

Руководство по выбору малошумящего усилителя

При оценке параметров усилителя для применений, требующих низкого уровня шума, необходимо рассматривать как внутренние, так и внешние источники шумов. В этой статье рассматривается природа внутренних и внешних шумов, а также возможные компромиссы при выборе оптимального усилителя.

Пол ЛИ (Paul LEE)

Источники внешнего шума

Внешний шум включает любые типы внешних воздействий, таких как влияние внешних компонентов и помех, вызванных электрическими и электромагнитными полями. Помеха может представлять собой сигнал в виде коротких импульсов, ступенчатых скачков, синусоидальных колебаний или случайного шума. Источником помех может быть что угодно: работающие механизмы, линии электропитания, которые расположены поблизости, радиоприемники или радиопередатчики, компьютеры и даже схемы, входящие в состав того же оборудования, что и элемент, на который воздействует помеха (цифровые схемы или импульсные источники питания). Даже если можно было бы исключить все помехи путем грамотного проектирования и/или разводки печатной платы, то все равно останется случайный шум самого усилителя и компонентов его схемы.

Необходимо учитывать также шум от окружающих компонентов схемы. При температурах выше абсолютного нуля любое сопротивление представляет собой источник шума, который обусловлен тепловым движением носителей заряда и называется шумом Джонсона, или тепловым шумом. Этот шум возрастает при увеличении сопротивления, температуры и полосы частот. Шумовые напряжение и ток описываются выражениями:

$$V_n = \sqrt{4kTB R}, \quad (1)$$

$$I_n = \sqrt{\frac{4kTB}{R}}, \quad (2)$$

где V_n — шумовое напряжение (В); k — постоянная Больцмана ($1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К); T — температура в градусах Кельвина (К); B — ширина полосы в герцах (Гц); R — сопротивление в омах (Ом); I_n — шумовой ток в амперах (А).

Типовой шум, генерируемый резистором номиналом 1 кОм при комнатной температуре, составляет примерно 4 нВ/√Гц. При проведении более глубокого анализа

необходимо также учитывать и другие источники шума резистора, такие как шум контактов, дробовой шум и паразитные эффекты, присущие конкретному типу резистора. В статье мы ограничим возможные источники шума резистора только шумом Джонсона и будем считать, что шум резистора пропорционален квадратному корню его номинала.

Реактивные сопротивления не генерируют шум, однако протекающие через них шумовые токи приводят к появлению шумового напряжения, а также других паразитных эффектов.

Выходной шум схемы можно понизить, уменьшив суммарное сопротивление компонентов или ограничив ширину полосы схемы. Снижение температуры особого эффекта обычно не дает, если только вам не удастся очень сильно охладить резистор, поскольку мощность шума пропорциональна абсолютной температуре:

$$T(x) \text{ в Кельвинах} = x^\circ\text{C} + 273,15^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Все резисторы, входящие в состав схемы, генерируют шум, и его влияние всегда нужно учитывать. На практике ощутимый вклад в полный шум схемы, скорее всего, будут вносить только резисторы во входной цепи и в цепи обратной связи (обычно при больших коэффициентах усиления). При проведении анализа можно считать, что шум поступает от источника тока или от источника напряжения (в зависимости от того, какой из вариантов более удобен для конкретной схемы).

Внутренние источники шума

Шум, появляющийся на выходе усилителя, обычно измеряется в виде напряжения. Однако он генерируется как источниками напряжения, так и источниками тока. Все внутренние шумы обычно приводятся к входу, то есть для них используется модель с некоррелированными, или независимыми, генераторами случайного шума, подключенными последовательно или параллельно к входам идеального нешумящего усилителя (рис. 1).

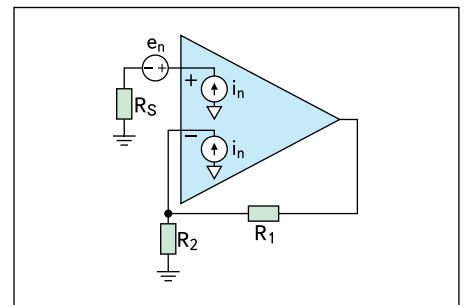


Рис. 1. Шумовая модель операционного усилителя

Эти источники шума считаются случайными и/или имеющими гауссово распределение, и это важно учитывать при их суммировании.

Если один и тот же шум появляется в двух или более точках схемы (имеется в виду схема подавления входного тока смещения), то эти два источника шума являются коррелированными и коэффициент корреляции необходимо учитывать при анализе шума. Поскольку обычно шумы коррелированных источников составляют менее 10 или 15%, то ими чаще всего можно пренебречь, поэтому дальнейший анализ коррелированного шума в данной статье ограничен.

Внутренний шум усилителя можно разделить на четыре категории:

- приведенное к входу шумовое напряжение;
- приведенный к входу шумовой ток;
- фликкер-шум;
- попкорн-шум (низкочастотные скачкообразные изменения сигнала).

Наиболее распространенные параметры, используемые для анализа шума усилителя, — это приведенное к входу шумовое напряжение и приведенный к входу шумовой ток. Их часто описывают через приведенную к входу спектральную плотность шума или среднеквадратический шум в полосе $\Delta f = 1$ Гц, как правило, в единицах пА/√Гц (для шумового тока) или нВ/√Гц (для шумового напряжения). Деление на √Гц возникает вследствие того, что мощность шума пропорциональна ширине полосы, а шумовое напряжение и плотность шумового тока про-

порциональны корню из ширины полосы (выражения (1) и (2)).

Четыре типа внутреннего шума

В этом разделе описываются приведенное к входу шумовое напряжение, приведенный к входу шумовой ток, фликкер-шум и попкорн-шум.

Приведенное к входу шумовое напряжение

Как правило, приведенное к входу шумовое напряжение (e_n) представляют в виде генератора шумового напряжения.

Шумовое напряжение является характеристикой шума, на которую обычно делают основной акцент. Однако при высоких значениях входного импеданса ограничивающим фактором шумовых характеристик системы часто становится шумовой ток. Такое поведение аналогично смещениям в усилителе: зачастую считают, что выходное смещение определяется входным напряжением смещения, но при высоком импедансе на входе выходное смещение в действительности обуславливается током смещения.

Обратите внимание на следующие моменты, касающиеся приведенного к входу шумового напряжения:

- В лучших операционных усилителях спектральная плотность шума может быть даже ниже 1 нВ/√Гц.
- У операционных усилителей на биполярных транзисторах шумовое напряжение традиционно ниже, чем у операционных усилителей на полевых транзисторах, но у них значительно выше шумовой ток.
- Шумовые характеристики усилителей на биполярных транзисторах зависят от тока покоя.
- В современных операционных усилителях на полевых транзисторах можно добиться одновременно и низких значений шумового тока, и значений шумового напряжения, близких к показателям усилителей на биполярных транзисторах (однако не настолько низких, как в лучших усилителях с входным каскадом на биполярных транзисторах).

Приведенный к входу токовый шум

Приведенный к входу токовый шум (i_n) обычно проявляется как два источника токового шума, прокачивающих токи через два дифференциальных входа.

Дробовой шум (иногда называемый шумом Шоттки) — это токовый шум, вызванный случайным распределением носителей заряда в токе, преодолевающим потенциальный барьер, например, p - n -переход. Дробовой шум (i_n) можно получить с помощью формулы:

$$i_n = \sqrt{2I_B q B}, \quad (4)$$

где I_B — ток смещения в амперах (А); q — заряд электрона в кулонах ($1,6 \times 10^{-19}$ Кл); B — полоса пропускания в герцах (Гц).

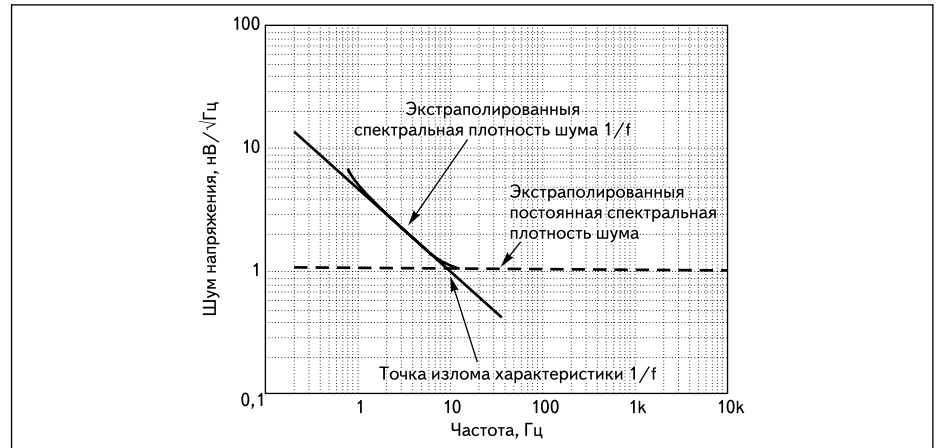


Рис. 2. Экстраполированная характеристика спектральной плотности шума $1/f$

Шумовой ток в усилителях с входными каскадами на простых биполярных транзисторах и на полевых транзисторах с p - n -переходом обычно отличается на 1 или 2 дБ от дробового шума входного тока смещения. Этот параметр не всегда приводится в спецификациях.

Отметим следующие моменты, относящиеся к приведенному к входу шуму:

- Токковый шум обычного операционного усилителя на биполярных транзисторах, например, OP27, составляет около 400 фА/√Гц, когда I_B равен 10 нА, и существенно не изменяется с температурой, за исключением усилителей с компенсацией токов смещения.
- Токковый шум в усилителях с входными каскадами на полевых транзисторах с p - n -переходом (такими как AD8610: 5 фА/√Гц при $I_B = 10$ пА), хотя и ниже по значению, удваивается на каждые 20 °С увеличения температуры микросхемы, поскольку токи смещения в усилителях с входными каскадами на полевых транзисторах с p - n -переходом удваиваются при росте температуры на каждые 10 °С.
- В традиционных операционных усилителях с обратной связью по напряжению, имеющих сбалансированные входы, значения шумовых токов (коррелированных и некоррелированных) на инвертирующем и неинвертирующем входах обычно равны.
- Во многих усилителях (особенно в тех, которые имеют схемы подавления входного тока смещения) коррелированная составляющая шума намного превышает некоррелированную составляющую. В целом, несмотря на распространенное мнение, уровень шума можно улучшить, добавив резистор для согласования импеданса (согласуя значения импеданса на обоих — положительном и отрицательном — входах).

Фликкер-шум

Шум операционного усилителя представляет собой в широком диапазоне частот гауссов шум с постоянной спектральной плотностью (белый шум), однако с уменьшением частоты спектральная плотность на-

чинает возрастать. Этот рост зависит от технологического процесса производства, разводки кристалла ИС, а также типа устройства и составляет примерно:

- 3 дБ на октаву для КМОП-усилителей;
- 3,5–4,5 дБ на октаву для усилителей на биполярных транзисторах;
- до 5 дБ на октаву для усилителей с входными каскадами на полевых транзисторах с p - n -переходом.

Эта низкочастотная шумовая характеристика называется фликкер-шумом, или шумом $1/f$, поскольку спектральная плотность мощности шума имеет зависимость, обратную частоте (то есть $1/f$). При логарифмической шкале наклон шумовой характеристики равен -1 . Частоту, при которой экстраполированная линия спектральной плотности с наклоном -3 дБ на октаву (для КМОП-усилителей) пересекает линию постоянной широкополосной спектральной плотности, называют частотой излома характеристики $1/f$. Она является показателем качества усилителя. Несмотря на то, что усилители на биполярных транзисторах и полевых транзисторах с p - n -переходом имеют больший наклон характеристики по сравнению с КМОП-усилителями, частота излома $1/f$ у них ниже (рис. 2).

Попкорн-шум

Попкорн-шум (обычно в спецификациях не указывается) — это внезапный скачок тока или напряжения смещения, длящийся несколько миллисекунд и имеющий амплитуду от единиц до сотен мкВ. Этот эффект имеет совершенно случайный характер. Наиболее благоприятные условия для возникновения попкорн-шума создаются при низких температурах и высоких сопротивлениях источника. Какой-то одной доминирующей причины попкорн-шума не существует, однако известно, что он может быть вызван загрязнением металлизации, а также внутренними дефектами или дефектами поверхности кристалла ИС. Несмотря на то, что при современных технологиях производства пластин кристаллов предпринимаются серьезные

меры по сокращению источников поперно-шума, полностью устранить его невозможно. Дальнейший анализ поперно-шума выходит за рамки настоящей статьи.

Суммирование источников шума

Источники шума бывают белыми и гауссовыми. Белый шум — это шум, мощность которого в пределах заданной полосы частот постоянна. Гауссов шум — шум, вероятность появления конкретного значения амплитуды которого имеет гауссово распределение.

Гауссов шум обладает следующим свойством. При сложении среднеквадратичных значений шума от двух и более некоррелированных источников гауссова шума (когда один шумовой сигнал не может быть приведен к другому шумовому сигналу), результирующий шум будет равен не арифметической сумме, а квадратному корню из суммы квадратов отдельных среднеквадратичных значений:

$$V_{ni, TOTAL} = \sqrt{(e_n)^2 + (R_S \times i_n)^2 + V_n(R_{EX})^2}, \quad (5)$$

где $V_{ni, TOTAL}$ — общий приведенный к входу шум; e_n — приведенное к входу шумовое напряжение; i_n — приведенный к входу шумовой ток; R_S — эквивалентное сопротивление источника или сопротивление на входе усилителя; $V_n(R_{EX})$ — шумовое напряжение внешней части схемы.

Отметим следующее:

- Любое сопротивление на неинвертирующем входе обладает шумом Джонсона и преобразует шумовой ток в шумовое напряжение.
- Шум Джонсона в резисторах обратной связи в высокоомных схемах может быть значительным.

На рис. 3 графически представлено уравнение (5) как сумма векторов с использованием теоремы Пифагора.

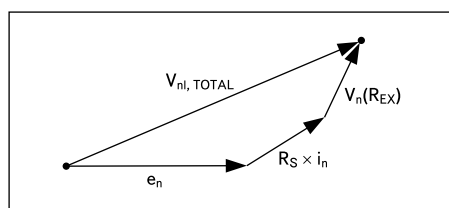


Рис. 3. Векторное суммирование источников шума

Шумовое усиление

Шумы, которые обсуждались ранее, могут быть объединены в приведенный к входу шум схемы усилителя. Для того чтобы рассчитать общий выходной шум схемы усилителя, общий объединенный шум на входе должен быть умножен на шумовое усиление схемы усилителя. Шумовое усиление — это усиление схемы усилителя для приведенного к входу шума. Оно обычно используется для определения устойчивости схемы усилителя.

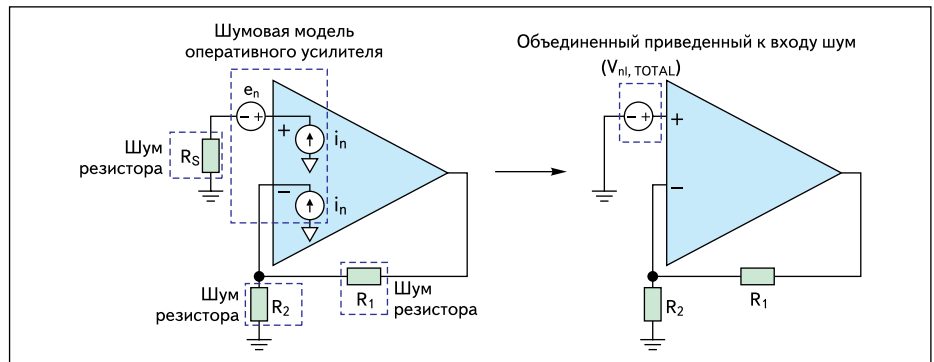


Рис. 4. Упрощение схемы шумов усилителя

Для упрощения расчета шумового усиления источники шума в простой схеме усилителя на рис. 1 могут быть объединены в один общий приведенный к входу источник шума ($V_{ni, TOTAL}$), как показано на рис. 4.

Обычно при расчете принято предполагать, что общий приведенный к входу шум прикладывается к неинвертирующему входу усилителя:

$$V_{no, TOTAL} = G_N \times V_{ni, TOTAL}$$

где $V_{no, TOTAL}$ — общий приведенный к выходу шум; $V_{ni, TOTAL}$ — общий приведенный к входу шум.

$$G_N = 1 + R_1/R_2,$$

где G_N — шумовое усиление; R_1 — эквивалентный импеданс цепи обратной связи; R_2 — входной эквивалентный импеданс.

В некоторых случаях шумовое усиление и усиление сигнала не являются эквивалентными (рис. 5). Заметим, что полоса пропускания схемы с замкнутой обратной связью определяется делением произведения усиления на полосу (или частоты единичного усиления) на шумовое усиление схемы усилителя.

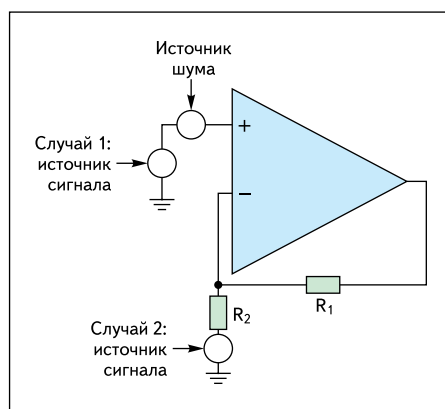


Рис. 5. Сравнение усиления сигнала и шумового усиления.

Случай 1: в неинвертирующей схеме и усиление сигнала, и шумовое усиление равны $1 + R_1/R_2$. Случай 2: в инвертирующей схеме усиление сигнала равно $-(R_1/R_2)$, но шумовое усиление по-прежнему равно $1 + R_1/R_2$.

Выбор малошумящего операционного усилителя

Если сигнал на операционный усилитель поступает от резистивного источника, то эквивалентный шум будет равен корню из суммы квадратов:

- шумового напряжения усилителя;
- напряжения, генерируемого сопротивлением источника;
- напряжения, вызываемого протеканием шумового тока усилителя через импеданс источника.

При очень малых сопротивлениях источника вклад шума, генерируемого сопротивлением источника, и шумового тока усилителя в суммарный шум незначителен. В данном случае шум на входе определяется, по существу, только шумовым напряжением операционного усилителя.

Если сопротивление источника велико, то шум Джонсона сопротивления источника может доминировать и над шумовым напряжением операционного усилителя, и над напряжением, вызванным шумовым током. При этом следует отметить, что, поскольку шум Джонсона пропорционален квадратному корню из сопротивления, а шумовое напряжение, обуславливаемое шумовым током, прямо пропорционально входному импедансу, при достаточно высоких значениях входного импеданса всегда будет преобладать шумовой ток усилителя. Если и шумовое напряжение, и шумовой ток усилителя достаточно велики, то вполне возможна ситуация, в которой шум Джонсона не будет вносить доминирующий вклад ни при каких значениях входного сопротивления.

Для выбора усилителя, у которого вклад собственного шума пренебрежимо мал по сравнению с сопротивлением источника, можно воспользоваться показателем качества операционного усилителя — $R_{S, OP}$. Его можно найти, используя шумовые характеристики усилителя, по формуле:

$$R_{S, OP} = e_n / i_n \quad (7)$$

где e_n — приведенное к входу шумовое напряжение; i_n — приведенный к входу шумовой ток.

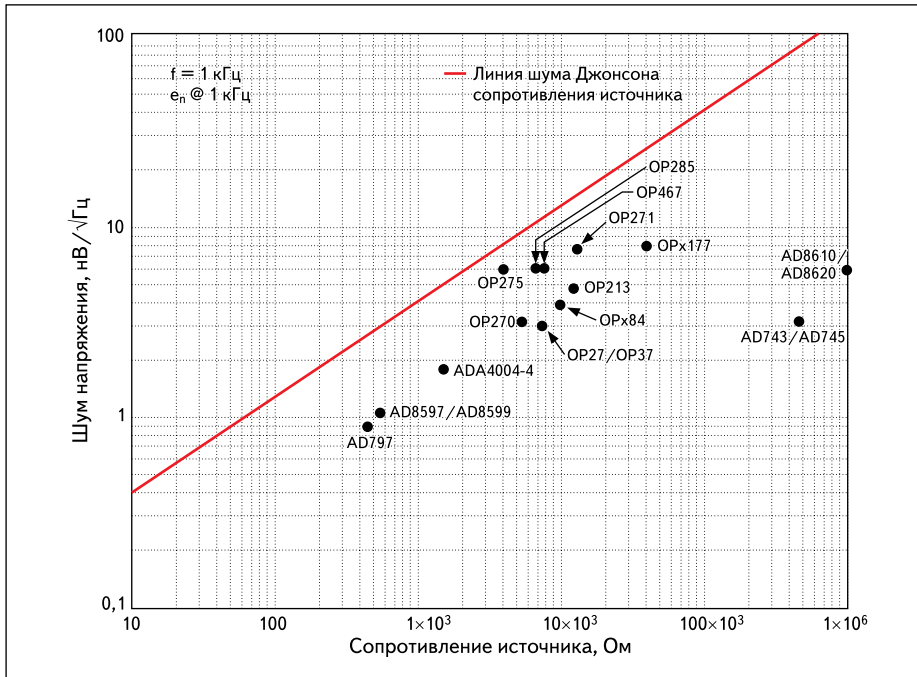


Рис. 6. Шумы операционных усилителей фирмы Analog Devices

Для сравнения ряда высоковольтных (до 44 В) операционных усилителей компании Analog Devices на рис. 6 показаны значения плотности шумового напряжения и $R_{S, OP}$ на частоте 1 кГц. Диагональная линия отображает шум Джонсона, связанный с сопротивлением.

Аналогичные графики можно построить для выбранного значения частоты на основании данных из спецификаций на операционные усилители (табл. 1). Например, рассмотрим операционный усилитель AD8599. Это устройство на частоте 1 кГц имеет приведенное к входу шумовое напряжение, равное примерно 1,07 нВ/√Гц, и приведенный к входу шумовой ток, равный 2,3 пА/√Гц. Параметр $R_{S, OP}$

на частоте 1 кГц составляет порядка 465 Ом. Обратите внимание на следующие моменты:

- Шум Джонсона для этого устройства эквивалентен шуму резистора с номиналом около 69,6 Ом (рис. 6).
- При сопротивлении источника свыше 495 Ом шумовое напряжение, порождаемое шумовым током усилителя, превышает шумовое напряжение, создаваемое сопротивлением источника. В таких случаях шумовой ток усилителя становится доминирующим источником шума.

Для практического применения графика (рис. 7) проделайте следующие шаги:

1. Как правило, значения сопротивления источников известны (например, это могут

быть значения импеданса датчика). Если они неизвестны, определите их, исходя из компонентов соседних или предшествующих схем.

2. Отметьте точку на линии шума Джонсона, соответствующую сопротивлению данного источника (например, 1 кОм).
3. Проведите горизонтальную линию от точки, отмеченной на шаге 2, до правой границы графика.
4. Проведите наклонную линию вниз и влево от точки, отмеченной при шаге 2, понижая на одну декаду шумовое напряжение при уменьшении сопротивления на каждую декаду.

Все усилители, показанные на рис. 6 ниже и справа от начерченных линий, являются малошумящими усилителями, подходящими для проектов, требующих низких шумов.

В случае, показанном на рис. 7, можно использовать усилители AD8597, AD8599, AD797, ADA4004-4, OP270, OP27/OP37, AD743/AD745 и OP184.

Заключение

При оценке шумовых показателей усилителя с позиций его применения в проекте, где требуется обеспечение низкого уровня шумов, рассматривайте все потенциальные источники шума.

Основной вклад шумов операционного усилителя зависит от сопротивления источников следующим образом:

- $R_S \gg R_{S, OP}$ — доминирует приведенный к входу токовый шум;
- $R_S = R_{S, OP}$ — шум усилителя пренебрежимо мал, доминирует шум резистора;
- $R_S \ll R_{S, OP}$ — доминирует приведенный к входу шум напряжения.

Резюмируя, советуем понизить или устранить уровень мешающих сигналов за счет:

- применения методов разводки, направленных на снижение паразитных элементов схемы;
- применения правильных методов заземления, таких как разделение цифровой и аналоговой «земли»;
- правильного экранирования.

Для резистивных источников шума используйте следующие правила:

- Ограничивайте полосу частот до минимально необходимого уровня.
- Где только возможно, используйте резисторы минимального номинала.
- Используйте малошумящие резисторы, например, резисторы на основе металлической фольги, проволочные и металлопленочные резисторы.
- Уменьшайте количество резистивных источников шума, где только возможно.
- При выборе малошумящего усилителя компании Analog Devices на основании критериев, обсуждавшихся в данной статье, используйте таблицы 1 и 2.

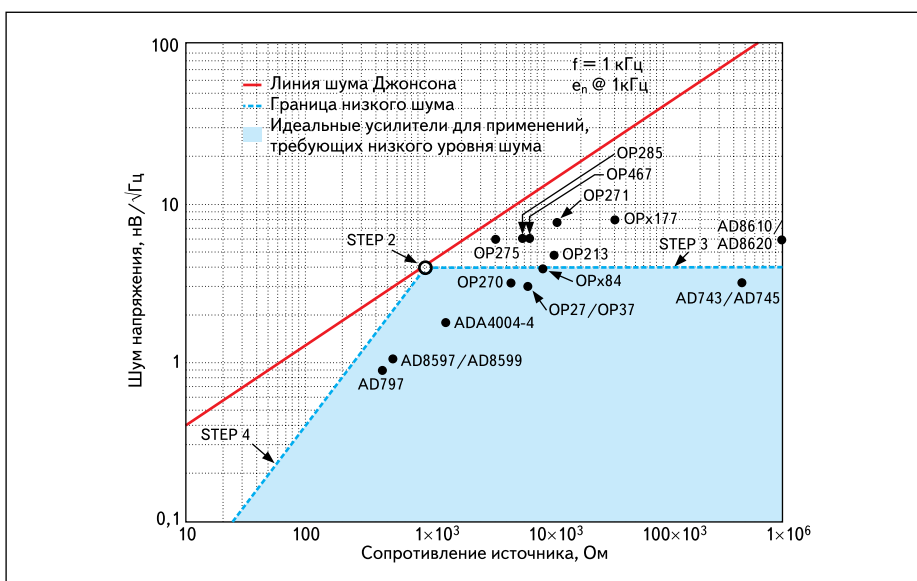


Рис. 7. Выбор операционного усилителя для применений, требующих низких шумов

Таблица 1. Данные для выбора усилителя с низким входным шумовым напряжением фирмы Analog Devices

Тип	Напряжение питания (V_{SY}), В	Напряжение смещения (V_{OS} макс.), мкВ	Температурный коэффициент напряжения смещения (ТСУ $_{OS}$), мкВ/°С	Полоса (GBW), МГц	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	Максимальный ток потребления на один усилитель (I_{SV}/AMR макс.), мА	Спектральная плотность шумового напряжения (e_n при 1 кГц), нВ/√Гц	Спектральная плотность шумового тока (i_n при 1 кГц), пА/√Гц	Входной импеданс ($R_{S, P}$ при 1 кГц), Ом	Частота залома характеристики 1/г, Гц	Максимальный выходной ток (I_o макс.), мА	Ток КЗ (I_{SC}), мА	Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR мин.), дБ	Коэффициент влияния источника питания (PSRR мин.), дБ	Число усилителей
AD797	10–36	40	0,2	5	20	10,5	0,9	2	450	60	900	80	120	120	1
AD8597/AD8599	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
ADA4004-1/ADA4004-2/ADA4004-4	10–36	125	0,7	12	2,7	2,2	1,8	1,2	1500	5	90	25	110	110	1/2/4
AD8676	10–36	50	0,2	10	2,5	3,4	2,8	0,3*	–	10	2	40	111	106	2
AD8675	10–36	75	0,2	10	2,5	2,9	2,8	0,3*	–	10	2	40	114	120	1
AD8671/AD8672/AD8674	10–36	75	0,3	10	4	3,5	2,8	0,3*	–	10	12	30	100	110	1/2/4
ADA4075-2	±4,5...±18	1000	0,3	6,5	12	2,25	2,8	1,2	2333	5	100	40	110	106	2
OP27	8–44	100	0,3	8	2,8	5,7	3,2	0,4	8000	2,7	80	30	100	140	1
OP37	8–44	100	0,3	40	17	4,7	3,2	0,4	8000	2,7	75	30	100	140	1
OP270/OP470	9–36	75	0,2	5	2,4	3,25	3,2	0,0069	5333	5	20	15	106	110	2/4
AD743	9,6–36	1000	2	4,5	2,8	10	3,2	0,0069	463 768	50	0,4	40	80	90	1
AD745	9,6–36	500	2	20	12,5	10	3,2	0,4	463 768	50	0,25	40	90	100	1
OP184/OP284/OP484	3–36	100	0,2	4,25	4	2	3,9	–	9750	10	450	10	86	90	1/2/4
AD8655/AD8656	2,7–5,5	250	0,4	28	11	4,5	4	0,4	–	3000	0,01	220	85	88	1/2
OP113/OP213/OP413	4–36	150	0,2	3,4	1,2	3	4,7	0,5	11 750	10	600	40	96	100	1/2/4
SSM2135	4–36	2000	–	3,5	0,9	3	5,2	0,9	10 400	3	750	30	87	90	2
OP285	9–36	250	1	9	22	2,5	6	0,005	6667	125	350	30	80	85	2
AD8610/AD8620	10–27	100	0,5	25	60	3,5	6	1,5	1 200 000	1000	0,01	65	90	100	1/2
OP275	9–44	1000	2	9	22	2,5	6	0,8	4000	2,24	350	14	80	85	2
OP467	9–36	500	3,5	28	170	2,5	6	0,4	7500	8	600	40	80	96	4
OP471	9–36	1800	4	6,5	8	2,75	6,5	0,2	16 250	5	60	10	95	95	4
OP1177/OP2177/OP4177	5–36	60	0,2	1,3	0,7	0,5	7,9	–	39 500	10	2	25	120	120	1/2/4
AD8510/AD8512/AD8513	9–36	400	1	8	20	2,5	8	0,025	–	100	0,08	70	86	86	1/2/4
AD8651/AD8652	2,7–5,5	350	4	50	41	14	8	–	320 000	10 000	0,01	80	80	76	1/2
AD8646/AD8647/AD8648	2,7–5,5	2500	1,8	24	11	1,5	8	0,01	–	1000	0,001	120	67	63	1/2(SD)/4
AD8605/AD8512/AD8513	2,7–5,5	300	1	10	5	1,2	8	0,05	800 000	500	0,001	80	85	80	1/2/4
AD8691/AD8692/AD8694	2,7–6	2000	1,3	10	5	1,05	8	0,4	160 000	3000	0,001	80	70	80	1(SD)/2(SD)/4(SD)/4
OP162/OP262/OP462	2,7–12	325	1	15	13	0,8	9,5	0,12	23 750	10	600	30	70	60	1/2/4
OP07	6–36	75	0,3	0,6	0,3	4	9,6	0,074	80 000	100	4	30	106	94	1
OP07D	8–36	150	0,5	0,6	0,2	1,3	10	0,074	135 135	8	1	30	120	115	1
AD8677	8–36	150	0,5	0,6	0,2	1,3	10	0,074	135 135	8	1	30	120	115	1
AD8615/AD8616/AD8618	2,7–5,5	500	1,5	24	12	2	10	0,05	200 000	1000	0,001	150	80	70	1/2/4
AD8519/AD8529	2,7–12	1100	2	8	2,9	1,2	10	0,4	25 000	80	300	70	63	60	1/2
AD8665/AD8666/AD8668	5–16	2500	3	4	3,5	1,55	10	0,1	100 000	1000	0,001	140	90	98	1/2/4
AD8661/AD8662/AD8664	5–16	160	4	4	3,5	1,55	12	0,1	120 000	1000	0,001	140	90	95	1/2/4
OP97/OP297/OP497	4–40	75	0,3	0,9	0,2	0,38	14	0,02*	1 166 667	200	0,15	10	110	110	1/2/4
OP777/OP727/OP747	3–36	100	0,3	0,7	0,2	0,35	15	0,13	115 384	20	11	30	110	120	1/2/4
AD8517/AD8527	1,8–6	3500	2	7	8	1,2	15	1,2	12 500	200	450	10	60	90	1/2

Примечание. * — условия измерений в соответствии со спецификациями.

Таблица 2. Данные для выбора усилителя с низким входным токовым шумом фирмы Analog Devices

Тип	Напряжение питания (V_{SY}), В	Напряжение смещения (V_{OS} макс.), мкВ	Температурный коэффициент напряжения смещения (ТСУ $_{OS}$), мкВ/°С	Полоса (GBW), МГц	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	Максимальный ток потребления на один усилитель (I_{SV}/AMR макс.), мА	Спектральная плотность шумового напряжения (e_n при 1 кГц), нВ/√Гц	Спектральная плотность шумового тока (i_n при 1 кГц), пА/√Гц	Входной импеданс ($R_{S, P}$ при 1 кГц), Ом	Частота залома характеристики 1/г, Гц	Максимальный выходной ток (I_o макс.), мА	Ток КЗ (I_{SC}), мА	Коэффициент ослабления синфазного сигнала (CMRR мин.), дБ	Коэффициент влияния источника питания (PSRR мин.), дБ	Число усилителей
AD549	10–36	40	0,2	5	20	10,5	0,9	2	450	60	900	80	120	120	1
AD548K/B	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD743	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD745	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD711C	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD8605/AD8606/AD8608	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD8651/AD8652	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD8615/AD8616/AD8618	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD8691/AD8692/AD8694	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
AD8661/AD8662/AD8664	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2
OP07	9–36	120	0,8	10	15	5,7	1,07	2,3	465	9	200	52	120	120	1/2

Литература

1. Analog Devices, Inc. AN-280 Application Note Mixed Signal Circuit Techniques.
2. Barrow J., Brokaw P. Grounding for Low- and High-Frequency Circuits // Analog Dialogue. Analog Devices, Inc. 23.3,1989.
3. Bennett W. R. Electrical Noise. New York: McGraw-Hill, 1960.
4. Bowers D. F. Minimizing Noise in Analog Bipolar Circuit Design. IEEE Press, 1989.
5. Brockman D., Williams A. AN-214 Application Note Ground Rules for High-Speed Circuits. Analog Devices, Inc.
6. Brokaw P. AN-202 Application Note An IC Amplifier User's Guide to Decoupling, Grounding, and Making Things Go Right for a Change. Analog Devices, Inc. February, 2000.
7. Brokaw P., Barrow J. AN-345 Application Note Grounding for Low- and High-Frequency Circuits. Analog Devices, Inc.
8. Bryant J., Counts L. Op Amp Issues-Noise // Analog Dialogue. Analog Devices Inc. 24.2,1990.
9. Freeman J. J. Principles of Noise. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1958.
10. Gupta, Madhu S. Electrical Noise: Fundamentals & Sources. New York: IEEE Press, 1977. Collection of classical reprints.
11. Johnson J. B. Thermal Agitation of Electricity in Conductors (Physical Review 32). 1928.
12. Motchenbacher C. D., Connelly J. A. Low-Noise Electronic Design. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
13. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors (Physical Review 32). 1928.
14. Rice S. O. Math Analysis for Random Noise // Bell System Technical Journal. July, 1944.
15. Rich A. Understanding Interference-Type Noise // Analog Dialogue. Analog Devices Inc. 16.3.1982.
16. Rich A. Shielding and Guarding // Analog Dialogue. Analog Devices, Inc. 17.1.1983.
17. Ryan A., Scranton T. DC Amplifier Noise Revisited // Analog Dialogue. Analog Devices, Inc. 18.1.1984.
18. Schottky W. Small-Shot Effect and Flicker Effect // Phys. Rev. 28. 1926.
19. Van Der Ziel A. Noise. Englewood Cliffs. NJ: Prentice-Hall, Inc., 1954.