

Практические способы устранения неустойчивости ОУ из-за емкостной нагрузки

Суфиан БЕНДАУД
(Soufiane BENDAOU)
Джампаоло МАРИНО
(Giampaolo MARINO)
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ
dsioffe@yandex.ru

В статье рассматриваются часто встречающиеся вопросы о влиянии емкостной нагрузки на работу некоторых схем усилителей, и предлагаются способы решения проблем неустойчивости, которые ею вызываются.

Емкостная нагрузка вызывает множество проблем. Отчасти это происходит потому, что она может уменьшить полосу пропускания и скорость нарастания выходного напряжения. Но основная причина трудностей — это то, что запаздывание по фазе, которое емкостная нагрузка вносит в контур обратной связи операционного усилителя, может вызвать неустойчивость. Несмотря на то, что некоторая емкостная нагрузка всегда неизбежна, слишком большая величина ее может вызвать выбросы и «звон» на выходе усилителя и даже возбуждение. Эта проблема становится особенно серьезной, когда необходимо подавать высокочастотный сигнал на большую емкостную нагрузку, такую как жидкокристаллическая панель или плохо согласованный коаксиальный кабель, но неприятные сюрпризы могут возникать и в прецизионных низкочастотных применениях или на постоянном токе.

Как правило, операционный усилитель наиболее склонен к неустойчивости, когда он включен как повторитель с единичным усилением. Это вызвано отсутствием ослабления в обратной связи, а также большим размахом синфазного сигнала, который хотя и незначительно влияет на усиление сигнала, но может модулировать петлевое усиление в зоне неустойчивости.

На способность операционного усилителя управлять емкостной нагрузкой влияют следующие основные факторы:

1. Внутренняя архитектура усилителя (например, выходной импеданс, усиление и запас по фазе, внутренняя схема коррекции).
2. Природа емкостной нагрузки.
3. Ослабление и фазовый сдвиг в схеме обратной связи с учетом влияния нагрузки на выходе, входного импеданса и паразитных емкостей.

Среди перечисленных параметров наибольшее влияние на работу с емкостной нагрузкой оказывает выходной импеданс усилителя, представленный выходным сопротивлением R_O . В идеале, устойчивый операционный усилитель с $R_O = 0$ может работать на любую емкостную нагрузку без ухудшения фазовых характеристик.

Большинство усилителей оптимизировано для работы с небольшой нагрузкой, поэтому их схемы внутренней коррекции (компенсации) не предназначены для работы со значительной емкостью на выходе. Поэтому при большой емкостной нагрузке на выходе операционного усилителя необходимо использовать внешнюю коррекцию. Обычно это требуется в усилителях схем выборки-хранения, пиковых детекторах и при работе на несогласованные коаксиальные кабели.

Емкостная нагрузка, как показано на рис. 1 и 2, одинаково влияет на усиление разомкнутой цепи обратной связи как в инвертирующем, так и в неинвертирующем усилителе. Емкость нагрузки C_L образует полюс совместно с выходным сопротивлением при разомкнутой обратной связи R_O . Выражение

для усиления при емкостной нагрузке можно записать следующим образом:

$$A_{loaded} = A \left(\frac{1}{1 + j \frac{f}{f_p}} \right),$$

где $f_p = 1/2\pi R_O C_L$ и A — усиление усилителя с разомкнутой обратной связью без нагрузки.

Полюс вносит наклон -20 дБ на декаду и задержку по фазе на 90° . Они добавляются к наклону -20 дБ на декаду и задержке по фазе на 90° , которые вносит усилитель, и к другим существующим в схеме задержкам. В результате наклон логарифмической амплитудно-частотной характеристики превышает -40 дБ на декаду, что, в свою очередь, вызывает неустойчивость.

Вопрос. Требуется ли для разных схем разные способы?

Ответ. Да, конечно. Вам нужно выбрать способ коррекции, который лучше всего подходит для вашего проекта. Некоторые примеры подробно разобраны далее. Например, рассмотрим способ коррекции, дополнительным преимуществом которого служит фильтрация шума на выходе операционного усилителя при помощи RC-цепи в обратной связи.

На рис. 3 показан распространенный способ коррекции, который часто называют внутритрелевой (in-the-loop) коррекцией. Небольшое последовательно включенное

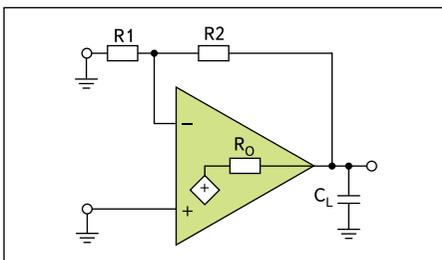


Рис. 1. Упрощенная схема операционного усилителя с емкостной нагрузкой

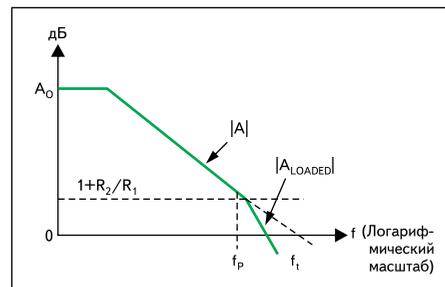


Рис. 2. Диаграмма Боде для схемы на рис. 1

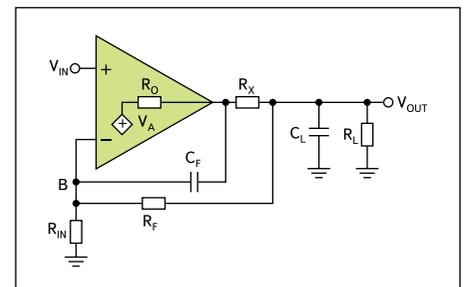


Рис. 3. Внутритрелевая схема коррекции

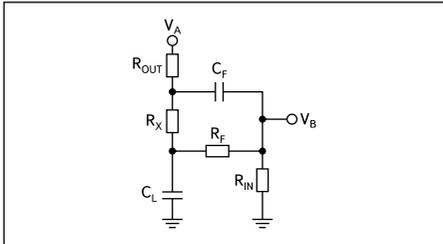


Рис. 4. Обратная связь схемы

сопротивление R_X отделяет выход усилителя от C_L , а небольшая емкость C_F введена в контур обратной связи, обеспечивая развязку от C_L на высоких частотах.

Для лучшего понимания этой техники рассмотрим отдельно перерисованную обратную связь схемы, показанную на рис. 4. Точка V_B подключается к инвертирующему входу усилителя.

Оба конденсатора, C_f и C_L , на постоянном токе представляют собой разрыв цепи, а на высоких частотах их можно считать накоротко замкнутыми. Помня об этом и глядя на рис. 4, применим это рассуждение к каждому конденсатору в отдельности.

- Случай 1. Если C_f замкнут накоротко, $R_X \ll R_f$ и $R_O \ll R_{in}$, то полюс и ноль будут определяться значениями C_L , R_O и R_X (рис. 5а). Таким образом, Частота_полюса = $1/[2\pi(R_O - R_X)C_L]$ и Частота_нуля = $1/2\pi R_X C_L$.
- Случай 2. Если C_L представляет собой разрыв цепи, то полюс и ноль определяются значением C_f (рис. 5б). Таким образом, Частота_полюса = $1/[2\pi(R_X + R_f)I(R_O - R_{in}C_f)]$ и Частота_нуля = $1/[2\pi(R_X + R_f)C_f]$

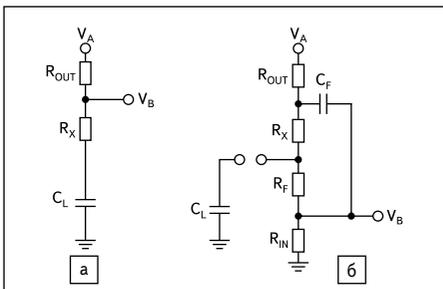


Рис. 5. а) Конденсатор C_f накоротко замкнут; б) конденсатор C_L представляет собой разрыв цепи

Приравняв полюс из случая 1 к нулю из случая 2, а полюс из случая 2 — к нулю из случая 1, мы получим следующие два уравнения:

$$R_X = (R_O R_{in}) / R_f$$

и

$$C_f = \left(1 + \frac{1}{|A_{cl}|} \right) \left(\frac{R_f + R_{in}}{R_f^2} \right) C_L R_O.$$

Формула для C_f содержит член A_{cl} (усиление усилителя с замкнутой цепью обратной

связи, $1 + R_f/R_{in}$). Необходимость включения этого члена в формулу была обнаружена экспериментально. Для описанной схемы этих двух формул достаточно, чтобы рассчитать цепи коррекции для любого операционного усилителя с любой емкостной нагрузкой.

Несмотря на то, что этот метод помогает предотвратить возбуждение при работе на большую емкостную нагрузку, он значительно уменьшает полосу пропускания схемы с замкнутой обратной связью. Полоса здесь определяется не операционным усилителем, а внешними компонентами, C_f и R_f которые задают полосу пропускания на уровне -3 дБ:

$$f_{-3\text{дБ}} = 1/(2\pi C_f R_f).$$

Хорошим практическим примером этой техники коррекции может служить AD8510, который безопасно работает на нагрузку до 200 пФ, сохраняя запас по фазе 45° на частоте единичного усиления. Если в схеме, показанной на рис. 3, использовать AD8510 с коэффициентом усиления 10, то при емкости нагрузки 1 нФ и типовом выходном импедансе 15 Ом значения R_X и C_f рассчитанные по приведенным выше формулам, составят 2 Ом и 2 пФ соответственно. Реакция схемы на прямоугольные импульсы показана на рис. 6. Хорошо виден быстрый отклик с колебательным переходным процессом в нескорректированной схеме и более медленный, но монотонный отклик в схеме с коррекцией.

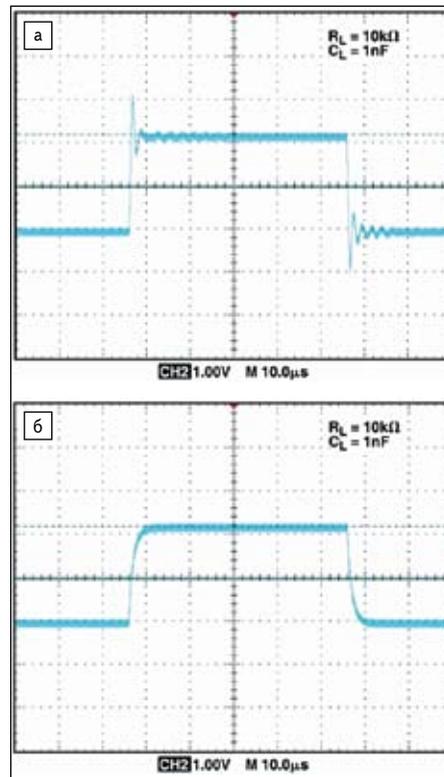


Рис. 6. Выходной сигнал AD8510: а) без коррекции; б) с коррекцией

Обратите внимание: на рис. 6б видно, что резистор R_X не ухудшает точность по постоянному току, так как он находится внутри петли обратной связи. Однако сопротивление R_X должно оставаться достаточно малым, чтобы избежать чрезмерного уменьшения размаха выходного сигнала и ухудшения скорости нарастания.

Примечание. Обсуждаемое здесь поведение обычно наблюдается у наиболее распространенных операционных усилителей с обратной связью по напряжению. Усилители с обратной связью по току требуют другого подхода, и это выходит за рамки нашего обсуждения. Если эту технику использовать для усилителей с обратной связью по току, то применение C_f приведет к неустойчивости схемы.

Коррекция вне петли обратной связи

Вопрос. Существует ли более простая схема коррекции, с меньшим числом компонентов?

Ответ. Да, есть более простой путь: использование одного внешнего (для петли обратной связи) резистора последовательно с выходом. Это эффективный метод, но он может ухудшить показатели качества схемы (рис. 7).

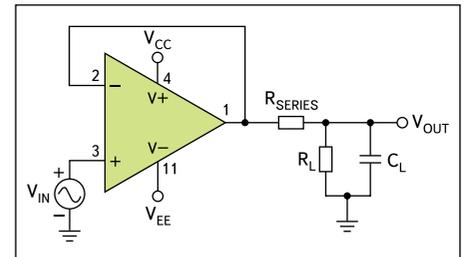


Рис. 7. Внешний резистор R_{series} изолирует обратную связь усилителя от емкостной нагрузки

Здесь резистор R_{series} расположен между выходом и нагрузкой. Основное назначение этого резистора — изолировать выход операционного усилителя и цепь обратной связи от емкостной нагрузки. Он вносит в передаточную функцию цепи обратной связи ноль, который уменьшает фазовый сдвиг в петле на высоких частотах. Для уверенности в том, что схема будет устойчивой, величину R_{series} нужно выбрать так, чтобы ноль, который он добавляет, располагался не менее чем на декаду ниже частоты единичного усиления. Требуемое значение последовательного сопротивления зависит, в первую очередь, от выходного импеданса используемого усилителя. Сопротивления от 5 до 50 Ом обычно достаточно, чтобы предотвратить неустойчивость. На рис. 8 показан отклик на выходе OP1177 с нагрузкой 2 нФ и размахом сигнала на неинвертирующем входе 200 мВ от пика до пика. На рис. 9 показан отклик на выходе при тех же условиях, но с 50-омным резистором между выходом ОУ и нагрузкой.

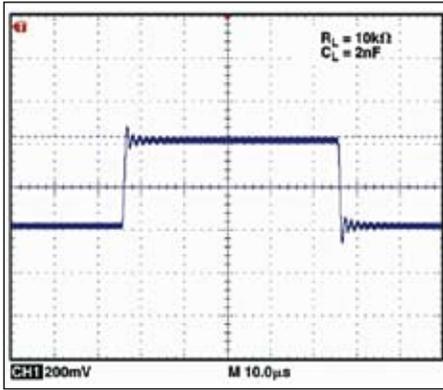


Рис. 8. Отклик на выходе OP1177, включенного по схеме повторителя, с емкостной нагрузкой (обратите внимание на высокочастотные переходные процессы)

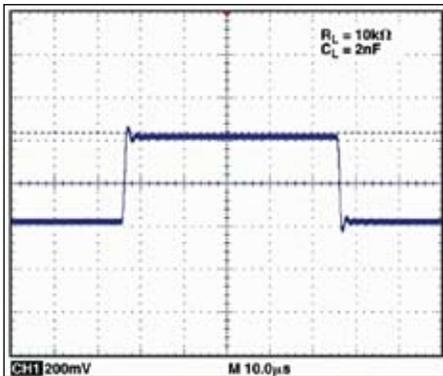


Рис. 9. Отклик на выходе OP1177 с 50-омным последовательным резистором (обратите внимание на уменьшение переходных процессов)

Выходной сигнал будет ослабляться пропорционально отношению сопротивления последовательного резистора к его сумме с сопротивлением нагрузки. Это потребует большего размаха сигнала на выходе усилителя для достижения заданного коэффициента усиления. Нелинейная или переменная нагрузка будет влиять на форму и амплитуду выходного сигнала.

Снаббер

Вопрос. Например, используется усилитель «от шины до шины». Можете ли вы посоветовать метод стабилизации, сохраняющий размах выходного напряжения и точность усиления?

Ответ. Да. Для низковольтных применений, в которых требуется полный размах выходного напряжения, используют схему из последовательно соединенных резистора и конденсатора, которые включаются между выходом и «землей» (рис. 10). Такая схема называется снаббером (snubber, амортизатор).

В зависимости от емкостной нагрузки, для определения нужных величин R_S и C_S инженеры обычно применяют экспериментальные методы. Принцип состоит в том, чтобы получить на выходе усилителя резистивную

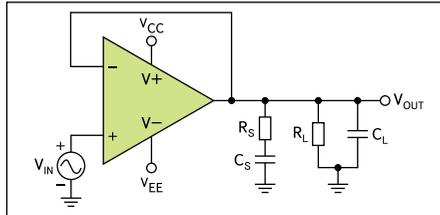


Рис. 10. R_S и C_S образуют схему снаббера, который уменьшает фазовый сдвиг, вызванный C_L

нагрузку для частот в окрестности выброса на амплитудно-частотной характеристике. Таким образом, применение снаббера снижает усиление усилителя, а последовательно включенная емкость уменьшает нагрузку на низких частотах. Процедура выбора номиналов компонентов снаббера выглядит так:

- Снимают амплитудно-частотную характеристику усилителя для определения частоты выброса.
- Экспериментально подбирают величину резистивной нагрузки для уменьшения выброса до приемлемого значения.
- Затем рассчитывают емкость C_S так, чтобы получить частоту излома частотной характеристики, примерно равной 1/3 частоты выброса.

Таким образом, $C_S = 3/(2\pi f_p R_S)$, где f_p — частота выброса на амплитудно-частотной характеристике.

Эти номиналы могут быть также найдены методом проб и ошибок при помощи наблюдения переходных процессов (с емкостной нагрузкой) на осциллографе. Идеальные величины R_S и C_S дадут минимальный размах колебаний во время переходных процессов. На рис. 11а показан отклик на выходе усилителя AD8698 с нагрузкой 68 нФ на сигнал 400 мВ, приложенный к неинвертирующему входу. Выбросы на фронтах сигнала здесь составляют менее 25% без всякой внешней коррекции. Простая снабберная цепь уменьшает эти выбросы до менее чем 10%, как показано на рис. 11б. В этом случае R_S и C_S равны 30 Ом и 5 нФ соответственно.

Вопрос. Вы показали, что делать при емкостной нагрузке на выходе усилителя. А как насчет емкости на входах?

Ответ. Да, емкость на входах операционного усилителя может вызывать проблемы

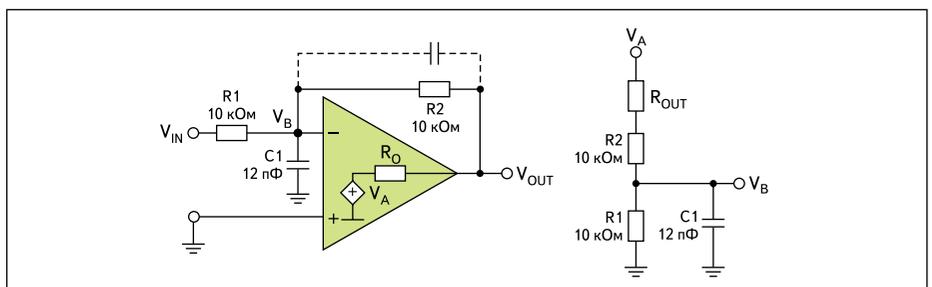


Рис. 12. Емкостная нагрузка на входе — инвертирующая конфигурация

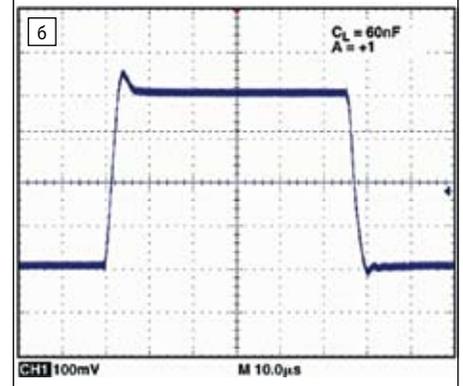
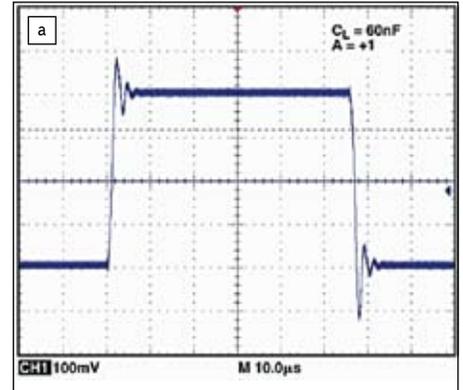


Рис. 11. Отклик на выходе AD8698; а) без коррекции; б) со снабберной цепью

с устойчивостью. Рассмотрим это на нескольких примерах.

Одна из распространенных ситуаций — это преобразование тока в напряжение, когда операционный усилитель используется как буфер-усилитель для ЦАП с токовым выходом. Общая емкость на входе состоит из выходной емкости ЦАП, входной емкости усилителя и паразитной емкости проводников.

Другое популярное применение, при котором на входе операционного усилителя может появиться значительная емкость, — это активные фильтры. Некоторые инженеры могут поставить большой конденсатор параллельно входу (часто последовательно с резистором), чтобы не допустить прохождения радиочастотного шума через усилитель, невзирая на то, что это может привести к большому «звону» или даже возбуждению.

Чтобы лучше понять, что же происходит в этом случае, проанализируем схему на рис. 12.

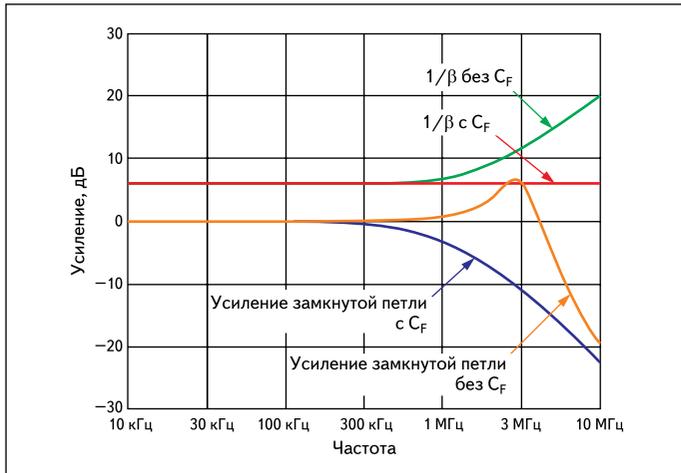


Рис. 13. Частотные характеристики схемы на рис. 12

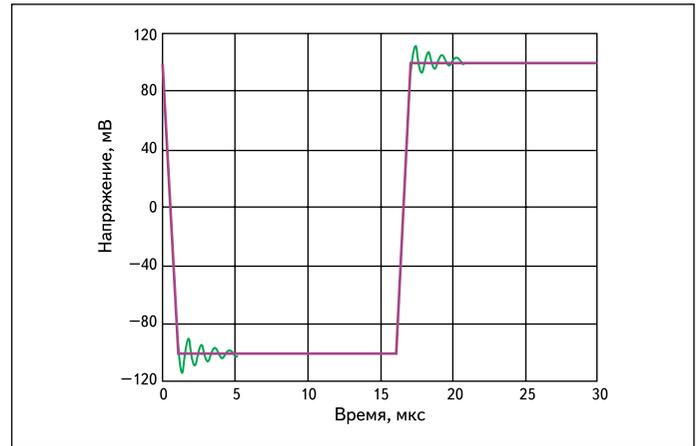


Рис. 15. Сравнение откликов схем, показанных на рис. 14 (схема на рис. 14 а имеет колебательный отклик)

Представим эквивалентную схему ее обратной связи (вход V_{in} заземлен), чтобы получить передаточную функцию обратной связи:

$$\frac{V_B}{V_A} (= \beta) = \frac{R_1}{(R_O + R_2)(1 + sR_1C_1) + R_1},$$

которая дает полюс на частоте:

$$f_p = \frac{R_1 + R_2 + R_O}{2\pi R_1 C_1 (R_2 + R_O)}$$

Эта функция показывает, что график шумового усиления ($1/\beta$) спадает под уклоном 20 дБ на декаду выше частоты излома f_p . Если f_p заметно ниже, чем частота единичного усиления при разомкнутой обратной связи, то система будет неустойчивой. Это связано с приближением скорости спада частотной характеристики к 40 дБ на декаду. Скорость спада определяется как величина разности между наклоном графика усиления с разомкнутой обратной связью в дБ (-20 дБ на декаду для большей части диапазона интересующих частот) и наклоном графика $1/\beta$ в окрестности частоты их пересечения (петлевое усиление равно 0 дБ).

Чтобы «вылечить» неустойчивость, вызванную C_1 , параллельно R_2 можно подключить конденсатор C_2 . Он обеспечит ноль, согласованный с полюсом на частоте f_p , чтобы уменьшить наклон частотной характеристики и тем самым увеличить запас по фазе. Для получения запаса по фазе 90° потребуется $C_2 = (R_1/R_2)C_1$.

На рис. 13 показаны частотные характеристики усилителя AD8605, включенного по схеме, приведенной на рис. 12.

Вопрос. Можно ли определить, каков должен быть запас по фазе или какого выброса на частотной характеристике можно ожидать?

Ответ. Да.

Вы можете определить величину выброса на частотной характеристике для некорректированной схемы, используя следующую формулу:

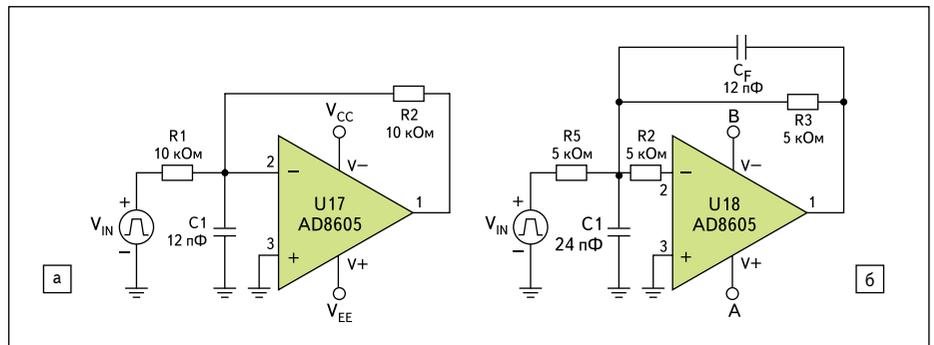


Рис. 14. Входной фильтр: а) без коррекции; б) с коррекцией и меньшими значениями импедансов

$$Q = \sqrt{\frac{f_u}{f_z}},$$

где $f_z = 1/(2\pi(R_1 \parallel R_2)C_1)$, f_u — полоса единичного усиления, f_z — точка излома кривой $1/\beta$ и C_1 — общая емкость, внутренняя и внешняя, включая любые паразитные емкости.

Запас по фазе (Φ_m) можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Phi_m = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4Q^4} - \frac{1}{2Q^2}} \right).$$

AD8605 имеет общую входную емкость около 7 пФ. Предположим, что паразитная емкость составляет около 5 пФ, график усиления с замкнутой обратной связью будет иметь выброс, в худшем случае, 5,5 дБ, и воспользуемся приведенным выше выражением. Получим запас по фазе 29°, это серьезное ухудшение по сравнению с естественным фазовым сдвигом операционного усилителя 64°.

Вопрос. Как убедиться в том, что схема с операционным усилителем будет устойчива, при использовании RC-фильтра непосредственно на входе?

Ответ. Можно использовать технику, подобную описанной выше. Вот пример.

Для того чтобы уменьшить высокочастотные помехи, часто требуется подключить конденсатор между входом усилителя и «землей». Этот фильтрующий конденсатор влияет на динамику операционного усилителя подобно добавочной паразитной емкости. Не все операционные усилители ведут себя одинаково, одни менее «терпимы» к емкости на входе, другие — более. Поэтому в любом случае полезно добавить в обратную связь конденсатор C_f для коррекции. Для дальнейшего уменьшения радиочастотных помех можно подключить последовательно с входом усилителя небольшой резистор. В сочетании с входной емкостью усилителя он обеспечит фильтрацию радиочастот. На рис. 14а показана схема, для которой трудно обеспечить устойчивость. А на рис. 14б — значительно улучшенная схема. На рис. 15 приведены наложенные друг на друга графики их откликов на прямоугольные импульсы.

Вопрос. Ранее вы упоминали, что паразитная емкость добавляется к общей входной емкости. Насколько значительна паразитная емкость?

Ответ. Непредвиденная паразитная емкость может оказать пагубное воздействие на устойчивость операционного усилителя. Очень важно знать о ней и минимизировать ее.

Основным источником паразитной входной емкости может оказаться неудачная раз-

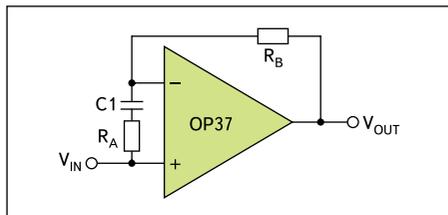


Рис. 16. На входе повторителя с единичным усилением используется последовательная RC-цепь, чтобы стабилизировать усилитель, неустойчивый при единичном усилении

водка печатной платы. Эту емкость вносят входные проводники в точках подключения операционного усилителя. Например, один квадратный сантиметр печатной платы с «земляным» слоем под ним дает емкость около 2,8 пФ (в зависимости от толщины платы).

Чтобы уменьшить эту емкость, всегда делайте входные проводники как можно короче. Размещайте резистор обратной связи и источник сигнала как можно ближе к входу операционного усилителя. Делайте в «земляном» слое вырезы под операционными усилителями, особенно под входами, за исключением тех случаев, когда подключение к «земле» требуется для схемы и неинвертирующий вход заземлен. Когда «земля» реально необходима, используйте для подключения к ней широкие проводники для получения минимального сопротивления.

Вопрос. Можно ли использовать в схеме с единичным усилением усилитель, неустойчивый при единичном усилении? OP37 — хороший усилитель, но для устойчивой работы он должен использоваться с усилением не меньше пяти.

Ответ. Можно использовать такой усилитель с меньшим усилением, если воспользоваться специальным способом. На рис. 16 показан такой способ.

На рис. 16 R_B и R_A дают достаточное усиление с замкнутой обратной связью на высоких частотах, чтобы обеспечить устойчивость усилителя, а C_1 снижает усиление до единицы на низких частотах и постоянном токе. Рассчитать сопротивления R_B и R_A достаточно просто, исходя из минимального усиления, допустимого для устойчивой работы усилителя. В случае с OP37 для получения устойчивости требуется коэффициент усиления с замкнутой обратной связью не менее 5, поэтому $R_B = 4R_A$ для $\beta = 1/5$. На высоких частотах, когда C_1 ведет себя как короткое замыкание, операционный усилитель работает с коэффициентом усиления 5 и поэтому устойчив. На постоянном токе и низких частотах, когда C_1 подобен разрыву цепи и сигнал обратной связи не ослабляется, схема ведет себя как повторитель с единичным усилением.

Следующим шагом будет расчет емкости конденсатора C_1 . Она должна быть выбра-

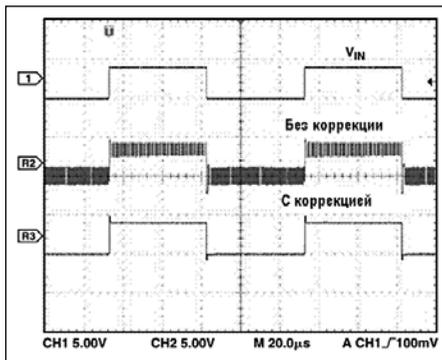


Рис. 17. Отклик OP37 с единичным усилением без коррекции и с коррекцией

на так, чтобы вносимый ею излом частотной характеристики был не менее чем на декаду меньше угловой частоты спада характеристики схемы до уровня -3 дБ:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_A \left(\frac{f_c}{10}\right)}$$

На рис. 17 показана реакция OP37 на перепады входного напряжения 2 В от пика до пика. Номиналы корректирующих компонентов выбраны с использованием приведенных выше формул для $f_c = 16$ МГц, $R_B = 10$ кОм, $R_A = R_B/4 = 2,5$ кОм, $C_1 = 1/(2\pi \times 2,5 \times 10^3 \times 16 \times 10^6 / 10) = 39$ пФ.

Вопрос. Можно ли использовать этот способ для инвертирующего включения? Можно ли пользоваться теми же самыми формулами?

Ответ. Для инвертирующего включения анализ проводится похожим способом, но формулы для усиления с замкнутой обратной связью несколько отличаются. Нужно помнить, что входной резистор на неинвертирующем входе операционного усилителя на высоких частотах включен параллельно R_A . Это параллельное соединение учитывается при расчете сопротивления R_A для минимального устойчивого усиления. Величина емкости C_1 рассчитывается так же, как и при неинвертирующем включении.

Вопрос. Есть ли отрицательные стороны у этой техники?

Ответ. Да, конечно. Увеличение шумового усиления вызывает увеличение уровня выходного шума на высоких частотах, которое может оказаться недопустимым для некоторых применений. Необходима тщательная разводка платы, особенно при высоком импедансе источника сигнала и неинвертирующем включении. В противном случае положительная обратная связь с неинвертирующим входом усилителя через емкость на частотах, где усиление выше единицы, может вызвать неустойчивость, а также увеличение шумов. ■