйвер чувствителен только к величине тока, проходящего через этот вывод, а не к значению резистора, подключенного к нему. Таким образом, резистор можно заменить ЦАП, который будет контролировать ток. Обычно, усиление усилителя тока находится в порядке 100-200 (мА/мА), а типичный выходной ток составляет до 50-80 мА.



**Рис. 53 Принципиальная схема лазерного драйвера для измерения значения программируемого резистора.**

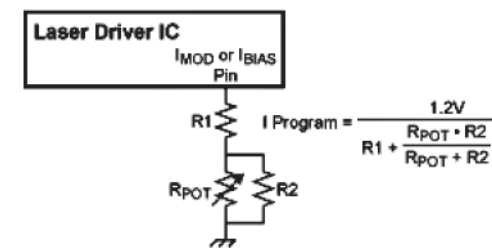
**Использование цифрового потенциометра.** Использование цифрового потенциометра вместо управляющего резистора представляется самым простым и наиболее очевидным решением (рис. 54).



**Рис. 54 Программирование драйвера лазера с помощью цифрового потенциометра.**

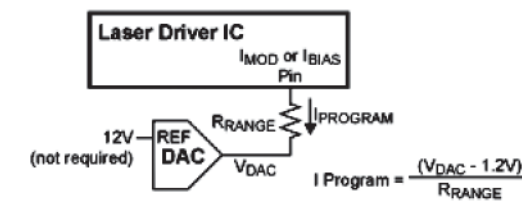
Тем не менее, номинальное сопротивление серийно выпускаемых резисторов может не совпадать с требуемым диапазоном программируемого тока. Для более точного попадания в диапазон требуемого тока можно использовать дополнительные резисторы (рис. 55). Учтите, что изменение тока обратно пропорционально изменению сопротивления. Цифровые потенциометры обычно имеют ровную шкалу подстройки сопротивления, что означает, что размер шагов программируемого тока будет больше в малом

диапазоне сопротивления потенциометра и, соответственно, меньше в высоком диапазоне сопротивления.



**Рис. 55 Программирование тока драйвера с дополнительной оптимизацией рабочего диапазона потенциометра.**

**Использование цифро-аналогового преобразователя.** Вместо цифрового потенциометра можно использовать ЦАП для управления током драйвера лазера. Вывод выходного тока ЦАП соединен с драйвером через последовательный резистор для программирования тока управляющего вывода драйвера (рис. 56). В идеале, напряжение источника опорного напряжения для ЦАП должно совпадать с внутренним опорным напряжением конкретной модели драйвера. На практике, входное напряжение для ЦАП может быть больше, но должно соответствовать характеристикам ЦАП.



**Рис. 56 Программирование тока драйвера лазера с ЦАП.**

При работе с ЦАП необходимо рассмотреть следующие моменты:

- **Линейность.** Отношение между цифровым кодом и окончательным управляющим током для цифрового потенциометра составляет 1/R. Для ЦАП это будет линейная зависимость, которая имеет два основных преимущества:

1. Линейная зависимость ЦАП имеет унифицированную разрешающую способность, размер шагов легко рассчитать, если схема может быть калибрована на соответствующую конечную точность. С потенциометрами может возникнуть проблема нежелательной величины шага по причине 1/R зависимости. Таким образом, схема может не достичь требуемого уровня точности.

2. Алгоритм управления, который используется для регулировки выходного тока и основан на измерении выходной мощности модуля, можно упростить и оптимизировать посредством программного алгоритма петли линейного управления.

- **Плотность/Размер платы.** В некоторых случаях, использование ЦАП позволит сократить площадь платы. Поскольку обычно существуют и другие причины использования ЦАП на плате, можно выбрать ЦАП с 2 внешними каналами (для коэффициента модуляции драйвера и управления током смещения). Таким образом, будет разумным поручить выполнение данной функции другой микросхеме, уже используемой на плате, чем добавлять еще одну микросхему только для решения одной задачи.

- **Разрешение.** Цифровые потенциометры с разрешением более 8 бит являются специализированной продукцией, ЦАП же

предоставляют широкий диапазон разрешений.

- **Оптимизация диапазона.** Максимальное напряжение ЦАП напрямую соответствует диапазону токов, требуемых для выбора резистора. Если требуется изменить программируемый диапазон тока драйвера, необходимо просто заменить резистор. Если же в схеме использован потенциометр, следует заменить сам потенциометр на другой номинал.

- **Работа со схемами с биполярным питанием.** Если драйвер должен работать от напряжения –5 В, для таких целей выпускается несколько моделей цифровых потенциометров. Альтернативным решением может быть использование биполярного ЦАП или аналогичную схему преобразования напряжения.

- **Взаимозаменяемость.** Большинство цифровых потенциометров имеет большую (30% и более) погрешность в номинальных значениях сопротивления. Эта погрешность настраивается в процессе калибровки. Однако, следует учитывать возможную ошибку в алгоритме калибровки. Кроме того, если необходимо понимать как распределяется напряжение для создания полной картины контроля для калибровочным процессом, данные будут более точными при непрерывном контроле.

Итак, для решения обозначенной задачи разработчики могут использовать постоянный резистор, механический потенциометр, цифровой потенциометр или ЦАП для управления токами модуляции и смещения драйвера. Преимущества ЦАП и цифрового потенциометра заключаются в их программном подходе, когда производственный процесс может быть полностью автоматизирован, а управление осуществляется цифровым методом (например, решение задачи компенсации температуры).

Применение цифрового потенциометра является более простым решением, нежели работа с ЦАП. Цифроаналоговые преобразователи же имеют ряд преимуществ, включая хорошую линейность, увеличение плотности монтажа, большой выбор разрешений, лучшая оптимизация диапазона, удобна работы с драйверами с отрицательным напряжением и хорошая взаимозаменяемость.

# АНАЛОГОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

## Цифровое управление сдвигом фазы

Для построения схемы управления сдвигом фазы потребуется минимум компонентов: цифровой потенциометр, пассивные компоненты (резисторы и конденсаторы) и операционный усилитель. Для примера будет взят потенциометр DS1669, хотя может использоваться любой потенциометр с достаточной полосой пропускания для передачи аудио сигнала.

Изменение фазочастотной характеристики сигнала без изменения его амплитудной характеристики обычно достигается с помощью частотнезависимого фильтра, как показано на рисунке 57. Изменение фазочастотной характеристики рассчитывается:

$$\frac{V_O}{V_I} = -\frac{s - \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_1 C_1}}$$

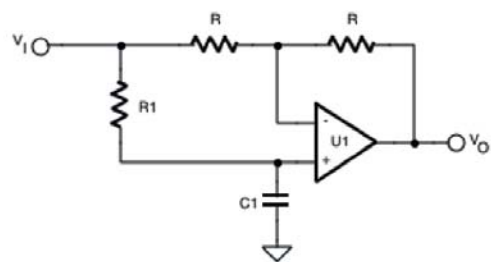


Рис. 57 Простая схема сдвига фазы с помощью частотнезависимого фильтра.

Поскольку частота сигнала варьируется от DC до бесконечности, сдвиг фазы варьируется от 0 до +180 градусов. Так же видно, что, изменяя номинал резистора R1, можно получать изменения фазового сдвига с определенной частотой. Если поменять местами R1 и C1, как показано на рисунке 58, обратная функция получает следующее выражение:

$$\frac{V_O}{V_I} = -\frac{s - \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_1 C_1}}$$

а фаза меняется в диапазоне -180...0 градусов. Сдвиг фазы, который создается такой схемой при определенной частоте, можно рассчитать по формуле:

$$Phase(rad) = \tan^{-1} \left[ \frac{\frac{2\omega}{R_1 C_1}}{\omega^2 - \left[ \frac{1}{R_1 C_1} \right]^2} \right]$$

где  $\omega$  – частоты в rad/s, или  $2\pi \cdot f$  (частота выражена в Герцах).

На практике, большинство схем такого типа может охватывать сдвиги фаз до 120 градусов с операционным усилителем и

обязочными компонентами.

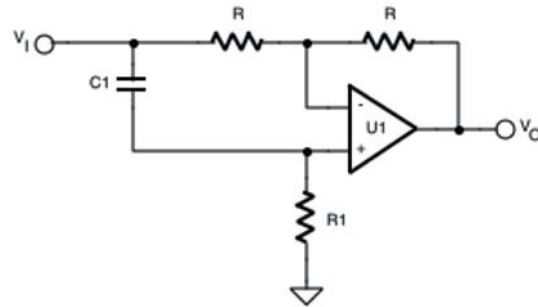


Рис. 58 На схеме с фильтром поменяли местами R1 и C1.

Цифровое управление фазным смещением. Топология схемы позволяет использовать цифровые потенциометры вместо R1. Пример схемы показан на рисунке 59. Схема оптимизирована на сдвиг фазы в аудио диапазоне, и теперь фаза управляется на определенной частоте через цифровой сигнал. Положение движка потенциометра DS1669 может устанавливаться с помощью простой линии цифрового управления. Управление движком осуществляется через импульсный интерфейс (кнопочный). Добавление генератора к цифровому входу вызовет постоянное качание фазы, эффект, часто используемый в записи современной музыки. Следует учитывать, что схема имеет одиночный источник питания, цифровой потенциометр будет иметь смещение 1/2 VCC.

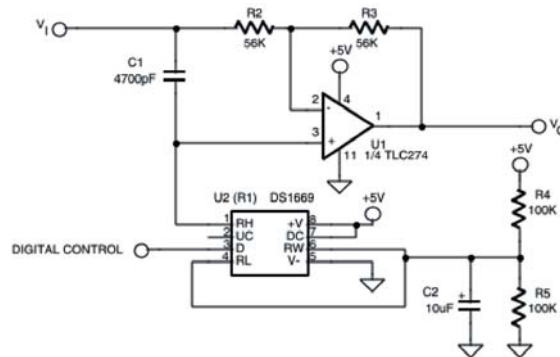


Рис. 59 Замена резистора R1 цифровым потенциометром для цифрового управления сдвигом фазы.

Эффект полного сдвига аудио фазы. Для получения большего угла сдвига фазы такие секции можно каскадировать. Для управления всеми секциями посредством микропроцессора можно использовать интегрированные сдвоенные, счетверенные и шестиренные цифровые потенциометры. Пример фазорегулятора/стерео синтезатора показан на рисунках 60-64.

Положение движков шести потенциометров, интегрированных в корпусе микросхемы DS1806, управляется посредством простого трехпроводного цифрового интерфейса, который измеряет настройки движка через DQ линии, в то время как /RST линия находится в высоком состоянии. Когда /RST снижается, движок перемещается в новое положение.

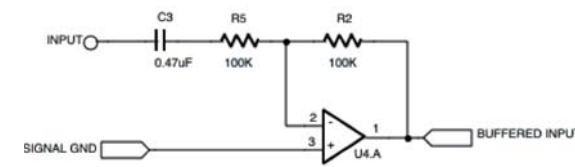


Рис. 60 Входной каскад фазорегулятора обеспечивает буферизованный сигнал, связанный по переменному току

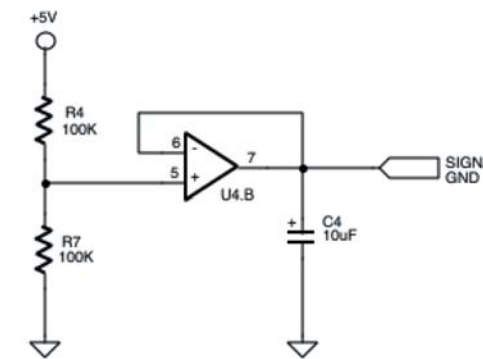


Рис. 61 Схема питается от одиночного источника, поэтому создает сигнал, заземленный для остальной цепи. U4 – операционный усилитель с одиночным питанием.

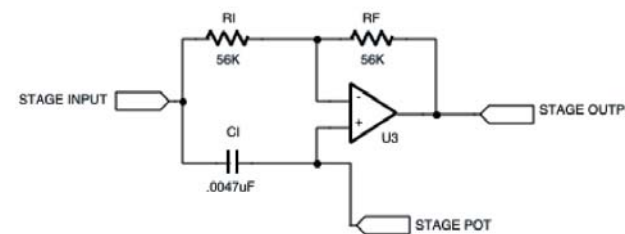


Рис. 62 Один каскад (из четырех) для сдвига фазы. Схема аналогична рис.3 за исключением резистора R1, который заменен секцией шестиренного потенциометра, обозначенного как «stage pot».

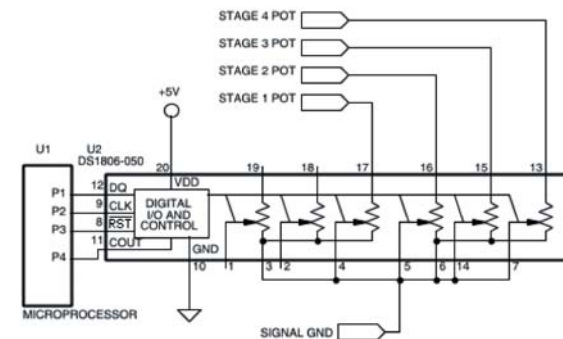


Рис. 63 Четыре секции DS1806 используются для управления сдвигом фазы каждого каскада с помощью микропроцессора. Учтите, что две секции потенциометра не используются, и могут быть применены, например, для контроля уровня громкости.

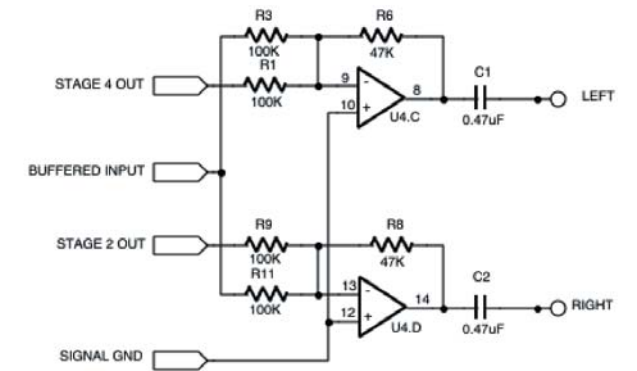


Рис. 64 Последний выходной каскад представляет собой микшер, который объединяет выходные сигналы разных каскадов для создания фазового вектора, а также псевдостерео выхода.

# ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ДЛЯ РЕГУЛИРОВКИ КОНТРАСТА

## Управление контрастом ЖК дисплеев

Для отображения текста и изображений производители портативного оборудования, рабочих станций, портативных компьютеров, мобильных телефонов и видео игр используют плоские дисплеи. Для регулировки контраста и яркости дисплеев традиционно использовались механические потенциометры. Однако сегодня им на смену приходят цифровые устройства управления.

Для иллюстрации схемы с цифровым управлением яркостью и контрастом будут использованы два цифровых потенциометра семейства Dallstat DS1668/DS1669, которые на практике могут быть заменены любым другим цифровым потенциометром. Модели DS1668/DS1669 были выбраны благодаря их простому кнопочному интерфейсу управления положением движка. Кнопочный интерфейс наиболее удобен для подстройки контраста плоских ЖК дисплеев и по своей сути очень близок к традиционным механическим потенциометрам. Особенно важно то, что DS1668/DS1669 имеют встроенный блок энергонезависимой памяти, который сохраняет положение среднего контакта после выключения питания системы. Замена механического компонента на цифровой дает дополнительные преимущества в области управления, надежности и автоматизации производства конечной продукции.

Помимо этого, управление DS1669 может осуществляться через центральный процессор. Такая гибкость в применении не доступна при работе с механическими переменными резисторами.

Поскольку DS1669 является интегрированным монолитным решением без подвижных частей, его надежность по сравнению с традиционными решениями не оспорима.

В схеме регулировки контраста потенциометр DS1669 можно расположить на плате в стороне от кнопки соответствующей секции панели управления дисплеем. DS1669 выпускаются в стандартных DIP-8 и SOIC-8 корпусах для автоматизированного монтажа на плату.

**Жидкокристаллические дисплеи.** ЖК дисплеи можно разделить на две категории: цифробуквенные и графические модули. Каждый из них, в зависимости от требований к источнику питания, имеет вход управляющего напряжения, которое в большинстве случаев может изменяться для регулировки контраста.

Контраст дисплея может меняться вследствие изменения приложенного управляющего напряжения или температуры окружающей среды. Температурные изменения обычно имеют нежелательный эффект, значительно ухудшая контрастность экрана. Для регулировки управляющего напряжения используется переменный резистор в тех случаях, где увеличение напряжения может «перекрыть» эффект температурного сдвига. Но самым важным моментом является то, что потенциометр позволяет удовлетворить любые желания пользователя по отношению к яркости и контрастности экрана.

**Цифробуквенные ЖК модули.** Цифробуквенные индикаторы имеют небольшие габаритные размеры и используются в портативных системах. Требования к питанию таких модулей сводятся к источнику одиночного питания 5В, который питает как ЖК дисплей, так и драйвер логики. Дополнительное напряжение необходимо для обеспечения питанием управляющих функций ЖКД (рис. 65). Управляющее напряжение модуля  $V_o$  снимается с потенциометра  $V_R$ . Типичное номинальное значение таких потенциометров колеблется в диапазоне 10–20 кОм. Такие же

номиналы имеют модели потенциометров серии DS1669.

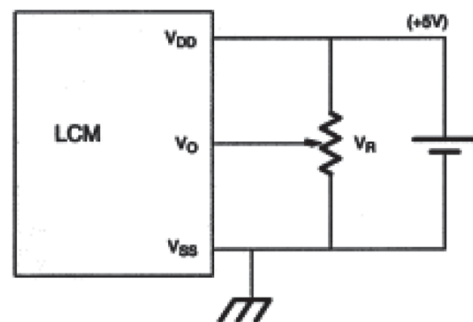


Рис. 65 Конфигурация питания ЖК цифробуквенного дисплея.

Потенциометр DS1669 подходит для любых ЖК модулей, имеющих аналогичные условия питания. На рисунке 66 показана конфигурация DS1669, которая удовлетворяет всем требованиям по питанию и управляющему напряжению ЖК модулей, представленных на схеме 65. Устройство подключено как простая кнопка для управления перемещением среднего контакта. Также, можно использовать топологию двойной кнопки. Одно- и двухкнопочное управление описано ниже.

Вывод движка,  $R_w$  потенциометра DS1669 напрямую подключается к контакту управляющего напряжения ЖК модуля,  $V_o$ . Для схемы питания, представленной на рис. 65, для работы DS1669 с ЖК модулем больше не требуется дополнительных компонентов.

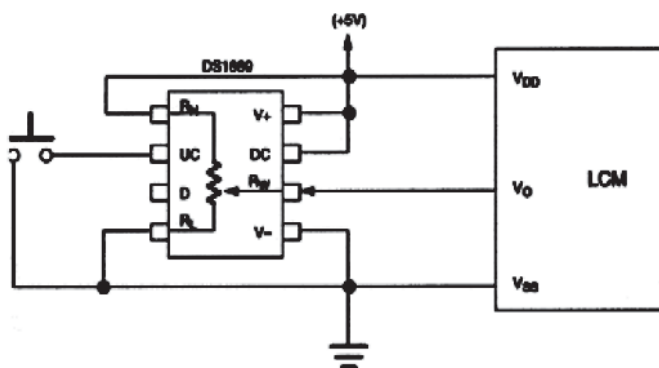


Рис. 66 ЖК модуль с DS1669.

**Графические ЖК модули.** Графические модули значительно превосходят по габаритам цифробуквенные дисплеи и работают с различными напряжениями питания. Как показано на рисунке 67, питающая часть для таких модулей состоит из источника питания 5В для питания логики и  $V_{LCD}$  входа для питания модуля. Управляющее напряжение  $V_o$ , которое контролирует контраст, снимается с комбинированного источника логики 5В и  $V_{LCD}$  питания модуля через потенциометр R. Как и в случае с цифробуквенными дисплеями, номинальное значение потенциометра колеблется в пределах 10–20 кОм. Напряжение на контакте  $V_o$  находится в диапазоне от 0 до  $(V_{LCD} + 5В)$ . Напряжение питания  $V_{LCD}$  зависит от типа используемого графического дисплея.

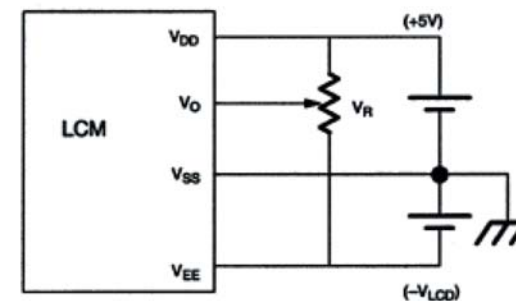


Рис. 67 Конфигурация питания графического модуля.

Диапазон напряжения  $V_o$  предотвращает прямое использование DS1669, а также других потенциометров, выпускаемых Dallas Semiconductor. Для нивелирования сложностей с максимальным предельным током движка и высоким напряжением, требуемым для данной схемы, цифровой потенциометр используется вместе с операционным усилителем (рис. 68). Назначение операционного усилителя заключается в генерировании управляющего напряжения,  $V_o$ , которое выходит за пределы спецификации при работе с цифровым потенциометром. Кроме того, операционный усилитель ограничивает величину тока, протекающего через движок, и обеспечивает полный диапазон управляющего напряжения для ЖК модуля.

5-вольтовый источник питания, используемый для питания логической схемы модуля, также используется для питания потенциометра DS1669 (см. рис. 68). Потенциометр работает как аттенюатор 5-вольтового входного сигнала для неинвертированного вывода операционного усилителя.

Выход операционного усилителя управляет напряжением контраста ЖК модуля,  $V_o$  и рассчитывается по формуле:

$$\text{eq. (1)} \quad V_o = 5n/63 * (1 + R_2/R_1) - 5(R_2/R_1) \quad (n = 0..63)$$

где N – количество положений движка потенциометра. Номинальные значения резисторов R1 и R2 выбираются по формуле:

$$\text{eq. (2)} \quad R_2/R_1 = V_{LCD}/5$$

Выбор резисторов R1 и R2 позволяет менять выходное напряжение операционного усилителя в зависимости от номинального питания ЖК графического модуля (подаваемое на контакт  $V_o$ ). Вывод среднего контакта напрямую подключается к неинвертируемому выводу операционного усилителя, как показано на схеме 60. Также, рекомендуется использовать диод Шоттки D1 (типа 1N5818 или аналог) для обеспечения дополнительной защиты от бросков питания на этапе его включения и выключения.

**Принцип работы DS1669.** Как уже отмечалось, потенциометр DS1669 имеет простой кнопочный интерфейс UDC (Up/Down Control).

Микросхема DS1669 может быть сконфигурирована как на управление при помощи одной кнопки, так и на управление с двумя кнопками. При этом цифровой вход D дает возможность управления потенциометром с помощью микроконтроллера или процессора. На схемах 69 и 70 показаны обе конфигурации, соответственно. Замыкание контактов определяется как переход от высокого уровня к низкому на высоком контакте (UC), низком контакте (DC) или цифровом входе (D). Эти входы являются неактивными в высоком состоянии.

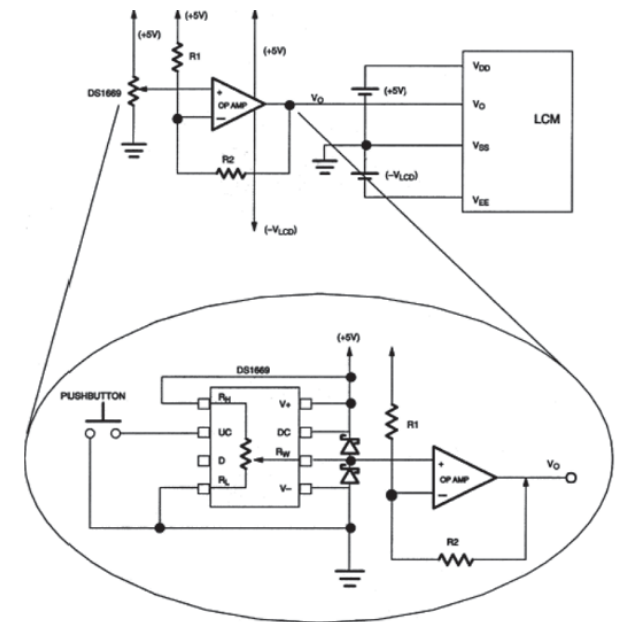


Рис. 68 Конфигурация с операционным усилителем для питания ЖК графического модуля.

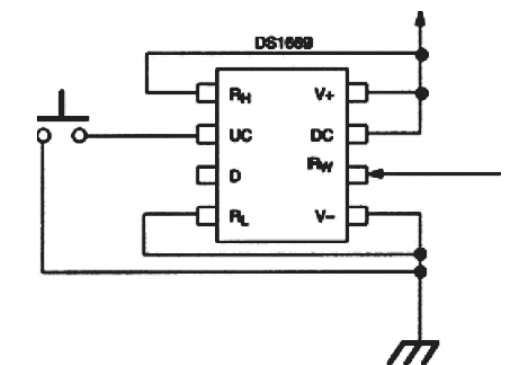


Рис. 69 Однокнопочная конфигурация DS1669

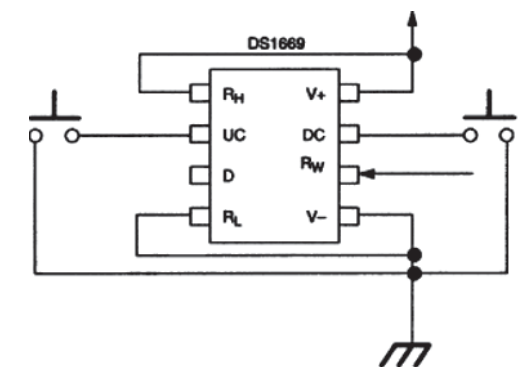


Рис. 70 Типовая схема включения DS1669 (две кнопки)



Микросхема использует ширину входного импульса как средство управления передвижением движка. Одиночный входной импульс на входах UC, DC или D изменяет положение движка на 1/64 по отношению к конечному сопротивлению потенциометра. Переход к высокому или низкому уровню на этих входах активизирует работу устройства и приводит к замыканию контакта. Одиночный импульс срабатывания должен превышать 1 мс, но длиться не дольше 1 с. Это показано на рис. 71а.

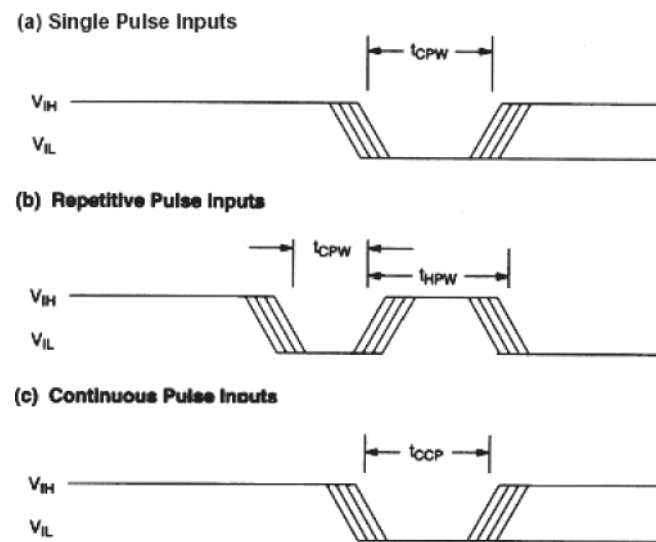


Рис. 71 Диаграмма временных параметров

Повторяющиеся импульсы на входах потенциометра могут использоваться для более быстрого перемещения движка (рис. 71б). Требования к входным повторяющимся импульсам следующие: они должны быть разделены интервалом не менее 1 мс. В противном случае, DS1669 расценивает их как одиночный импульс.

Импульсы продолжительностью более секунды приведут к непрерывному перемещению движка через каждые 100 мс после первой секунды. Суммарное время достижения предельного значения потенциометра при непрерывном импульсе можно рассчитать по формуле:

$$1 \text{ (сек)} + 63 \times 100 \text{ мс} = 7,3 \text{ (сек)}$$

Однокнопочная конфигурация позволяет пользователю контролировать положение движка в обоих направлениях посредством одной кнопки. На рисунке 69 показана типичная конфигурация такой схемы. Вход UC используется для увеличения и уменьшения сопротивления движка, т.е. осуществляет режим однокнопочной работы. DC вход не имеет рабочих функций в таком режиме, но контакт должен быть подключен к положительному источнику питания ( $V_{CC}$ ). Цифровой вывод (D) находится в холостом режиме.

При включении питания устройства, необходимо развести схему так, как показано на рисунке 70, тогда потенциометр обеспечит однокнопочный режим работы. DC вход должен быть обязательно подключен к источнику положительного напряжения ( $V_{CC}$ ). Направление движения среднего контакта при однокнопочной конфигурации определяется первичным шагом. Изменение направления движения движка осуществляется посредством периода бездействия на входе UC в течение секунды и более. Также, при однокнопочной конфигурации, когда движок достигает своего конечного положения, его направление меняется. Это произойдет вне зависимости от того, поступает ли на вход постоянный,

непрерывный, или одиночный импульс.

При включении потенциометра в конфигурацию с двумя кнопками каждое направление движка управляется повышающим контактом UC и понижающим контактом DC, соответственно. Для изменения положения движка в двухкнопочном режиме нет режима ожидания. При достижении движком своего крайнего положения, направления его движения не меняется. Положение движка зафиксировано в конечной точке, пока не активизируется входной контакт обратного движения. Все контакты управления кнопкой UC, DC и D, внешне нагружаются резистором 100 кОм. Выводы UC и DC имеют внутреннюю защиту от дребезга контактов и не требуют внешних компонентов для формирования сигнала.

**Энергонезависимая память положения движка.** При отключении питания микросхема DS1669 запоминает последнее положение движка. Эта функция обеспечивается встроенным блоком EEPROM памяти. В нормальном режиме работы положение движка определяется входным мультиплексором. Периодически, мультиплексор обновляет данные EEPROM ячеек памяти. Порядок обновления ячеек был оптимизирован разработчиками для большей надежности, износоустойчивости и эффективности. Кроме того, операция апдейта полностью открыта для пользователя. Если изменяются установки Dallastat после включения питания, новое значение сохраняется с задержкой до 2 секунд.

После сохранения первоначальных измерений, последующие изменения в структуре EEPROM памяти возникнут только если положение движка изменится больше, чем на 12.5% от конечного сопротивления потенциометра. Любые другие изменения после включения питания, меньше 12.5%, не сохраняются в ячейках EEPROM памяти. Поскольку Dallastat имеет 64-1 мультиплексор, изменения на 12.5% соответствуют изменению четвертого младшего разряда (LSB).

Изменения или сохранение в EEPROM память имеют 2-секундную задержку для гарантированного обновления данных. EEPROM память имеет 80,000 номинальных циклов записи. Если память выработала свой полный ресурс, Dallastat сохранит свою функциональность, пока включено питание. Однако, повторное включения питания вернет потенциометр на тот уровень сопротивления, который был сохранен последним перед износом памяти.

## СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ЦИФРОВЫХ ПОТЕНЦИОМЕТРОВ

MAXIM-DALLAS производит широкую гамму цифровых потенциометров, которые подходят для большинства применений на замену обычным механическим потенциометрам.

## ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ

### Выбор цифровых потенциометров



# ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ

С энергонезависимой памятью движка

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
DS1847	Сдвоенный потенциометр с датчиком температуры	2	2-Wire Addressable	256	10+50	20	850	-	1000	Resistance-Temp. Lookup Table, Fiber Communications	128-byte User EEPROM, EEPROM Wiper Memory, Resistance-Temp. Lookup Table	-	3-5.5	TSSOP-14, CSBGA-16
DS1848	Сдвоенный потенциометр с датчиком температуры и дополнительной пользовательской памятью	2	2-Wire Addressable	256	10+50	20	850	-	1000	Resistance-Temp. Lookup Table, Fiber Communications	128-byte User EEPROM, EEPROM Wiper Memory, Resistance-Temp. Lookup Table	-	3-5.5	TSSOP-14, CSBGA-16
DS1845	Сдвоенный потенциометр с дополнительной пользовательской памятью	2	2-Wire Addressable	100+256	10+50, 10+100, 10+10	20	750	250	40	GBIC, Fiber Communications	256-byte User EEPROM, EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	CSBGA-16, TSSOP-14, 14/FCHIP
DS1846	Строенный потенциометр с дополнительной пользовательской памятью, CPU микромонитор	3	2-Wire Addressable	100+256	10+100	20	750	300	200	Microprocessor Reset, Pwr-Fail Detect, Fiber Communications	256-byte User EEPROM, EEPROM Wiper Memory	-	4.5-5.5	TSSOP-20
DS1855	Сдвоенный потенциометр с памятью защиты	2	2-Wire Addressable	100+256	10+50, 10+100, 10+10, 10+20	20	750	250	60	GBIC, Fiber Communications	256-byte User EEPROM, GBIC, EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	CSBGA-16, TSSOP-14
DS1870	PC контроллер формирования смещения усилителей мощности	2	2-Wire	256	50	20	850	400	-	-	32 bytes user EEPROM, Dual Temp controlled pots, 12-bit ADC, EEPROM Wiper Memory	-	3-5.5	TSSOP-16
DS1669	Электронный цифровой реостат Dallastat	1	Contact-Closure	64	50, 10, 100	20	750	400	65	-	EEPROM Wiper Memory	-	5-8	SOIC-8, 8/PDIP
DS1804	Подстроечный потенциометр	1	Increment-Decrement	100	50, 10, 100	20	750	400	40	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	uSOP-8, SOIC-8, 15/FCHIP, 8/PDIP
DS1809	Dallastat потенциометр	1	Contact-Closure	64	50, 10, 100	20	750	400	25	-	EEPROM Wiper Memory	-	4.5-5.5	SOIC-8, uSOP-8, 8/PDIP
DS1867	Сдвоенный цифровой потенциометр с EEPROM памятью	2	3-Wire Serial	256	50, 10, 100	20	750	400	250	-	EEPROM Wiper Memory	-	4.5-5.5	TSSOP-20, SOIC-16, PDIP-14
DS1869	3В электронный цифровой реостат Dallastat	1	Contact-Closure	64	50, 10, 100	20	750	400	10	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-8	8/PDIP, SOIC-8
DS3902	Сдвоенный потенциометр с пользовательской памятью	2	2-Wire Addressable	256	50 + (30 or 15)	20	300	160	200	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	-	2.4-5.5	uSOP-8
DS3903	Строенный 128-позиционный потенциометр	3	2-Wire Addressable	128	10+10+90	20	300	250	250	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	TSSOP-20
DS3904	Строенный 128-позиционный потенциометр с переключением в высокоомное состояние	3	2-Wire Addressable	128	20	25	125	-	200	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	uSOP-8
DS3905	Строенный 128-позиционный потенциометр с переключением в высокоомное состояние	3	2-Wire Addressable	128	20	25	125	-	200	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	uSOP-10
DS4301	32-позиционный цифровой потенциометр	1	Increment-Decrement	32	200	20	250	500	60	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.4-5.5	SOIC-8, uSOP-8
MAX5417	50 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C	1	2-Wire Serial	256	50	-	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	-

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5418	100 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C	1	2-Wire Serial	256	100	-	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5419	100 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C	1	2-Wire Serial	256	200	-	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5422	50 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом SPI	1	3-Wire Serial SPI	256	50	25	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5423	100 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом SPI	1	3-Wire Serial SPI	256	100	25	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5424	200 кОм, 256-позиционный потенциометр с интерфейсом SPI	1	3-Wire Serial SPI	256	200	25	50	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5432	50 кОм 32-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C, резистивный делитель	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	610	2	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5433	100 кОм 32-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C, резистивный делитель	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	610	2	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	THIN QFN-8
MAX5434	50 кОм 32-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C, резистивный делитель	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	610	2	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	SOT-23-6
MAX5435	100 кОм 32-позиционный потенциометр с интерфейсом I2C, резистивный делитель	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	610	2	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	SOT-23-6
MAX5471	50 кОм 32-позиционный потенциометр с кнопочным интерфейсом Up/Down	1	Increment-Decrement	32	50	-	35	600	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	SOT-23-6
MAX5472	100 кОм 32-позиционный потенциометр с кнопочным интерфейсом Up/Down	1	Increment-Decrement	32	100	-	35	600	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	SOT-23-6
MAX5474	50 кОм 32-позиционный потенциометр с кнопочным интерфейсом Up/Down	1	Increment-Decrement	32	50	-	35	600	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	8/SOT-23
MAX5475	100 кОм 32-позиционный потенциометр с кнопочным интерфейсом Up/Down	1	Increment-Decrement	32	100	-	35	600	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	8/SOT-23
MAX5477	Сдвоенный 10 кОм 256-позиционный потенциометр с I2C интерфейсом	2	2-Wire Serial	256	10	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16
MAX5478	Сдвоенный 50 кОм 256-позиционный потенциометр с I2C интерфейсом	2	2-Wire Serial	256	50	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16, THIN QFN-16
MAX5479	Сдвоенный 100 кОм 256-позиционный потенциометр с I2C интерфейсом	2	2-Wire Serial	256	100	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16, THIN QFN-16
MAX5481	Сдвоенный 10 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель напряжения)	1	3-Wire Serial SPI	1024	10	25	35	-	1	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одночное питание, В	Тип корпуса
MAX5482	Сдвоенный 50 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель напряжения)	1	3-Wire Serial SPI	1024	50	25	35	-	1	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16
MAX5483	Сдвоенный 10 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель напряжения)	1	3-Wire Serial SPI	1024	10	25	35	-	1	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16
MAX5484	Сдвоенный 50 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель напряжения)	1	3-Wire Serial SPI	1024	50	25	35	-	1	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16
MAX5487	Сдвоенный 10 кОм 256-позиционный потенциометр с SPI интерфейсом	2	3-Wire Serial SPI	256	10	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16
MAX5488	Сдвоенный 50 кОм 256-позиционный потенциометр с SPI интерфейсом	2	3-Wire Serial SPI	256	50	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16, THIN QFN-16
MAX5489	Сдвоенный 100 кОм 256-позиционный потенциометр с SPI интерфейсом	2	3-Wire Serial SPI	256	100	25	35	325	1	-	EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.25	TSSOP-14, THIN QFN-16, THIN QFN-16
MAX5494	Сдвоенный 10 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель напряжения)	2	3-Wire Serial SPI	1024	10	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5495	Сдвоенный 50 кОм 1024-позиционный потенциометр (делитель)	2	3-Wire Serial SPI	1024	50	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5496	Сдвоенный 1024-позиционный 10 кОм переменный резистор	2	3-Wire Serial SPI	1024	10	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5497	Сдвоенный 1024-позиционный 50 кОм переменный резистор	2	3-Wire Serial SPI	1024	50	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5498	Сдвоенный 1024-позиционный 10 кОм переменный резистор/делитель напряжения	2	3-Wire Serial SPI	1024	10	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5499	Сдвоенный 1024-позиционный 50 кОм переменный резистор/делитель напряжения	2	3-Wire Serial SPI	1024	50	25	35	-	1.5	Power Supply Cal., Fiber Communications	EEPROM Wiper Memory	2.5	2.7-5.25	THIN QFN-16
MAX5128	128-позиционный потенциометр Digipot 2x2 мм	1	Increment-Decrement	128	22	25	50	600	1.5	Precision Voltage Divider, Low Step Size Applications, Portable Consumer, Bias Adjustment, Power Supply Cal., Backlight Adjustment, Vcom Adjustment, Fiber Communications	Low THD+N and Crosstalk, EEPROM Wiper Memory, Custom Programmed Resistance Response	-	2.7-5.5	MicroDFN-8
MAX5427	100 кОм цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	uMAX-8, THIN QFN-8
MAX5428	50 кОм цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	uMAX-8, THIN QFN-8
MAX5429	10 кОм цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	32	10	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	uMAX-8, THIN QFN-8
MAX5527	100 кОм 64-позиционный цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	64	100	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	uMAX-8, THIN QFN-8

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5528	50 кОм 64-позиционный цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	64	50	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	µMAX-8, THIN QFN-8
MAX5529	10 кОм 64-позиционный цифровой потенциометр с OTP памятью	1	2-Wire Serial	64	10	25	35	100	1.5	-	One Time Programmable	-	2.7-5.5	µMAX-8, THIN QFN-8
DS3930	Шесть 256-позиционных потенциометров с 4-мя программируемыми I/O и пользовательской памятью	6	2-Wire Addressable	256	16.6	20	250	400	350	-	Varactor Tuning for RF Applications, EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	TSSOP-20

С энергозависимой памятью движка

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
DS1267	Два потенциометра на кристалле	2	3-Wire Serial	256	50, 10, 100	20	750	400	22	-	4.5-5.5	TSSOP-20, SOIC-16, PDIP-14
DS1803	Сдвоенный потенциометр с адресуемым 2-проводным интерфейсом	2	2-Wire Addressable	256	50, 10, 100	20	750	400	40	-	2.7-5.5	SOIC-16, PDIP-16, TSSOP-14
DS1805	Сдвоенный потенциометр с адресуемым 2-проводным интерфейсом	1	2-Wire Addressable	256	50, 10, 100	20	550	400	40	-	2.7-5.5	SOIC-16, TSSOP-14
DS1806	6 потенциометров в одном корпусе	6	3-Wire Serial	64	50, 10, 100	20	750	400	40	-	2.7-5.5	PDIP-20, TSSOP-20, SOIC-20
DS1844	Счетверный потенциометр	4	2-Wire or 5-Wire Serial	64	50, 10, 100	20	750	400	40	-	2.7-5.5	TSSOP-20, PDIP-20, SOIC-20
DS1868	Два потенциометра на кристалле	2	3-Wire Serial	256	50, 10, 100	20	750	400	1	-	4.5-5.5	TSSOP-20, PDIP-14, SOIC-16
DS4302	5 бит ЦАП с 3 программируемыми цифровыми выходами	1	2-Wire Serial	32	-	-	-	-	300	-	4.5-5.5	SOIC-8
MAX5160	Малопотребляющий, 32-позиционный потенциометр в 8-выводном корпусе	1	3-Wire Serial	32	200, 50, 100	25	50	400	10	-	2.7-5.5	µMAX-8
MAX5161	Малопотребляющий, 32-позиционный потенциометр в 6-выводном корпусе SOT23	1	3-Wire Serial	32	200, 50, 100	25	50	400	10	-	2.7-5.5	SOT-23-6
MAX5400	Малопотребляющий, 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный корпус SOT23	1	3-Wire Serial	256	50	25	50	250	5	-	2.7-5.5	8/SOT-23
MAX5401	Малопотребляющий, 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный корпус SOT23	1	3-Wire Serial	256	100	25	50	250	5	-	2.7-5.5	8/SOT-23
MAX5402	Малопотребляющий, 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный корпус	1	3-Wire Serial	256	10	25	50	250	5	-	2.7-5.5	µMAX-8
MAX5403	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный 10-выводной корпус	2	3-Wire Serial SPI	256	10	25	35	275	5	-	2.7-5.5	µMAX-10

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5404	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный 10-выводной корпус	2	3-Wire Serial SPI	256	50	25	35	275	5	-	2.7-5.5	µMAX-10
MAX5405	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, миниатюрный 10-выводной корпус	2	3-Wire Serial SPI	256	100	25	35	275	5	-	2.7-5.5	µMAX-10
MAX5413	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, TSSOP-14	2	3-Wire Serial SPI	256	10	25	35	275	5	-	2.7-5.5	TSSOP-14
MAX5414	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, TSSOP-14	2	3-Wire Serial SPI	256	50	25	35	275	5	-	2.7-5.5	TSSOP-14
MAX5415	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, минимальный ТК, TSSOP-14	2	3-Wire Serial SPI	256	100	25	35	275	5	-	2.7-5.5	TSSOP-14
MAX5436	Высоковольтный ±15В потенциометр на 128 положений, минимальный ТК	1	3-Wire Serial SPI	128	50	25	35	900	60	15	10-30	µMAX-10
MAX5437	Высоковольтный ±15В потенциометр на 128 положений, минимальный ТК, с операционным усилителем	1	3-Wire Serial SPI	128	50	25	35	900	60	15	10-30	TSSOP-14
MAX5438	Высоковольтный ±15В потенциометр на 128 положений, минимальный ТК	1	3-Wire Serial SPI	128	100	25	35	900	60	15	10-30	µMAX-10
MAX5439	Высоковольтный ±15В потенциометр на 128 положений, минимальный ТК, с операционным усилителем	1	3-Wire Serial SPI	128	100	25	35	900	60	15	10-30	TSSOP-14
MAX5450	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	10	25	35	225	2	-	2.7-5.5	µMAX-10
MAX5451	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	10	25	35	225	2	-	2.7-5.5	TSSOP-14
MAX5452	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	50	25	35	225	2	-	2.7-5.5	µMAX-10
MAX5453	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	50	25	35	225	2	-	2.7-5.5	TSSOP-14
MAX5454	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	100	25	35	225	2	-	2.7-5.5	µMAX-10
MAX5455	Сдвоенный потенциометр на 256 положений, с кнопочным интерфейсом Up/Down	2	Increment-Decrement	256	100	25	35	225	2	-	2.7-5.5	TSSOP-14

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5460	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2-проводным интерфейсом	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	600	24	-	2.7-5.5	5/SC-70
MAX5461	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2-проводным интерфейсом	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	600	24	-	2.7-5.5	SC-70
MAX5462	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2-проводным интерфейсом	1	2-Wire Serial	32	100	25	35	600	24	-	2.7-5.5	SC-70
MAX5463	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	600	24	-	2.7-5.5	5/SC-70
MAX5464	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	600	24	-	2.7-5.5	SC-70
MAX5465	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	50	25	35	600	24	-	2.7-5.5	SC-70
MAX5466	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	10	25	35	160	24	-	2.7-5.5	SOT-23-5
MAX5467	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	10	25	35	160	24	-	2.7-5.5	SOT-23-6
MAX5468	Малопотребляющий потенциометр FleaPot на 32 положения без дребезга контактов с 2	1	2-Wire Serial	32	10	25	35	160	24	-	2.7-5.5	SOT-23-6

## ПОТЕНЦИОМЕТРЫ С ЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Наименование	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
DS1881	Сдвоенный потенциометр	2	I2C interface	Non-Volatile	64	45	20	30	160	200	Audio Control, Car Stereo, Portable Audio, Notebook and PC Audio	Low THD+N and Crosstalk, Zero-Crossing Detector, User-Configurable Attenuation Options, EEPROM Wiper Memory	-	2.7-5.5	SOIC-16, TSSOP-16
DS1882	Сдвоенный потенциометр	2	I2C interface	Non-Volatile	64	45	20	30	160	200	Audio Control, Car Stereo, Portable Audio, Portable Consumer, Notebook and PC Audio	Low THD+N and Crosstalk, Zero-Crossing Detector, +/-7V Signal Levels, User-Configurable Attenuation Options, EEPROM Wiper Memory	7	---	SOIC-16, TSSOP-16
DS1666	Цифровой потенциометр для аудио применений	1	Increment-Decrement	Volatile	128	50, 10, 100	20	750	350	-	-	-	5	4.5-5.5	SOIC-16, PDIP-14
DS1801	Сдвоенный потенциометр	2	3-Wire Serial	Volatile	64	45	20	750	400	50	Audio Control, Stereo Volume Control, Car Stereo, Portable Audio, Portable Consumer	Mute, User-Configurable Attenuation Options	-	2.7-5.5	SOIC-16, PDIP-14, TSSOP-14

Наименование	Описание	Кол-во резисторов	Интерфейс	Разрешение	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мА	Наименование	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одночное питание, В	Тип корпуса
DS1802	Сдвоенный потенциометр с кнопочным интерфейсом	2	3-Wire Serial and Push-button (inc-dec)	Volatile	64	45	20	750	400	80	Audio Control, Stereo Volume Control, Desktop Speakers, Car Stereo, Portable Audio, Portable Consumer	Mute, User-Configurable Attenuation Options, Ultra Low Power Consumption	-	2.7-5.5	TSSOP-20, PDIP-20, SOIC-20
DS1807	Адресуемый двухканальный потенциометр	2	2-Wire Addressable	Volatile	64	45	20	750	400	40	Audio Control, Desktop Speakers, Car Stereo, Portable Audio	Zero-Crossing Detector, Mute, Ultra Low Power Consumption	-	2.7-5.5	PDIP-14, TSSOP-14, SOIC-16
DS1808	Сдвоенный высоковольтный биполярный аудио потенциометр	2	2-Wire Addressable	Volatile	32	45	20	750	300	25	-	Mute, High Voltage Bipolar Compatibility, ±12V Audio Taper	12	4.5-5.5	SOIC-16
DS1866	Подстроечный потенциометр	1	3-Input Parallel	Volatile	8	10	20	750	400	50	Audio Control	-	-	2.7-5.5	SOIC-8, 8/PDIP
MAX5406	Стере аудио процессор с управлением громкостью, басов, дисканта, псевдостерео и кнопочным интерфейсом	6	Debounced Pushbutton Up+Down	Volatile	32	-	-	-	-	13	Automotive Back-Seat Multimedia, Multimedia Docking Stations, Audio Control, Desktop Speakers, Portable Audio	Low THD+N and Crosstalk, Debounced Pushbutton Controls, Internal Passive RF Rejection Filters	2.7	4.5-5.5	TSSOP-48
MAX5407	32-позиционный цифровой потенциометр	1	Direction+Clock	Volatile	32	20	25	35	400	0.35	-	-	-	2.7-5.5	8/SOT-23
MAX5408	Сдвоенный цифровой потенциометр	2	3-Wire Serial SPI	Volatile	32	10	30	35	1000	0.2	-	-	-	2.7-3.6	THIN QFN-16, QSOP-16
MAX5409	Сдвоенный цифровой потенциометр	2	3-Wire Serial SPI	Volatile	32	10	30	35	1000	0.2	-	Dual Wipers Per Resistor String	-	2.7-3.6	THIN QFN-16, QSOP-16
MAX5410	Сдвоенный цифровой потенциометр	2	3-Wire Serial SPI	Volatile	32	10	30	35	1000	0.2	-	-	-	4.5-5.5	THIN QFN-16, QSOP-16
MAX5411	Сдвоенный цифровой потенциометр	2	3-Wire Serial SPI	Volatile	32	10	30	35	1000	0.2	-	Dual Wipers Per Resistor String	-	4.5-5.5	THIN QFN-16, QSOP-16
MAX5440	Стере контроль громкости с энкодером	2	Rotary Encoder	Volatile	32	40	30	35	1	1.4	Automotive Back-Seat Multimedia, Multimedia Docking Stations, Stereo Volume Control, Desktop Speakers, Set-Top Boxes	Low THD+N and Crosstalk, Buffered Wiper Outputs, Zero-Crossing Detector, Five-Segment LED Display Driver, Rotary Encoder Interface	2.7	2.7-5.5	SSOP-24
MAX5456	Стере аудио потенциометр с кнопочным интерфейсом	2	Debounced Pushbutton Up+Down	Volatile	32	10	30	50	1000	1	Audio Control	-	2.5	2.7-5.5	QSOP-16
MAX5457	Стере аудио потенциометр с кнопочным интерфейсом	2	Debounced Pushbutton Up+Down	Volatile	32	10	30	50	1000	1	Audio Control	-	2.5	2.7-5.5	QSOP-16
MAX5486	Стере контроль громкости с кнопочным интерфейсом, драйвер 5-сегментных светодиодных шкал	2	Debounced Pushbutton Up+Down	Volatile	32	40	30	50	-	1.4	Multimedia Docking Stations, Stereo Volume Control, Desktop Speakers, Portable Audio, Set-Top Boxes, Automotive Back-Seat Multimedia, Audio Control, Car Stereo	Buffered Wiper Outputs, Debounced Pushbutton Controls, Five-Segment LED Display Driver	2.7	2.7-5.5	TSSOP-24

## ОПТОВОЛОКОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Наименование	Описание	Особенности	АЦП	Разрешение, бит	ЦАП, потенц., резист.	FS выход	Кол-во шагов	Датчик температуры	Память	Одночное питание, В	Интерфейс	Тип корпуса	Рабочая температура, °C	Тип корпуса
DS1852	Диагностический монитор трансивера	Complies or Compatible to SFF-8472, User EEPROM, External Calibration, Alarm/Warning Flags, Internal Calibration	5-input muxable	12	None	None	None	internal	EEPROM	3, 3.3, 5	2-Wire	25/CSBGA	-40 to +100	TSSOP-14, CSBGA-16



Наименование	Описание	Особенности	АЦП	Разрешение, бит	ЦАП, потенц., резист.	FS выход	Кол-во шагов	Датчик температуры	Память	Одиночное питание, В	Интерфейс	Тип корпуса	Рабочая температура, °C	Тип корпуса
DS1854	Сдвоенные резисторы с датчиком температуры, монитор 2 внешних сигналов	Complies or Compatible to SFF-8472, User EEPROM, Alarm Flags, External Calibration, Look-Up Table Compensation	4-input muxable	12	2 resistors	50kohms	256	internal	EEPROM	3.3, 5	2-Wire	TSSOP-16, CSBGA-16	-40 to +95	TSSOP-14, CSBGA-16
DS1857	Сдвоенные резисторы с датчиком температуры, монитор 2 внешних сигналов	Complies or Compatible to SFF-8472, User EEPROM, Alarm Flags, External Calibration, Look-Up Table Compensation	4-input muxable	12	2 resistors	50kohms	256	external	EEPROM	3.3, 5	2-Wire	TSSOP-16, CSBGA-16	-40 to +95	
DS1858	Сдвоенные резисторы с датчиком температуры, монитор 3 внешних сигналов	Complies or Compatible to SFF-8472, User EEPROM, Alarm Flags, External Calibration, Look-Up Table Compensation	5-input muxable	12	2 resistors	50kohms	256	internal	EEPROM	3.3, 5	2-Wire	TSSOP-16, CSBGA-16	-40 to +95	
DS1859	Сдвоенные резисторы с датчиком температуры, калиброванные мониторы	Complies or Compatible to SFF-8472, User EEPROM, Scalable Dynamic Ranging (Right Shifting), External Calibration, Alarm/Warning Flags, Internal Calibration, Look-Up Table Compensation	5-input muxable	12	2 resistors	20kohms, 50kohms	256	internal	EEPROM	3.3, 5	2-Wire	TSSOP-16, CSBGA-16	-40 to +95	
DS1862	XFP диагностическая микросхема управления лазером	User EEPROM, Alarm Flags, Scalable Dynamic Ranging (Right Shifting), Alarm/Warning Flags, Internal Calibration, Look-Up Table Compensation	7-input muxable	16	1 DAC	-	-	internal	EEPROM	3.3, 5	2-Wire, I2C	25/CSBGA	-40 to +100	

## ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Наименование	Описание	Зависимость	Кол-во резисторов	Интерфейс	Память движка	Кол-во шагов	Конечное сопротивление, КОМ	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5128	128-позиционный Digipot 2x2 мм	Linear	1	Increment-Decrement	Non-Volatile	128	22	25	50	600	1.5	Precision Voltage Divider, Low Step Size Applications, Portable Consumer, Bias Adjustment, Power Supply Cal., Backlight Adjustment, Vcom Adjustment, Fiber Communications	Low THD+N and Crosstalk, EEPROM Wiper Memory, Custom Programmed Resistance Response	-	2.7-5.5	MicroDFN-8
MAX5420	Прецизионный программируемый делитель напряжения для PGA	-	1	2-Wire Parallel	Volatile	4	15	0.025	-	-	6	Precision Voltage Divider	-	5	4.75-5.25	uMAX-8
MAX5421	Прецизионный программируемый делитель напряжения для PGA	-	1	2-Wire Parallel	Volatile	4	15	0.025	-	-	6	Precision Voltage Divider	Op-Amp Input Bias Current Comp. Resistor	5	4.75-5.25	uMAX-10
MAX5426	Программируемая резисторная сборка для инструментальных усилителей	-	1	2-Wire Parallel	Volatile	4	15	0.025	35	-	90	Precision Voltage Divider	-	5 to 15	-	TSSOP-14
MAX5430	Прецизионный программируемый делитель напряжения для PGA	-	1	2-Wire Parallel	Volatile	4	15	0.025	-	-	6	Precision Voltage Divider	-	12 to 15	10.8-15.75	8/SOT-23

Наименование	Описание	Зависимость	Кол-во резисторов	Интерфейс	Память движка	Кол-во шагов	Конечное сопротивление, кОм	Погрешность, %	Темп. коэф-т, ppm/°C	Сопротивление движка, Ом	Ток холостого режима, мкА	Применение	Особенности	Биполярное питание, ±В	Одиночное питание, В	Тип корпуса
MAX5431	15 В прецизионный программируемый делитель напряжения для PGA	-	1	2-Wire Parallel	Volatile	4	57	0.025	-	-	60	Precision Voltage Divider	Op-Amp Input Bias Current Comp. Resistor	12 to 15	10.8-15.75	uMAX-10
MAX5490	Прецизионный делитель 100 кОм с ESD защитой 2 кВ	-	-	-	-	-	100	0.025	35	-	-	Precision Voltage Divider	-	-	-	3/SOT-23
MAX5491	Прецизионный делитель 30 кОм с ESD защитой 2 кВ	-	-	-	-	-	30	0.025	35	-	-	Precision Voltage Divider	-	-	-	3/SOT-23
MAX5492	Прецизионный делитель 10 кОм с ESD защитой 2 кВ	-	-	-	-	-	10	0.025	35	-	-	Precision Voltage Divider	-	-	-	SOT-23-5