

## Предупреждение частых ошибок при разработке схем с усилителями

По сравнению с усилителями, собранными на дискретных полупроводниковых элементах, операционные и инструментальные усилители (ОУ и ИУ) предоставляют разработчику большие удобства. Опубликовано огромное количество остроумных, полезных и привлекательных схем. Но очень часто схема, смонтированная поспешно, без учета некоторых основных требований, не работает как положено.

В этой статье рассмотрено несколько наиболее характерных ошибок в применении этих устройств и предложены практические решения.

Чарльз КИТЧИН  
charles.kitchin@analog.com

### Отсутствует цепь для отвода тока смещения при связи по переменному току

Одна из наиболее распространенных ошибок при применении связи по переменному току в схемах с операционными или инструментальными усилителями — это отсутствие цепи постоянного тока для стекания тока смещения. На рис. 1 включение последовательно с неинвертирующим входом (+) ОУ конденсатора для связи по переменному току является простым способом не пропустить постоянную составляющую, имеющуюся во входном напряжении ( $V_{IN}$ ). Это особенно полезно для схем с большим усилением, где даже небольшое постоянное напряжение на входе может ограничить динамический диапазон или вызвать насыщение выхода. Однако емкостная связь на высокоомном входе приведет к неприятностям, если не обеспечить цепь постоян-

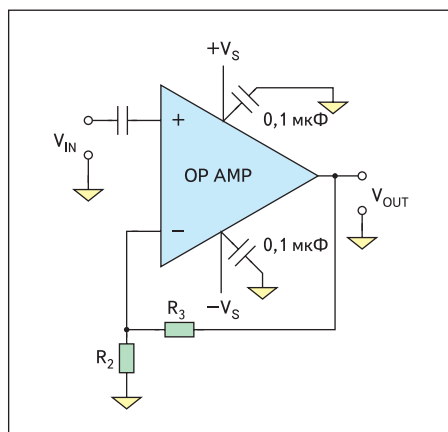


Рис. 1. Неработоспособная схема на ОУ со связью по переменному току

ному току, текущему в неинвертирующий вход или из него.

В такой схеме входные токи смещения будут течь через разделительный конденсатор, заряжая его, пока синфазное напряжение на входе не достигнет максимально допустимого значения или пока выход не достигнет предельного напряжения. В зависимости от направления входного тока смещения конденсатор будет заряжаться или до положительного, или до отрицательного напряжения питания. Напряжение смещения усиливается коэффициентом усиления при замкнутой ОС по постоянному току.

Этот процесс может занять длительное время. Например, усилитель с полевыми транзисторами на входе с током смещения 1 пА с конденсатором развязки 0,1 мкФ будет заряжаться со скоростью  $I/C \cdot 10^{-12}/10^{-7} = 10$  мкВ/с

или 600 мкВ в минуту. Если коэффициент усиления равен 100, выходное напряжение будет меняться на 0,06 В в минуту. Таким образом, испытания в лаборатории (с помощью осциллографа с входом по переменному току) могут не выявить эту проблему, и схема будет работоспособна в течение нескольких часов. Разумеется, очень важно не допустить подобной проблемы.

На рис. 2 показано решение этой весьма распространенной задачи. Для обеспечения цепи протекания тока смещения здесь вход ОУ соединен с «землей» с помощью резистора. Для минимизации входных напряжений смещения, вызванных токами смещения, которые отслеживают друг друга в биполярных ОУ, сопротивление резистора R1 выбирают равным сопротивлению параллельно включенных R2 и R3.

Однако отметим, что данный резистор будет всегда привносить в схему некоторый шум, так что должен быть компромисс между входным импедансом схемы, требуемой емкостью входного развязывающего конденсатора, и тепловым шумом, добавляемым резистором. Типичные значения сопротивления резистора лежат в диапазоне от 100 кОм до 1 МОм.

Аналогичная проблема может иметь место и в схеме с инструментальным усилителем. На рис. 3 показана схема с ИУ с двумя разделительными конденсаторами, не обеспечивающая цепь для протекания входного тока смещения. Эта проблема обычна для инструментальных усилителей, работающих как в схеме с двухполярным питанием (рис. 3а), так и в схеме с одним источником питания (рис. 3б).

Подобная проблема может возникнуть и при трансформаторной связи, как на рис. 4, если нет цепи для постоянного тока на «землю»

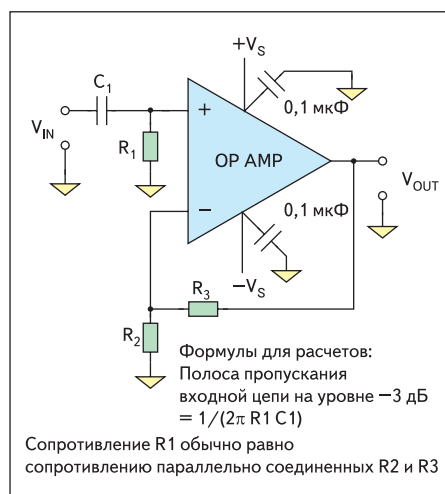


Рис. 2. Правильный подход к обеспечению связи по переменному току входа ОУ при работе с двухполярным питанием

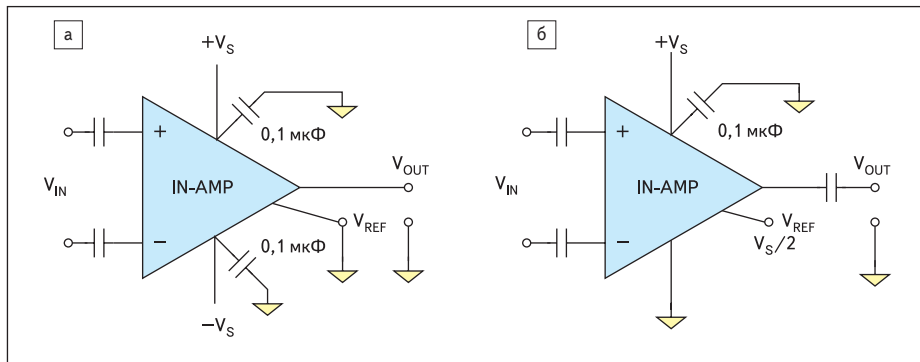


Рис. 3. Примеры неработоспособных схем со связью по переменному току на ИУ: а) двухполярный источник питания; б) однополярный источник питания

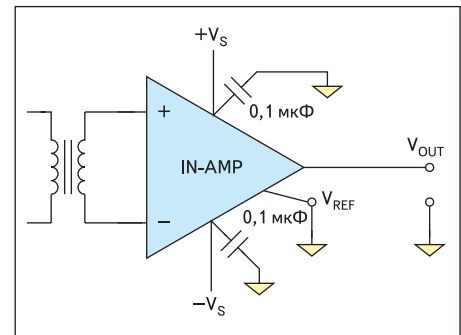


Рис. 4. Неработоспособная схема с трансформаторной связью на ИУ

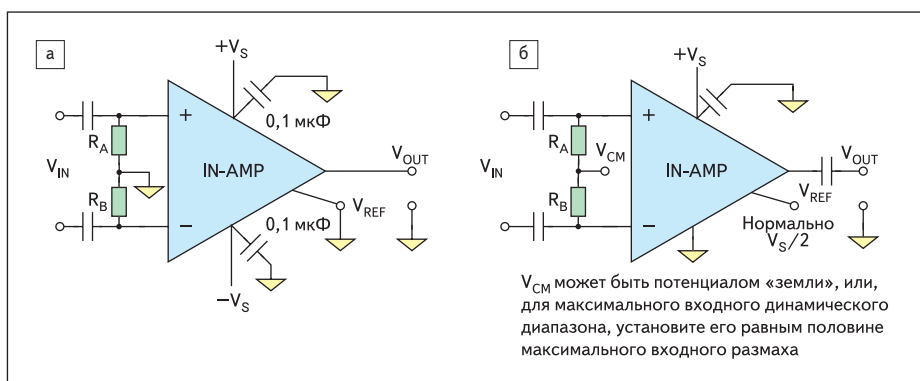


Рис. 5. Высокоомный резистор между каждым входом и общим проводом необходим для пути возврата тока смещения на «землю»: а) двухполярное питание; б) однополярное питание

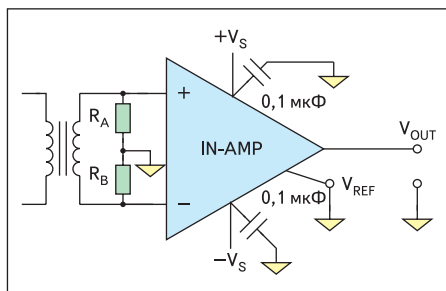


Рис. 6. Правильный способ трансформаторной связи со входами ИУ

на стороне вторичной обмотки трансформатора.

Простые решения этих проблем показаны на рис. 5 и 6. Здесь между каждым входом и «землей» добавлены высокоомные резисторы  $R_A$  и  $R_B$ . Это простое и практичное решение для схем на ИУ с двухполярным питанием.

Эти резисторы обеспечивают путь для стекания входного тока смещения на «землю». В схеме с двухполярным источником питания (рис. 5а) теперь оба входа связаны по постоянному току с «землей». В схеме с однополярным питанием на рис. 5б оба входа соединены или с «землей» (при  $V_{CM}$ , подключенной к «земле»), или с напряжением смещения, обычно равным половине максимального размаха входного напряжения.

Точно такой принцип может быть использован для входов с трансформаторной связью (рис. 6), за исключением случая, когда обмотка трансформатора имеет среднюю точку. Средняя точка трансформатора может быть соединена с «землей» или с  $V_{CM}$ .

В этих схемах погрешность в виде небольшого напряжения смещения нуля возникает из-за несовпадения номиналов входных резисторов или несовпадения входных токов смещения. Для минимизации таких погрешностей между двумя резисторами можно подключить третий резистор с величиной сопротивления около 1/10 сопротивления этих двух (но больше, чем дифференциальное сопротивление источника), таким образом шунтируя эти резисторы.

### Подача опорного напряжения на ОУ, ИУ и АЦП

На рис. 7 приведена схема с однополярным питанием, в которой напряжение на несимметричный вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) подается с инструментального усилителя. Опорное напряжение усилителя обеспечивает напряжение смещения, соответствующее нулевому дифференциальному входному напряжению, а опорное напряжение АЦП обеспечивает коэффициент масштабирования. Для снижения внеполосного шума между выходом ИУ и входом АЦП часто применяется простой сглаживающий RC-фильтр нижних частот. Разработчики часто соблазняются простыми решениями — например, для подачи опорного напряжения на ИУ и АЦП применяют резистивные делители вместо низкоомного источника. Для некоторых ИУ это может послужить причиной появления погрешности.

### Корректная подача опорного напряжения в ИУ

Часто полагают, что вход для подачи опорного напряжения высокоомный (поскольку это вход). Так, разработчики могут соблазниться подключить высокоомный источник, например резистивный делитель, к выводу ИУ для опорного напряжения. С некоторыми типами инструментальных усилителей это может привести к значительным погрешностям (рис. 8).

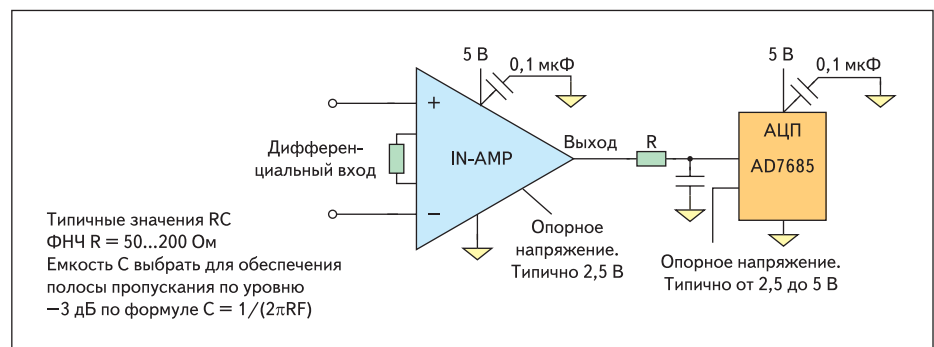


Рис. 7. Типичная схема подачи сигнала с ИУ на АЦП с однополярным питанием

Типичные значения RC ФНЧ  $R = 50 \dots 200$  Ом  
Емкость  $C$  выбрать для обеспечения полосы пропускания по уровню  $-3$  дБ по формуле  $C = 1 / (2\pi R F)$

Опорное напряжение. Типично 2,5 В  
Опорное напряжение. Типично от 2,5 до 5 В

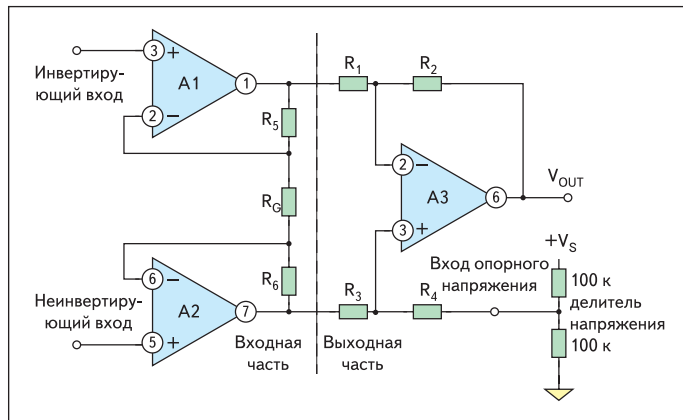


Рис. 8. Неправильное использование простого делителя напряжения для непосредственной подачи опорного напряжения в инструментальный усилитель из трех ОУ

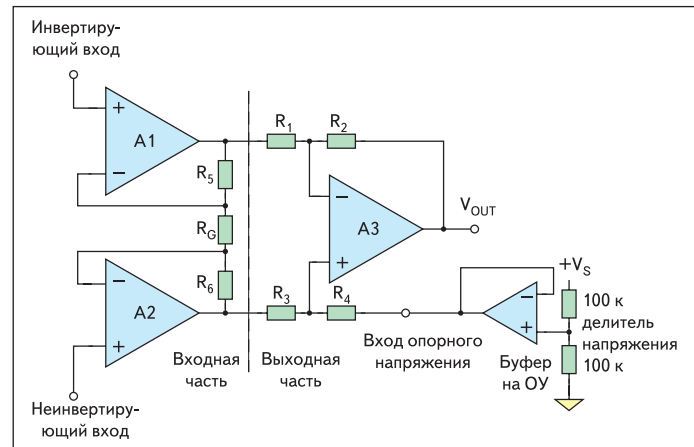


Рис. 9. Подача опорного напряжения на ИУ с низкоимпедансного выхода ОУ

Например, в конструкции популярного ИУ применено три ОУ, соединенных, как показано выше. Общий коэффициент усиления равен:

$$G = \left( 1 + \frac{R_5}{R_G} + \frac{R_6}{R_G} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$$

где  $R_2/R_1 = R_4/R_3$ .

Коэффициент передачи для входа опорного напряжения равен единице (при подаче напряжения от источника с низким импедансом). Однако в рассматриваемом случае вывод опорного напряжения ИУ подключен к простому делителю напряжения на резисторах. Это приводит к разбалансу схемы вычитания и нарушает коэффициент деления делителя напряжения. В свою очередь, это снижает коэффициент подавления синфазного сигнала в ИУ и точность его коэффициента усиления. Однако если бы внутренний резистор R4 был нам доступен, то при снижении его сопротивления на величину, равную параллельному соединению двух резисторов делителя напряжения (здесь 50 кОм), схема вела бы себя так, будто к изначальному сопротивлению резистора R4 подключен низкоомный источник, равный (в данном примере) половине напряжения питания, и точность схемы вычитания была бы сохранена.

Этот подход невозможен, если ИУ — интегральная схема в закрытом корпусе. Еще одна проблема заключается в том, что температурные коэффициенты сопротивления (ТКС) внешних резисторов делителя отличаются от ТКС резистора R4 и других резисторов схемы вычитания. И, наконец, такой подход не позволяет регулировать значение опорного напряжения. Если, с другой стороны, попытаться использовать в делителе напряжения низкоомные резисторы, чтобы влияние их добавленного сопротивления было бы пренебрежимо малым, то ток потребления от источника питания и рассеиваемая мощность схемы увеличатся. В любом случае, такой метод «грубой силы» не приносит успеха.

На рис. 9 показано лучшее решение — применение буфера на ОУ с малым потреблением энергии между делителем напряжения и входом опорного напряжения ИУ. Это ликвидирует необходимость подбора сопротивлений и проблему резисторов с разными ТКС, а также дает возможность легко регулировать опорное напряжение.

#### Сохранение коэффициента ослабления отклонений напряжения источника питания (КОНИП) при формировании опорного напряжения делителями из напряжения источника питания

Часто при анализе не учитывается тот факт, что любой шум, импульсные помехи и дрейф напряжения источника питания  $V_S$ , подаваемого на вход опорного напряжения напрямую, добавляются к выходному напряжению, ослабленные только коэффициентом деления делителя. Практические решения включают в себя развязывание конденсаторами, фильтрацию и, возможно, даже генерацию опорного напряжения прецизионными интегральными схемами, например ADR121, вместо ответвления напряжения  $V_S$ .

Этот анализ особенно важен, когда разрабатываемые схемы содержат и операционные, и инструментальные усилители. Методика ослабления отклонений питающего напряжения применяется для того, чтобы изолировать усилитель от помех, шумов и других кратковременных изменений напряжения, присутствующих на шине питания. Это важно, потому что многие практические схемы содержат, подключаются или существуют в окружении далеко не идеальных источников напряжений питания. Кроме того, существующие на шинах питания переменные составляющие могут проникнуть в схему, усилиться и при нормальных условиях возбуждать паразитные колебания.

Современные операционные и инструментальные усилители обеспечивают значительное ослабление низкочастотных отклонений

напряжения источника питания. У разработчиков это считается как бы само собой разумеющимся. Многие современные ОУ и ИУ имеют в спецификациях значение КОНИП 80 и даже более 100 дБ, что ослабляет действие флуктуаций напряжения питания от 10 000 до 100 000 раз. Даже весьма умеренный КОНИП в 40 дБ ослабляет влияние флуктуаций питания на усилитель в 100 раз. Тем не менее, высокочастотные блокировочные конденсаторы (которые изображены на рис. 1–7) всегда желательны, и часто без них не обойтись.

Когда разработчики применяют простой резистивный делитель с шины питания и буфер на ОУ для подачи на вход опорного напряжения ИУ, все флуктуации напряжения источника питания проходят через эту схему с небольшим ослаблением и непосредственно добавляются к выходному уровню ИУ. Таким образом, пока не обеспечена низкочастотная фильтрация, высокое значение КОНИП интегральной схемы не дает существенных преимуществ.

На рис. 10 к делителю напряжения добавлен конденсатор, отфильтровывающий флуктуации напряжения питания в выходном напряжении и позволяющий сохранить значение КОНИП.

Полоса  $-3$  дБ этого фильтра устанавливается сопротивлением параллельно включенных R1/R2 и емкости конденсатора C1. Частота этого полюса должна быть примерно в 10 раз ниже, чем самая низкая частота сигнала.

При параметрах компонентов, приведенных на рисунке, спад  $-3$  дБ будет на частоте 0,03 Гц. Конденсатор с маленькой емкостью (0,01 мкФ), включенный параллельно R3, минимизирует шумы резистора.

Фильтру для заряда после включения требуется время. При приведенных номиналах время заряда составляет 10–15 с (несколько постоянных времени фильтра,  $T = R_3 C_f = 5$  с).

В схеме на рис. 11 предложены дальнейшие улучшения. Здесь буфер на ОУ работает как активный фильтр, что позволяет применить конденсаторы с меньшими емкостями для тех же значений развязывания источника пита-

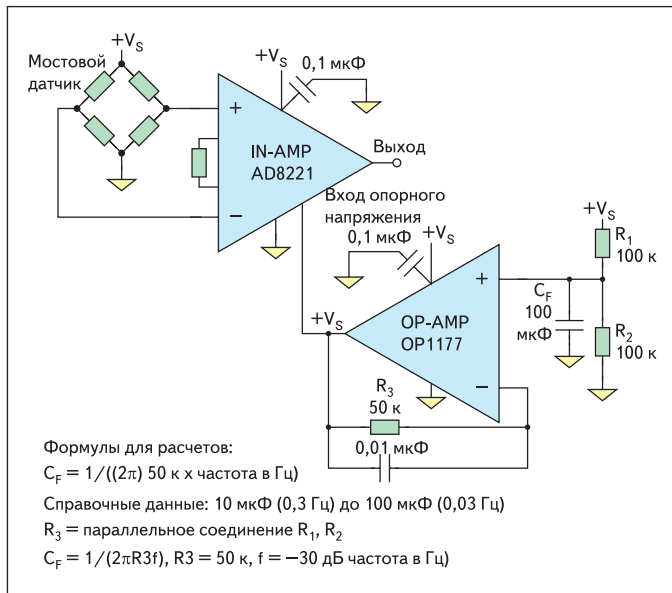


Рис. 10. Развязывание цепи опорного сигнала для сохранения КОНИП

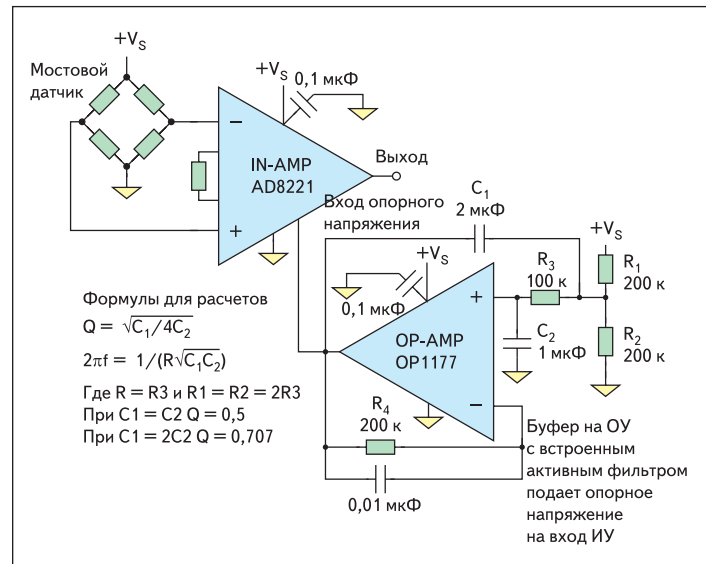


Рис. 11. Подача опорного напряжения на вход ИУ с выхода ОУ, включенного в качестве активного фильтра

ния. Кроме того, активный фильтр можно сделать высокочастотным, что уменьшит время включения.

**Результаты испытаний**

С указанными на схеме номиналами элементов и при источнике питания 12 В на входе ИУ было обеспечено 6 В опорного отфильтрованного напряжения. При коэффициенте усиления ИУ, равном единице, питающее напряжение 12 В было промодулировано синусоидальным сигналом с размахом 1 В с разными частотами. При этих условиях, при снижении частоты примерно до 8 Гц на экране осциллографа не наблюдалось переменного сигнала на опорном напряжении и на выходе ИУ. При небольших уровнях сигнала на входе ИУ измеренный диапазон напряжений питания для этой схемы составил от 4 до 25 В и более. Время включения схемы примерно 2 с.

**Развязывание напряжения питания схем на ОУ с однополярным питанием**

Чтобы работать с положительными и отрицательными полуволнами переменного сигнала, схемам на ОУ с однополярным питанием требуется синфазное смещение входа. При использовании для реализации такого смещения шины питания, для сохранения значения КОНИП требуется соответствующее развязывание.

Обычной и неправильной практикой для смещения неинвертирующего входа на уровень  $V_S/2$  является применение резистивного делителя 100/100 кОм с развязывающим конденсатором емкостью 0,1 мкФ. При таких номиналах элементов развязывание напряжения источника питания недостаточно, так как частота полюса составляет всего 32 Гц. Часто возникает нестабильность схемы (низкочастот-

ная генерация типа «шум мотора»), особенно при работе на индуктивную нагрузку.

На рис. 12 (неинвертирующая схема) и рис. 13 (инвертирующая схема) показаны улучшенные схемы для получения развязанного напряжения смещения  $V_S/2$ . В обеих схемах смещение подведено к неинвертирующему входу, обратная связь приводит инвертирующий вход к той же величине смещения, и единичный коэффициент усиления на постоянном токе смещает оба входа на одинаковое напряжение. Развязывающий конденсатор  $C_1$  понижает коэффициент усиления ниже частоты  $BW_3$  до единицы.

При использовании делителя 100/100 кОм хорошим эмпирическим правилом является применение конденсатора  $C_2$  с емкостью не менее 10 мкФ для получения спада на -3 дБ на частоте 0,3 Гц. Значение емкости 100 мкФ (полюс на частоте 0,03 Гц) достаточно практически для всех схем.

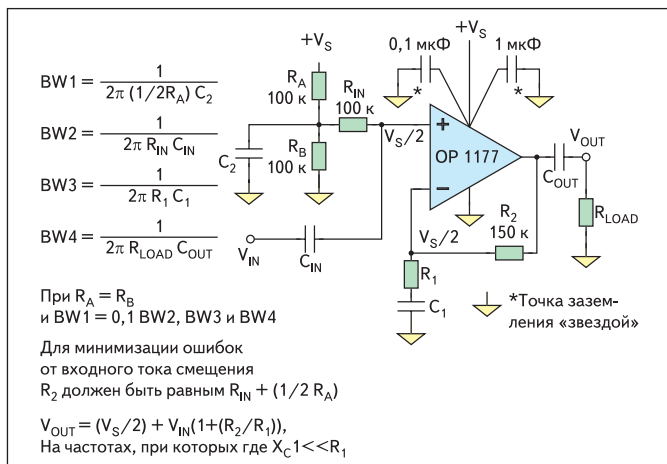


Рис. 12. Неинвертирующий усилитель с однополярным питанием с правильным развязыванием источника питания. Коэффициент усиления на средних частотах равен  $1 + R_2/R_1$

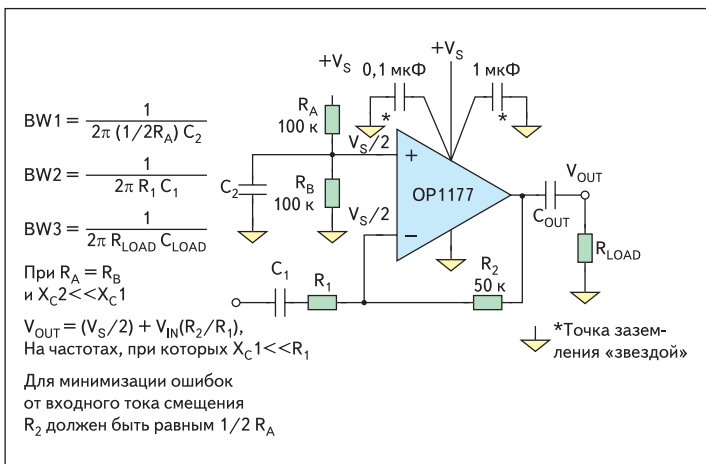


Рис. 13. Инвертирующий усилитель с однополярным питанием с правильным развязыванием источника питания. Коэффициент усиления на средних частотах равен  $-R_2/R_1$