

# Op Amps: Myths & Facts



**ВВЕДЕНИЕ:** Операционный усилитель является фундаментальным строительным блоком аудиоаппаратуры. Операционные усилители широко используются и, что неудивительно, являются популярной темой среди аудиофилов. Так что же такое мифы и факты?

**МИФ: БОЛЬШИНСТВО ОУ ЗВУЧАТ РАЗЛИЧНО.** Существует общее мнение, что операционные усилители звучат по-разному. Многие производители оборудования рекламируют бренды операционных усилителей и номера деталей в своей маркетинговой литературе. Предполагается, что OPA2134 за 3 доллара будет звучать намного лучше, чем NE5532 за 1 доллар, а AD8610 за 10 долларов должен звучать еще лучше. Но так ли это? Производители микросхем не способствуют распространению мнения, что некоторые из их операционных усилителей обеспечивают лучший звук. Но при правильном использовании в типичном аудиоприложении я приглашаю любого пройти тест на прослушивание и держу пари, что он не сможет отличить три вышеупомянутых операционных усилителя друг от друга. Единственная загвоздка в том, что это будет *слепой* тест, и слушатель не будет знать, какой операционный усилитель какой.

**ИСТОРИЯ:** Операционный [усилитель](#) (ОУ) был изобретен в 40-х годах. Bell Labs подала патент в 1941 году, и многие считают, что первым практичным операционным усилителем стала вакуумная лампа K2-W, изобретенная в 1952 году Джорджем Филбриком. Компания Texas Instruments изобрела интегральную схему в 1958 году, что проложило путь Бобу Видлару из Fairchild, который в 1963 году изобрел полупроводниковый монолитный операционный усилитель  $\mu$ A702. Но только после выхода  $\mu$ A741, выпущенного в 1968 году, операционные усилители стали относительно недорогими и начались путь к повсеместному распространению. И они не нашли своего применения в потребительском аудиооборудовании до конца 70-х и начала 80-х.

**МИФ: ДИСКРЕТНЫЙ ЛУЧШЕ.** Для аудио основным конкурентом операционного усилителя является полностью дискретный усилитель, состоящий из транзисторов, резисторов и т. д. Что лучше? Оказывается, почти для всех приложений, для которых подходят операционные усилители IC, они легко превосходят дискретные конструкции в следующих областях:

**Лучшая производительность** . Очень сложно добиться соответствия общей производительности даже недорогого операционного усилителя 5532 с дискретной схемой. Дискретная схема находится в невыгодном положении во многих областях, включая согласование компонентов, стабильность смещения и необходимость использования готовых компонентов (каждый «компонент» в интегральном операционном усилителе может быть адаптирован и оптимизирован для своей задачи).

**Простота** . Чтобы хотя бы приблизиться к характеристикам операционного усилителя на микросхеме, требуется гораздо больше компонентов. Вам нужны дифференциальные пары, несколько каскадов, токовые зеркала, источники постоянного тока, схемы смещения, схемы защиты и т. д. В итоге вы получаете десятки или даже сотни компонентов, чтобы попытаться согласовать одну микросхему сдвоенного операционного усилителя в небольшом 8-контактном корпусе.

**CMRR/PSRR** – коэффициент подавления синфазного сигнала – это то, насколько хорошо усилитель может подавлять нежелательный шум. Поскольку их внутренние компоненты настолько хорошо согласованы, операционным усилителям легко достичь превосходных характеристик CMRR и PSRR (коэффициент отклонения источника питания). Это улучшает их реальную производительность в аудиоприложениях, поскольку они могут подавлять шум на источнике питания и входах намного лучше, чем большинство любых дискретных схем.

**Высокий коэффициент усиления при разомкнутом контуре** . Операционные усилители обычно имеют более высокий коэффициент усиления при разомкнутом контуре. Это обеспечивает большую обратную связь, что, в свою очередь, снижает искажения. Есть еще один аудиофильский миф: высокая обратная связь – это как-то плохо, но это тема другой статьи. Посмотрите недавнюю статью Бруно Путзи на эту тему. Он в значительной степени развенчивает все мифы об обратной связи с помощью реальной науки. Он даже объясняет, почему так много людей сбились с пути. Попытка получить сопоставимый коэффициент усиления с разомкнутым контуром в дискретной конструкции обычно создает серьезные проблемы со стабильностью.

**Повторяемость** . Операционные усилители имеют строго контролируемые характеристики и доступную подробную информацию об их характеристиках. Обычно они проходят индивидуальное тестирование при изготовлении, поэтому вы точно знаете, что получаете. Вы можете купить TI 5532 сегодня и On Semi 5532 через год, и оба будут работать очень похоже. Высокопроизводительные дискретные схемы часто требуют согласованных или подобранных вручную компонентов для достижения наилучших характеристик. Это

затрудняет их воспроизведение, а их реальная производительность остается неизвестной и иногда требует детального тестирования каждой реализации (что могут сделать немногие домашние мастера). Дискретные схемы также обычно не могут сохранять стабильную производительность в широком диапазоне температур.

**Масштабные исследования и разработки** . Крупные компании, производящие полупроводники, соревнуются друг с другом за победу в дизайне. Они тратят серьезные деньги, пытаясь превзойти друг друга, и имеют лаборатории стоимостью в миллионы долларов, полные современного оборудования. Они проектируют микросхемы с учетом свойств каждого транзистора и имеют в своем распоряжении такие типы внутренних компонентов, которые недоступны даже в виде отдельных частей. Невозможно совместить все их возможности с дискретным дизайном.

**Встроенная защита** . Многие операционные усилители имеют как минимум ограничение тока, а некоторые также имеют другие формы защиты, такие как отключение при перегреве. Это делает их более надежными, чем дискретные схемы, если только к дискретной конструкции не добавлена аналогичная схема, что делает ее еще более дорогостоящей и сложной.

**Простота использования** . Операционные усилители очень хорошо характеризуются и, как правило, хорошо поддерживаются производителями с подробными характеристиками, графиками производительности и даже указаниями по применению, а иногда и эталонными проектами. Следование их рекомендациям обычно приводит к предсказуемым результатам. Их также обычно легче «склеить» вместе при использовании подходящего биполярного источника питания, поскольку выходы рассчитаны на нулевое напряжение и могут быть напрямую подключены к следующему каскаду. Дискретный дизайнер по большей части начинает с нуля, и ему предстоит преодолеть гораздо больше препятствий.

**Меньшая мощность** . Операционный усилитель, благодаря всем передовым технологиям, доступным разработчикам микросхем, может работать на своем выходном каскаде в классе В с исчезающе низким уровнем искажений. В то время как дискретные конструкции часто вынуждены использовать гораздо более энергоемкий класс А, чтобы хотя бы приблизиться к нему. В целом, операционному усилителю обычно требуется значительно меньшая мощность, чем типичному дискретному эквиваленту. Это огромное преимущество для устройств с батарейным питанием или если вам нужно много каскадов усилителя.

**Более низкая стоимость** . Вы можете получить потрясающую производительность менее чем за 1 доллар с помощью операционного усилителя. Вы даже не можете приблизиться к дискретному дизайну. Фактически, дискретные конструкции часто подвергаются значительному риску, чтобы ограничить их стоимость и сложность до разумного уровня. Таким образом, вы в конечном итоге сравниваете высокооптимизированную микросхему со скомпрометированной дискретной схемой, которая по-прежнему стоит намного дороже и работает хуже.

**ДИСКРЕТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА:** Есть несколько обстоятельств, при которых дискретная конструкция имеет смысл. Одним из них является необходимость выходного напряжения выше примерно 8 В (среднеквадратичное значение). Существует несколько высоковольтных операционных усилителей, но их выбор ограничен и они дороги. То же самое верно, если вам нужны пиковые токи, намного превышающие 300 мА. Существуют некоторые сильноточные операционные усилители, но они могут страдать от перегрева, а также относительно дороги. Например, для управления динамиками требуются напряжения и токи, превышающие эти диапазоны. Вот почему большинство усилителей большой мощности для динамиков имеют дискретную конструкцию. Есть также несколько приличных «чиповых усилителей», но они не являются строго операционными усилителями. Они также имеют температурные ограничения и ограничены относительно скромной выходной мощностью. Они также имеют тенденцию иметь довольно агрессивную схему защиты из-за своих тепловых ограничений.

**ПЕРВОЕ ЗЕРНО ПРАВДЫ:** За многими аудиофильскими мифами часто скрываются зерна истины. Но очень часто эти зерна больше не применимы, или аудиофилы применяют их совершенно недопустимыми способами. Первые операционные усилители, такие как 741, были довольно некачественными для некоторых аудиоприложений. У них была плохая скорость нарастания, и они не могли добиться большого усиления при сохранении полосы пропускания на уровне 20 кГц, не говоря уже о том, чтобы сделать это с низким уровнем искажений. Они также не могли перевозить большую часть груза. Это не помешало некоторым производителям использовать первые операционные усилители в аудиоаппаратуре 70-х и 80-х годов.



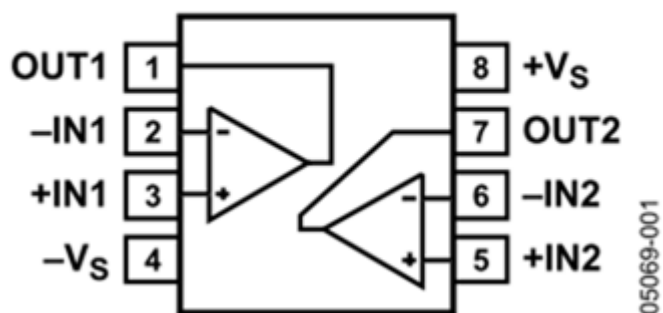
**WAX CYLINDERS:** Многие аудиофилы осуждают операционные усилители на основании первых примеров. По той же логике следует осудить и их виниловые проигрыватели стоимостью 10 000 долларов, потому что фонограф [Edison Wax Cylinder](#) был ужасен. Он едва мог воспроизводить внятную

человеческую речь, не говоря уже о том, чтобы хорошо справляться с музыкой. Очевидно, несправедливо судить о технологии только по первым примерам. Но именно поэтому операционные усилители в основном завоевали среди аудиофилов позорную репутацию, и она прижилась. Операционные усилители не обеспечивали серьезного качества звука по разумной цене до тех пор, пока примерно в 1985 году не был выпущен 5532 — почти через 20 лет после 741. И потребовалось еще несколько лет, чтобы 5532 появился во многих потребительских устройствах. (фото: photopedia.com)

**ВТОРОЕ ЗЕРНО ПРАВДЫ:** Некоторые операционные усилители были оценены в неправильных приложениях. Усилитель для наушников Stouy — как раз такой пример. Типичные операционные усилители рассчитаны на нагрузку в несколько тысяч Ом или выше. Даже самые мощные часто рассчитаны только на сопротивление до 600 Ом. Но это не мешало никому использовать эти же операционные усилители для управления наушниками в диапазоне сопротивления 16–300 Ом. И, что неудивительно, некоторые из них громко жалуются на плохое обращение с ними. Они просто не были рассчитаны на такую низкоомную нагрузку. Если вы сравните перегруженный операционный усилитель А с перегруженным операционным усилителем В, вы можете услышать некоторые различия в их сильно искаженных характеристиках. Но это только потому, что вы наступаете им на хвост и заставляете визжать от боли.

**УАСА (еще одна аналогия с автомобилем):** Давайте возьмем Ferrari и Lamborghini — обе потрясающие машины с очень похожими характеристиками на дороге. Но вместо того, чтобы гонять их по тротуару, как задумано их производителем, давайте прицепим их к плугу и попробуем вспахать кукурузные поля. Внезапно две очень похожие машины ведут себя совершенно по-разному. Lamborghini имеет полный привод и, вероятно, значительно лучше справляется с плугом по грязи, чем двухколесный Ferrari. Но что с того? Кто попытается вспахать поле на спортивной машине? Это аналогично неправильному использованию операционных усилителей и оценке их производительности на основе применения, для которого они никогда не были предназначены.

## PIN CONFIGURATION



### МИФ: БОЛЬШИНСТВО ОУ

**СОВМЕСТИМЫ.** Операционные усилители — сложные устройства. Хотя многие из них имеют одинаковую конфигурацию контактов, создается впечатление, что вы можете просто заменить один на другой, но зачастую это не так. Они оптимизированы для различных

значений входного смещения, конфигураций, коэффициентов усиления, схем обратной связи, импедансов нагрузки, токов покоя, скоростей/полосы пропускания, значений компенсации, рабочих напряжений, компромиссов по шуму и т. д. Но некоторых аудиофилов это не беспокоит, или не понимаю, все эти детали. Поэтому они просто заменяют их, не меняя ничего больше в схеме. У многих есть один или два любимых операционных усилителя, которые они любят использовать почти везде, не задумываясь, подходят ли они им. Это похоже на старую поговорку: «Когда у тебя есть только молоток, все выглядит как гвоздь». Но это просто не работает для операционных усилителей. И неудивительно, что некоторые операционные усилители работают лучше, чем другие, если игнорировать их требования. Опять же, это во многом похоже на «Второе зерно истины», приведенное выше. Если вы неправильно используете данный операционный усилитель, он вполне может звучать по-другому. Но это не вина операционного усилителя. Человек, злоупотребляющий этим, создает слышимые различия.



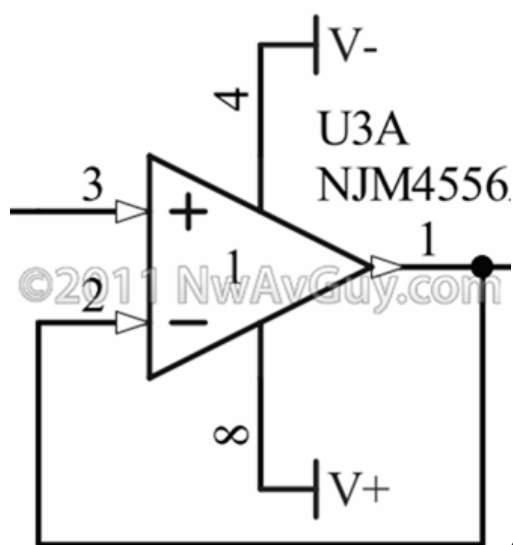
#### **МИФ: ОБНОВЛЕНИЕ ОУ ОБЫЧНО СТОИТ.**

Форумы полны сообщений от людей, которые покупают какое-нибудь прекрасное аудиооборудование, открывают его, обнаруживают, что производитель использовал «дешевый операционный усилитель 5532», и тут же вставляют что-то стоящее. более дорогой и экзотичный для «улучшения звука». Обычно это люди, которым не хватает испытательного оборудования, чтобы иметь представление о том, помогает ли замена операционных усилителей, вредит ли это или является просто пустой тратой денег. Они просто используют свои уши, [пристрастно слушают](#) и делают всевозможные ошибочные выводы. Я знаю о замене операционных усилителей, вызывающей потенциально опасные колебания. Кто-то может воспринимать ультразвуковые артефакты колебаний как «новооткрытую деталь», хотя на самом деле он невольно создал радиопередатчик. И это не так редко, как вы думаете, из-за менталитета «чем быстрее, тем лучше». (фото: photozou.jp)

**YACA:** Некоторые автомобильные журналы проводили объективные тесты обновлений шин, амортизаторов, колес увеличенного размера и т. д. Когда они сравнивают, скажем, серийный BMW с тем же автомобилем с одной или несколькими «модернизациями», заводские настройки обычно публикуют сообщения. лучшие общие характеристики, время прохождения круга и т. д. Хотя эти массивные 20-дюймовые диски со

сверхнизкопрофильными шинами могут *выглядеть* круто, они часто работают *хуже*, чем то, что было на машине. Это потому, что производители, особенно для автомобилей, ориентированных на производительность, тщательно оптимизируют шины и подвеску. Они понимают все компромиссы лучше, чем кто-либо другой. То же самое часто происходит с операционными усилителями и аудиоаппаратурой. Пытаясь «обновить» владелец часто портит тщательно продуманную конструкцию и делает ее еще хуже.

**МИФ: УСТРОЙСТВА ПОСТАВЛЯЮТСЯ С ПЛОХИМИ ОУ.** Хотите верьте, хотите нет, но обычно вы можете доверять более крупным производителям аудиооборудования, которые используют операционные усилители, способные выполнить свою работу. Почему? Потому что, во-первых, такие операционные усилители удивительно недороги. Так что у производителя нет особых причин *не* использовать идеальный операционный усилитель. Во-вторых, у них, вероятно, есть испытательное оборудование стоимостью более 50 000 долларов, и они могут точно измерить разницу между операционными усилителями. Они также разработали схему операционного усилителя, чтобы лучше знать, какие требования наиболее важны. Но, похоже, многие аудиофилы видят только недорогой операционный усилитель на плате, которую необходимо заменить. Они могут не понимать остальную часть схемы, не иметь возможности узнать, создают ли они новые проблемы и т. д.



**СТАБИЛЬНОСТЬ ОУ:** Стабильность имеет решающее

значение для правильной работы ОУ. Производители оборудования склонны выбирать относительно стабильные операционные усилители с нормальной полосой пропускания. Таким образом, им не нужно принимать много мер предосторожности в своих схемах, чтобы такие операционные усилители работали хорошо. Но что происходит, когда Джо Аудиофил достает паяльник и заменяет заводской операционный усилитель какой-нибудь экзотической деталью с высокими струнами? Новая деталь часто требует *гораздо* большего внимания к компоновке печатной платы, лучшей развязке источника питания, другой компенсации, возможно, более стабильному источнику питания и т. д. Другими словами, без обновления остальной конструкции (возможно, включая даже печатную плату), Операционный усилитель может быть, по крайней мере, несколько нестабильным или неудовлетворительным по каким-либо причинам. А поскольку большая часть

нестабильности приходится на ультразвуковые или радиочастотные частоты, человек, производящий замену, может даже не осознавать, что он только что сделал гигантский шаг назад. Даже RMAA не может «видеть» ультразвуковые и радиочастотные проблемы.

**ЛЕГКАЯ ЖИЗНЬ:** Большинство операционных усилителей в аудиоаппаратуре не используются в стрессовых ситуациях. Многие из них представляют собой просто буферы, что означает, что они даже не имеют никакого усиления по напряжению. И даже в усилителе для наушников прирост относительно скромнен. А современные аудиооперационные усилители практически никогда не подвергаются нагрузке из-за скорости нарастания сигнала. Это означает, что теоретические преимущества многих дорогостоящих деталей совершенно бесполезны в этих «простых» аудиоприложениях. Это все равно, что обновить газонокосилку с помощью двигателя V8 мощностью 400 лошадиных сил, когда оригинальный двигатель мощностью 5 лошадиных сил прекрасно косит траву.

**НЕПРАВИЛЬНАЯ ЖИЗНЬ:** Многие дорогие операционные усилители, в том числе любимые некоторыми аудиофилами, оптимизированы для совершенно разных приложений — например, для точной работы по постоянному току, использования видео и т. д. Использовать их для аудио — все равно, что пытаться вспахать поле на Ferrari или ездить на работу на гоночной машине. Основные активы Ferrari бесполезны на кукурузном поле. Например, операционный усилитель OPA690, используемый в AMB Mini3, никогда не предназначался для использования в аудиосистеме и имеет относительно ужасные характеристики звука. Если вы отклонитесь слишком далеко от того, для чего предназначен операционный усилитель, он вполне может звучать *хуже*, чем гораздо более дешевый компонент, предназначенный для использования в аудио, например 5532.



**СЛЕДУЙТЕ ПО ЦЕПИ:** Если вы проследите большую часть музыки по сигнальной цепочке, вы почти всегда обнаружите, что она уже прошла через десятки, а иногда даже сотни операционных усилителей. Те большие гигантские микшерные пульта, которые вы видите в студиях звукозаписи? Да, большинство из них заполнены сотнями операционных усилителей. Та же история с эквалайзерами, компрессорами, вокальными процессорами, микрофонными предусилителями, аналого-цифровыми преобразователями и многим другим. И вы думаете, что это все 10-долларовые аналоговые устройства или детали Burr Brown? Неа. В основном это недорогие 5532 в

лучшем оснащении и даже более дешевые детали для менее дорогих вещей. Конечно, музыка все чаще создается в цифровой сфере, но я готов поспорить, что прежде чем ваша музыка коснется ваших наушников, она уже прошла как минимум через несколько недорогих операционных усилителей. (фото предоставлено Dennis AB) (фото: photopedia.com)

**ЗДРАВЫЙ СМЫСЛ:** Если большая часть нашей самой любимой музыки уже прошла через десятки или сотни дешевых операционных усилителей, разумно ли думать, что еще один такой операционный усилитель будет иметь большое значение? Это не так, и во многом это связано с тем, что правильно используемые операционные усилители прозрачны на слух — то есть вы даже не можете сказать, что они там.

**ПРОЗРАЧНОСТЬ:** Если операционные усилители действительно имеют «звук», как предполагают многие аудиофилы, то при добавлении операционных усилителей в путь прохождения сигнала звук должен измениться. Два парня по имени [Мейер и Моран](#) провели очень интересное тщательное исследование. Они воспроизводили SACD высокого разрешения на высококлассных системах и иногда вставляли дополнительные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи в тракт сигнала, чтобы «преобразовать» звук высокого разрешения в звук качества компакт-диска (16/44). После более чем 500 испытаний, продолжавшихся более года, с привлечением аудиофилов, инженеров звукозаписи и студентов в качестве слушателей, они обнаружили, что никто не может определить, когда дополнительный аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи оказались на пути сигнала. Помимо демонстрации весьма сомнительных предполагаемых преимуществ SACD, им также удалось продемонстрировать, что аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи также могут быть прозрачными для звука. И, как вы уже догадались, и АЦП, и ЦАП добавляют в путь прохождения сигнала несколько операционных усилителей. Но никто не мог сказать, что они вообще были там. Было проведено еще много слепых тестов, которые также продемонстрировали, что разные операционные усилители (и многое другое) действительно звучат настолько одинаково, что даже аудиофилы не могут услышать разницу. Другой пример см. в [аудиотесте Matrix](#).

**ЗРИТЕЛЬНОЕ СЛУШАНИЕ:** Ранние операционные усилители иногда звучали плохо, и если вы неправильно используете операционный усилитель, вы можете заставить его звучать по-другому. Но как насчет всех приличных операционных усилителей правильной конструкции? Почему так много людей утверждают, что они звучат по-другому? Ответ: они используют зрячее слушание. Наш мозг фильтрует то, что мы слышим, используя другие знания — например, какой операционный усилитель вы слушаете. Это произвольная реакция, которую не сможет «выключить» даже самый опытный слушатель. Посмотрите этот короткий видеоролик BBC об [эффекте Макгерка](#), чтобы увидеть пример того, как наш мозг влияет на то, что мы слышим. И если вам это интересно, вы найдете гораздо больше в

моей статье [«Субъективные и объективные дебаты»](#) . По сути, когда кто-то «обновляет» операционный усилитель, он часто ожидает услышать разницу, основанную на заявлениях производителя, других (столь же предвзятых) субъективных тестах на прослушивание, о которых они читали, аудиофильских мифах и т. д. Таким образом, их мозг выдает ожидаемое. разница такая же, как в видео, указанном выше. Но если они позволят кому-то *другому* поменять операционные усилители и не будут знать, какой именно, различия всегда исчезнут, если только не возникнет другая проблема. И такие проблемы можно выявить при правильных измерениях. Таким образом, если два разных операционных усилителя достаточно хорошо работают в одном устройстве, данные убедительно свидетельствуют о том, что их невозможно будет отличить друг от друга в тестах на слепое прослушивание .

**МИФ: БЫСТРЕЕ — ЛУЧШЕ.** Часто упоминаемая причина покупки дорогих операционных усилителей или их модернизаций — получение большей скорости. К сожалению, похоже, что те, кто делает такие заявления, не понимают, как «скорость» применяется к звуку. Как можно продемонстрировать с помощью простых математических вычислений (и это было проверено Дугом Селфом и многими другими), любой операционный усилитель со скоростью нарастания 3 В/мкс или выше достаточно быстр для практически любого аудиоприложения на планете. А операционные усилители, такие как 5532, могут легко иметь полосу пропускания до 200+ кГц в большинстве приложений, что приводит к незначительному сдвигу фазы или «задержкам» в звуковом диапазоне. Использование операционного усилителя, рассчитанного на 20 В/мкс или даже выше, просто порождает другие проблемы, и он, вероятно, работает хуже в других отношениях (например, больше шума и искажений). Подробнее об этом будет сказано в следующей статье.



**СМЕНА ОУ:** Замена операционных усилителей, часто с использованием разъема, чтобы их было легко переключать, называется «смена операционных усилителей». Было написано бесчисленное количество слов, описывающих один операционный усилитель как имеющий большую «глубину», другой как имеющий «более черный фон» и т. д. На сайте усилителей для наушников Tangent есть

типичный список [субъективных комментариев](#) . Как объяснялось выше, иногда различия могут быть реальными, поскольку некоторые операционные усилители серьезно не подходят для данной конкретной конфигурации. Но чаще всего это просто обычная предвзятость зрячего слуха, описанная выше. Если замены производятся вслепую и используются подходящие операционные усилители, работающие правильно, предполагаемые различия, похоже, всегда исчезают.

**Дискретные операционные усилители:** Здесь есть еще одна маленькая доля истины. Существуют очень дорогие дискретные операционные усилители, которые были разработаны специально для того, чтобы превосходить по производительности операционные усилители на интегральных схемах в очень специфических отношениях. Насколько мне известно, их узкоспециализированные преимущества не дают никаких реальных преимуществ при обычном использовании аудио. А аудиофилы, похоже, предпочитают гораздо менее тщательно спроектированные дискретные замены интегральных операционных усилителей. Этим дискретным заменителям обычно не хватает каких-либо достоверных тестовых данных, позволяющих продемонстрировать их реальную производительность. Так как же узнать , что они превосходят микросхемы? В основном они используют зрительное слушание, которое совершенно недействительно (см. выше). Дискретные операционные усилители Audio-GD были протестированы Сэмюэлем Гронером с использованием анализатора Audio Precision, и результаты оказались ужасными. См. миф *о том, что дискретное лучше* .

**ИЗМЕРЕНИЯ ОУ УСИЛИТЕЛЯ:** Чтобы мои статьи были более удобочитаемыми, я разделил их на две части. В этой статье мы рассмотрели историю, применение и мифы. В следующей статье будут рассмотрены более технические аспекты, включая параметры операционного усилителя (что важно в таблице данных для звука), а также некоторые фактические измерения с использованием моего [аудиоанализатора dScope](#) и ряда операционных усилителей, которые были оценены для [усилителя для наушников O2](#) .