

РАБОТА ОУ НА ЕМКОСТНУЮ НАГРУЗКУ

Емкостная нагрузка часто преподносит проблемы в работу электронной схемы – уменьшается полоса выходного сигнала и скорость его нарастания. Кроме того, возникает отставание фазы выходного сигнала в цепи обратной связи от фазы входного, что может приводить к нестабильности. Неизбежность управления усилителем емкостной нагрузкой в некоторых схемах может приводить к перегрузке, перерегулированию (звону) и, иногда, возбуждению. Эффекты становятся более ощутимыми при управлении значительной емкостной нагрузкой – жидкокристаллические индикаторные панели или плохо согласованные коаксиальные кабели. Однако эти проблемы могут возникать даже в низкочастотных прецизионных схемах и схемах, работающих на постоянном токе.

Операционный усилитель в большей степени подвержен нестабильности, когда он работает как буфер с единичным коэффициентом усиления, поскольку в этом случае в цепи обратной связи не происходит ослабления сигнала, передаваемого с выхода на вход, либо при большой синфазной составляющей входного сигнала, которая, несмотря на постоянство коэффициента передачи, может модулировать петлевое усиление на участке нестабильности.

Способность ОУ управлять емкостной нагрузкой определяется несколькими факторами:

1. внутренней структурой усилителя (выходным импедансом, встроенной коррекцией, запасом по фазе и усилению и т.п.),
2. характером нагрузки,
3. ослаблением сигнала и его фазовым сдвигом в цепи обратной связи, включая эффекты влияния выходной нагрузки, входного импеданса и паразитных емкостей.

Одним из определяющих факторов среди приведенных выше является выходной импеданс усилителя (выходное сопротивление) R_0 . В идеальном случае ($R_0=0$) стабильный операционный усилитель может управлять любой емкостной нагрузкой без ухудшения фазовой характеристики.

Для того, чтобы характеристики не ухудшались при работе на небольшие нагрузки, в большей части операционных усилителей элементы встроенной коррекции компенсируют лишь незначительное влияние нагрузки. Поэтому при работе на существенную емкостную нагрузку (усилители выборки-хранения, пиковые детекторы, формирование сигналов для передачи по коаксиальным кабелям) должны использоваться элементы внешней коррекции.

Емкостная нагрузка, как показано на рисунках 1 и 2, оказывает влияние на коэффициент усиления при разомкнутой петле обратной связи одинаковым способом

на оба входа операционного усилителя, независимо от того, какой из них является активным входом: нагрузочная емкость C_L формирует полюс совместно с неподсоединенным к цепи обратной связи выходным резистором R_0 . Коэффициент усиления при подключенной емкостной нагрузке описывается следующим образом (A – коэффициент усиления ОУ с разомкнутой цепью обратной связи и без емкостной нагрузки):

$$A_{loaded} = A \left(\frac{1}{1 + j \frac{f}{f_p}} \right), \quad f_p = \frac{1}{2\pi R_0 C_L}$$

Наклон характеристики -20 дБ/декада и задержка в 90° способствует формированию дополнительного полюса и увеличивает наклон характеристики по меньшей мере до -40 дБ/декада, что приводит к нестабильности.

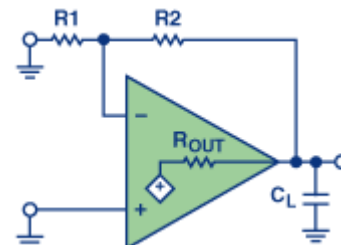


Рис 1. Схема усилителя с емкостной нагрузкой

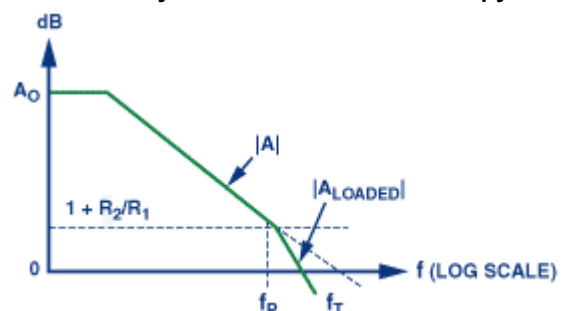


Рис. 2. Диаграмма Бode усилителя (рис. 1)

Для решения проблемы нестабильности работы операционного усилителя с емкостной нагрузкой существует несколько способов. Выбор подходящего способа должен соответствовать необходимым требованиям электронной схемы. Некоторые примеры компенсации рассматриваются ниже.

Компенсация внутри петли обратной связи

Рисунок 3 демонстрирует часто используемый способ компенсации внутри петли обратной связи. Последовательно включенный резистор R_x с небольшим сопротивлением в данной схеме используется для того, чтобы развязать выход операционного усилителя от нагрузочной емкости C_L , а конденсатор C_F (также небольшого номинала), включенный в цепь обратной связи, обеспечивает высокочастотное шунтирование.

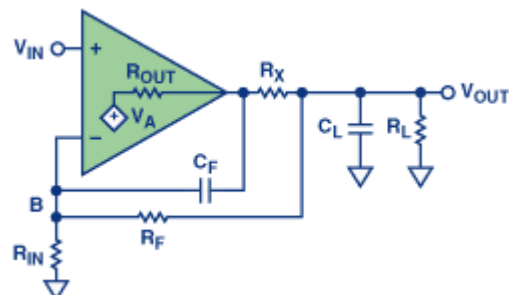


Рис. 3. Компенсация внутри петли обратной связи

Для лучшего понимания работы этого способа устранения неустойчивости на рисунке 4 приведена часть схемы, относящаяся к цепи обратной связи. Вывод VB подключен к инвертирующему входу операционного усилителя.

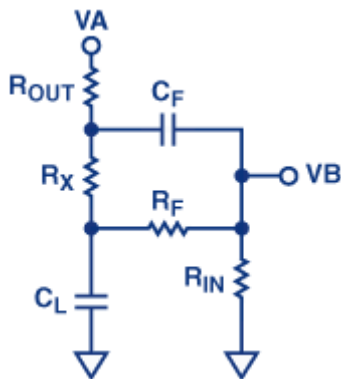


Рис. 4. Цепь обратной связи схемы (рис. 3)

Представим, что конденсаторы C_F и C_L не оказывают на работу схемы никакого влияния на постоянном токе и обладают нулевыми сопротивлениями на высоких частотах. С этой точки зрения, можно рассмотреть поведение схемы.

Случай 1 (рис. 5а)

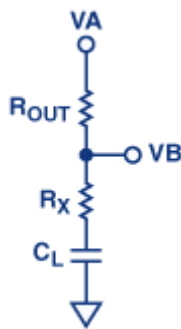


Рис. 5а. Конденсатор C_F закорочен

Сопротивление C_F равно нулю, R_X << R_F и R_O << R_{IN}. Полюс и нуль частотной характеристики определяются элементами C_L, R_O и R_X следующим образом:

$$Pole = \frac{1}{2\pi(R_O + R_X)C_L}$$

$$Zero = \frac{1}{2\pi R_X C_L}$$

Случай 2 (рис. 5b)

Конденсатор C_L отсутствует. Полюс и нуль определяются элементом C_F следующим образом:

$$Pole = \frac{1}{2\pi \left[(R_X + R_f) \parallel (R_O + R_{in}) C_f \right]}$$

$$Zero = \frac{1}{2\pi (R_X + R_f) C_f}$$

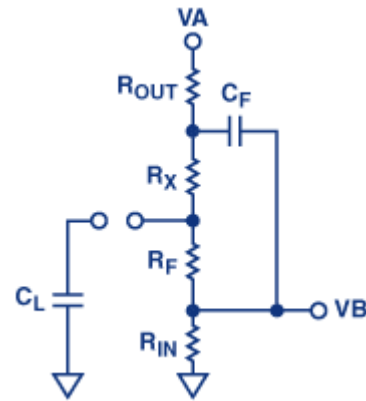


Рис. 5b. Конденсатор C_L отсутствует

Для уравнивания полюса случая 1 к нулю случая 2 и полюса случая 2 к нулю случая 1 элементы R_X и C_F определяются следующими формулами:

$$R_X = \frac{R_O R_{in}}{R_f}$$

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

Формула для C_F содержит компонент A_{cl}, который является коэффициентом усиления схемы при замкнутой цепи обратной связи и определяется как 1 + R_F/R_{IN}. Как установлено экспериментально, этот компонент должен быть включен в формулу для расчета C_F. Значения элементов, рассчитанных по этим двум формулам, позволяют скомпенсировать любой операционный усилитель, работающий на любую емкостную нагрузку.

Несмотря на то, что этот способ помогает предотвратить колебательные процессы при использовании емкостной нагрузки, он чрезмерно уменьшает полосу сигнала при замкнутой цепи обратной связи, которая больше уже не определяется операционным усилителем, а внешними компонентами C_F и R_F как f_{-3 дБ} = 1/(2πC_FR_F).

Этот способ компенсации может быть рассмотрен на примере использования операционного усилителя AD8510 фирмы Analog Devices, который может устойчиво работать на емкость вплоть до 200 пФ в качестве буфера с единичным коэффициентом усиления (запас по фазе составляет 45°). В схеме с компенсацией этого ОУ согласно рис. 3 (коэффициент усиления схемы 10, емкостная нагрузка 1 нФ и типовой выходной импеданс 15 Ом) рассчитанные значения R_X и C_F составляют 2 Ом и 2 пФ соответственно. Осциллограммы выходного импульсного сигнала схемы приведены на рисунках 6 и 7.

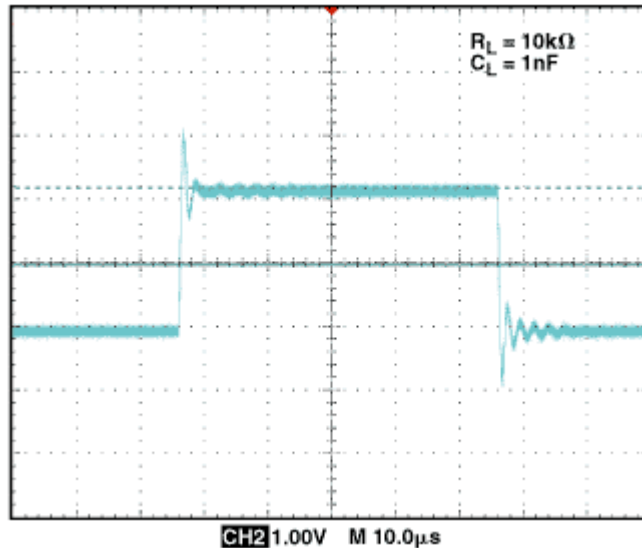


Рис. 6. Реакция схемы на ОУ AD8510 без компенсации

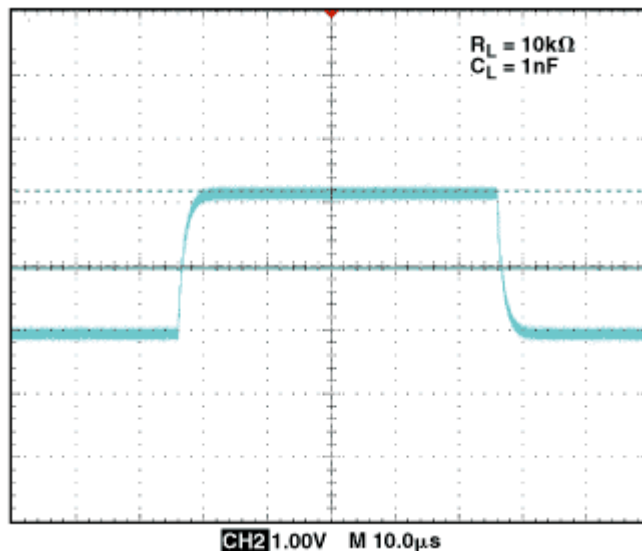


Рис. 7. Реакция схемы на ОУ AD8510 с компенсацией

Необходимо отметить, что, поскольку резистор R_x расположен внутри цепи обратной связи, он не оказывает отрицательного воздействия на точность схемы при работе на постоянном токе. Тем не менее, значение сопротивления этого резистора не должно быть велико, чтобы он не приводил к существенному уменьшению скорости нарастания выходного сигнала.

Предупреждение

Рассмотренный способ компенсации применим только в схемах с операционными усилителями с обратной связью по напряжению. Конденсатор C_F в цепи обратной связи ОУ с обратной связью по току будет приводить к дополнительной нестабильности схемы и возбуждению.

Компенсация вне петли обратной связи

Наиболее простой способ компенсации усилителя при работе на емкостную нагрузку – использование резистора, включенного последовательно с выходным сигналом (рис. 8).

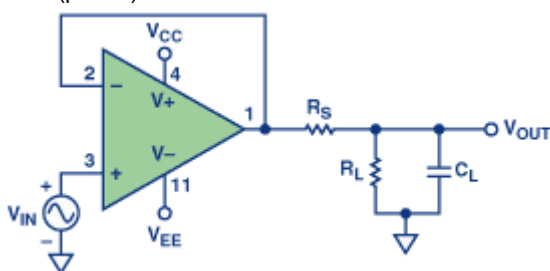


Рис. 8. Резистор R_S изолирует цепь ОС от емкостной нагрузки

Этот метод достаточно эффективен. Однако, он существенно ухудшает динамические характеристики схемы. Основная функция резистор R_S , располагающегося между выходом ОУ и нагрузкой, состоит в изолировании выхода усилителя и цепи обратной связи от нагрузочной емкости. С точки зрения функционирования, на передаточной характеристике цепи обратной связи образуется нуль, уменьшающий фазовый сдвиг на высоких частотах. Для обеспечения хорошей стабильности значение R_S должно быть таковым, чтобы добавляемый нуль располагался, по крайней мере, на декаду ниже точки пересечения частотной характеристики ОУ с характеристикой буфера с единичным коэффициентом усиления. При его выборе необходимо учитывать выходной импеданс используемого усилителя; значения сопротивления от 5 до 50 Ом зачастую достаточно для предотвра-

щения нестабильности. На рисунках 9 и 10 приведены осциллограммы выходного сигнала ОУ OP1177 (Analog Devices) до компенсации и после, с емкостной нагрузкой

2 нФ и амплитудой входного сигнала 400 мВ. Значение сопротивления резистора R_S в схеме с компенсацией составляет 50 Ом.

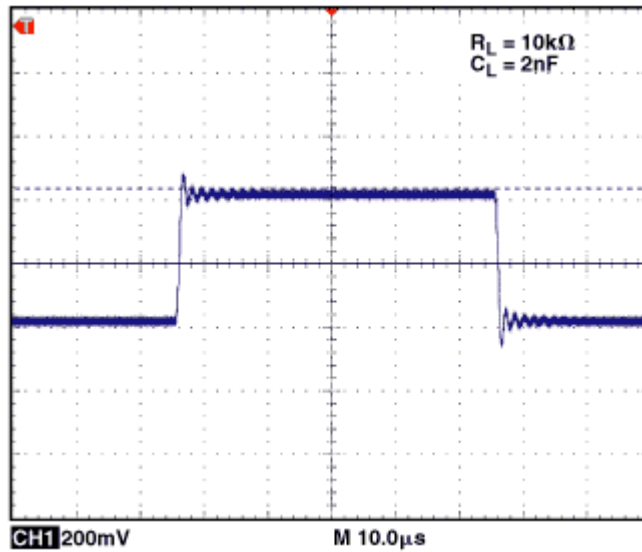


Рис. 9. Реакция ОУ OP1177 без компенсации

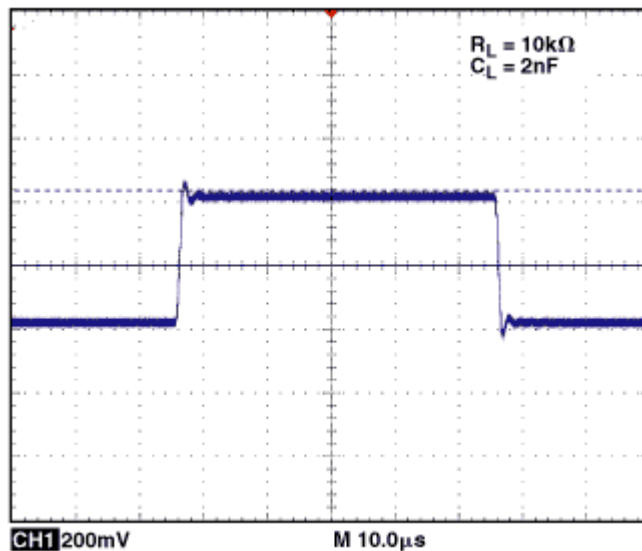


Рис. 10. Реакция ОУ OP1177 с 50-омной компенсацией

К недостаткам данного способа можно отнести уменьшение амплитуды выходного сигнала, зависящего от соотношения сопротивлений последовательного резистора и нагрузки, что может потребовать увеличения входного

сигнала, либо увеличения коэффициента усиления схемы. Кроме того, данная схема обладает нелинейной амплитудной характеристикой при изменяющейся нагрузке.

Компенсация с использованием демфера

Для низковольтных приложений, когда требуется максимальный уровень выходного сигнала, близкий к уровням напряжения питания (схемы с *rail-to-rail* операционными усилителями), рекомендуется метод компенсации нестабильности с использованием демфирующей цепи. Эта цепь представляет собой последовательное соединение резистора и конденсатора и подключается между выходом усилителя и общим проводом (рис. 11).

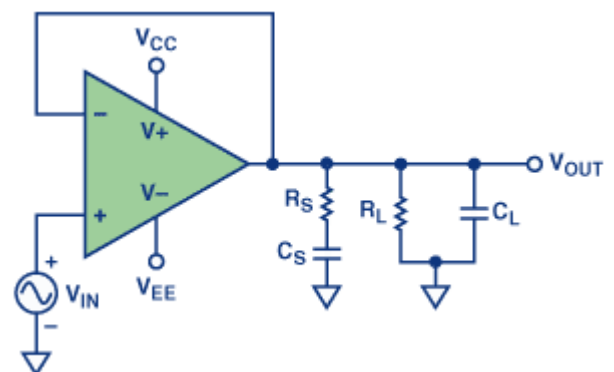


Рис. 11. Уменьшение фазового сдвига с помощью демфера

В зависимости от значения емкости нагрузки, разработчики электронных схем обычно используют эмпирические методы для определения корректных значений R_S и C_S . Принцип подбора значений компонентов демпфирующей цепи состоит в следующем: сначала определяется значение частоты звона (или самовозбуждения) без подключения демпфера, затем экспериментально подбирается значение R_S так, чтобы уменьшить амплитуду напряжения звона до приемлемого значения, после чего вычисляется значение C_S так, чтобы точка излома частотной характеристики соответствовала примерно $1/3$ частоты звона f_p , т.е. $C_S = 3/(2\pi f_p R_S)$.

Значения компонентов демпфирующей цепи также могут быть определены экспериментально с помощью

осциллографа. При идеальном подборе R_S и C_S положительные и отрицательные выбросы отклика на воздействие импульсным сигналом минимальны. На рисунке 12 приведена осциллограмма выходного сигнала ОУ AD8698 (Analog Devices), работающего на емкостную нагрузку 68 нФ, при амплитуде входного сигнала 400 мВ на неинвертирующем входе. Перерегулирование (положительные выбросы) составляют около 25% без внешней компенсации. Простая демпфирующая цепь (значения R_S и C_S равны 30 Ом и 5 нФ соответственно) уменьшает перегиб до 10% (рис. 13).

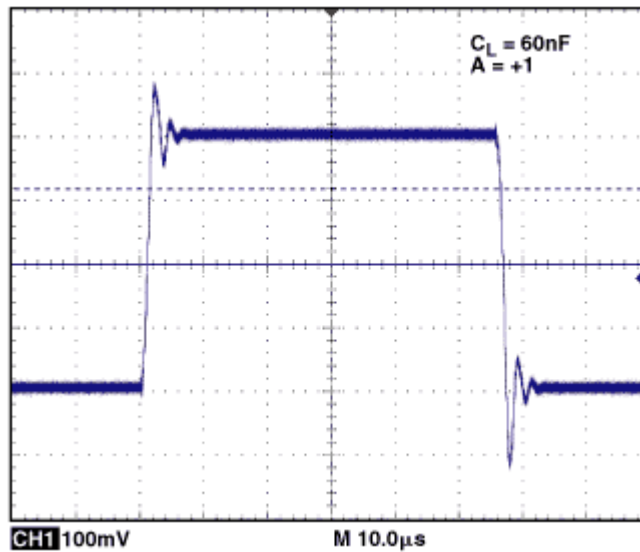


Рис. 12. Выходной сигнал ОУ AD8698 без компенсации

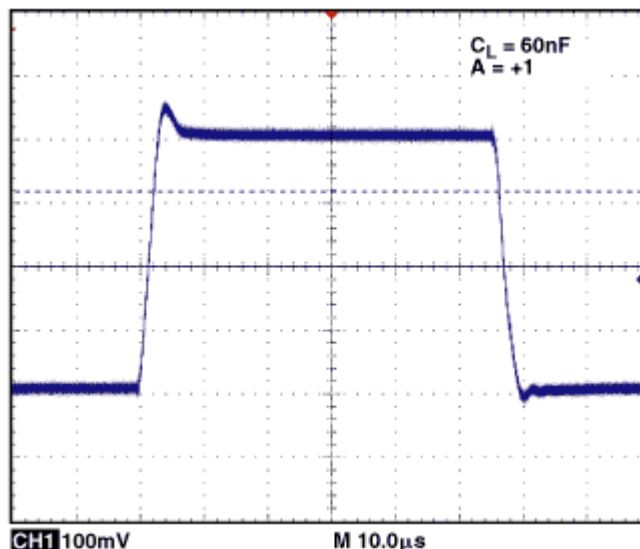


Рис. 13. Выходной сигнал демпфированного ОУ AD8698

Емкость на входе ОУ

Емкость на входных выводах операционного усилителя также может приводить к неустойчивости работы схемы.

Широко распространенным применением ОУ является преобразование тока в напряжение, когда он используется в качестве буфера или усилителя сигнала цифро-аналогового преобразователя с токовым выходом. Суммарная емкость на входе ОУ складывается из

выходной емкости ЦАП, входной емкости усилителя-преобразователя и паразитной емкости соединительных проводников.

Другим популярным применением ОУ, при котором к его входу может подключаться значительная емкость, является схема активного фильтра. В этом случае в некоторых схемах между входами ОУ может располагаться большая емкость (часто включенная после-

довательно с резистором), используемая для уменьшения высокочастотного шума. Однако, при некорректных значениях компонентов этой цепи в схеме может возникнуть звон и даже самовозбуждение.

Для лучшего понимания происходящего необходимо проанализировать схему усилителя (рис. 14) и эквивалентную схему его цепи обратной связи (вывод V_{IN} заземлен).

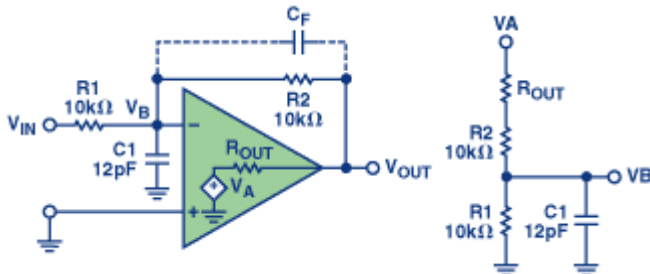


Рис. 14. Емкость на инвертирующем входе ОУ

Передаточная функция цепи обратной связи рассчитывается следующим образом:

$$\frac{V_B}{V_A} (= \beta) = \frac{R_1}{(R_O + R_2)(1 + sR_1 C_1) + R_1}$$

Полос располагается на частоте

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

Эта зависимость показывает, что коэффициент усиления шума ($1/\beta$) растет со скоростью 20 дБ/декада на частотах выше сопряженной частоты f_p . Если значение f_p значительно меньше частоты единичного усиления при

разомкнутой цепи обратной связи, то схема становится нестабильной. Рассогласование скоростей изменения коэффициентов усиления становится равным около 40 дБ/декада. Это рассогласование определяется разностью между наклоном графика усиления с разомкнутой цепью обратной связи (-20 дБ/декада на интересующих частотах) и наклоном графика $1/\beta$.

Для избавления от нестабильности, связанной с емкостью C_1 , параллельно резистору обратной связи R_2 должен быть подключен конденсатор C_F , формирующий нуль, согласованный с полюсом f_p . Этот конденсатор уменьшает рассогласование скоростей изменения коэффициентов усиления и, поэтому, увеличивает запас по фазе. Для запаса по фазе 90° значение емкости конденсатора C_F выбирается равным $(R_1/R_2)C_1$.

На рисунке 15 приведены частотные характеристики схемы (рис. 14).

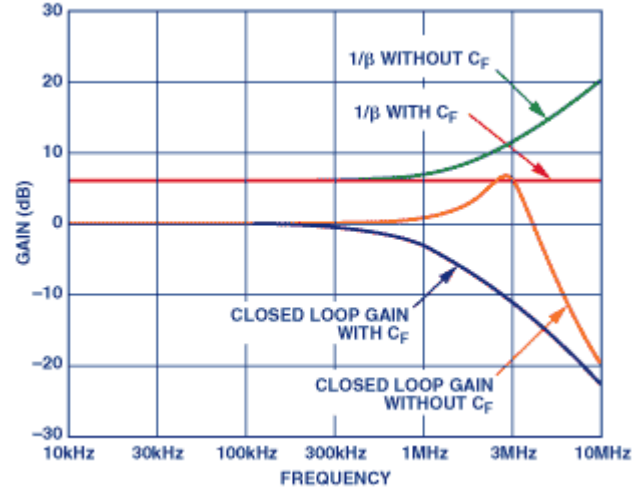


Рис. 15. Частотные характеристики

Запас по фазе

Количественную оценку выбросов некомпенсированной схемы можно определить следующим образом:

$$Q = \sqrt{\frac{f_u}{f_z}}, \text{ where } f_z = \frac{1}{2\pi(R_1 \parallel R_2)C_1}$$

В этой формуле f_u – полоса при единичном коэффициенте усиления, f_z – точка излома кривой $1/\beta$, C_1 – суммарная емкость (внешняя и внутренняя), включая паразитную составляющую.

Запас по фазе Φ_m описывает следующая формула:

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

Операционный усилитель AD8605 (Analog Devices) обладает входной емкостью порядка 7 пФ. Предполагая значение паразитной емкости равным около 5 пФ и используя приведенные выше формулы, получаем значение выбросов 5,5 дБ при замкнутой цепи обратной связи, запас по фазе около 29° и ухудшение собственной фазочастотной характеристики ОУ на 64°.

Ниже показан пример стабилизации схемы при использовании RC-фильтра непосредственно на входе операционного усилителя.

Часто желательно использование фильтрации входного сигнала ОУ, подключая емкость к общему (земляному) проводу, для уменьшения наведенных высокочастотных помех. Такое подключение фильтрующего конденсатора имеет схожий эффект воздействия на динамические характеристики усилителя, как и увеличение паразитной емкости. Поскольку не все реальные ОУ обладают одинаковым поведением, некоторые из них допускают подключение меньшей емкости к входу, чем другие. И во многих случаях в качестве компенсации в цепь обратной связи вводится конденсатор C_F . Для дальнейшего уменьшения наводимых радиочастотных помех последовательно с входом включается резистор небольшого сопротивления, образующий совместный с входной емкостью фильтр низких частот. На рисунке 16 слева показан приближенный подход к решению, при реализации которого, тем не менее, будет трудно избавиться от нестабильности. Справа на этом же рисунке приведена значительно улучшенная схема. На рисунке 17 показано поведение этих схем на входное импульсное воздействие.

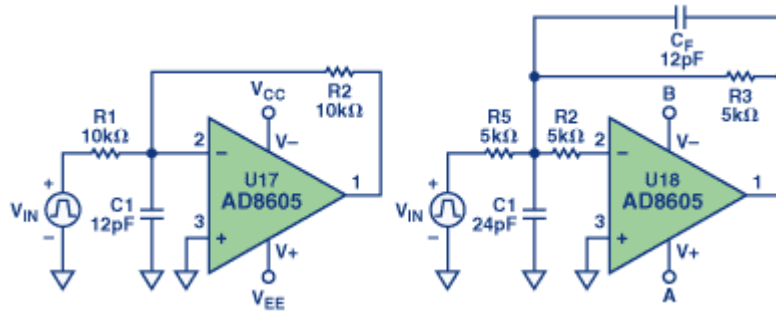


Рис. 16. Компенсация емкости входного фильтра

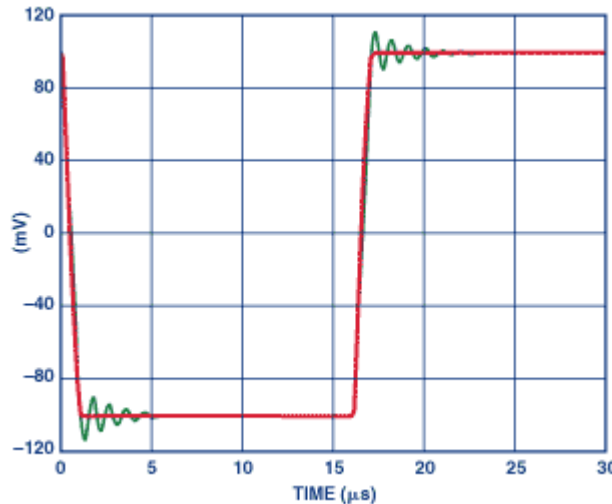


Рис. 17. Осциллограммы выходных сигналов схем на рис. 16

Паразитная емкость

Неучтенная при разработке паразитная емкость может оказывать сильное воздействие на стабильность работы операционного усилителя. Поэтому очень важно предвидеть ее наличие в реальной схеме и минимизировать.

Основным источником входной паразитной емкости могут являться проводники печатной платы. Один квадратный сантиметр проводника, окруженного полигоном земли, обладает емкостью порядка 2,8 пФ (зависит от нескольких факторов, в том числе, от толщины платы).

Для уменьшения паразитной емкости необходимо придерживаться следующих правил:

- длина проводников входных сигналов должна быть минимальной,
- резистор обратной связи и источник сигнала должны располагаться максимально близко к входному выводу операционного усилителя,
- полигон земли не должен располагаться близко к входным выводам ОУ, за исключением случаев, когда это требуется схемотехнически и неинвертирующий вход заземлен; в этом случае необходимо минимизировать сопротивление земляного проводника, используя проводник достаточной ширины.

Стабильность буфера

Некоторые операционные усилители работают нестабильно при единичном (и даже большем) коэффициенте усиления. Например, известный и широко используемый ОУ OP37 может работать стабильно при коэффициенте усиления не менее 5. Для обеспечения стабильности таких усилителей, работающих в качестве буферов, используется технический прием, показанный на рис. 18.

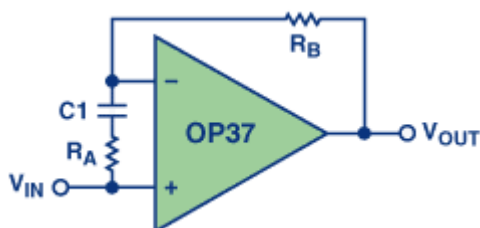


Рис. 18. Схема стабилизации буфера на ОУ

Резисторы R_A и R_B обеспечивают достаточный коэффициент усиления при замкнутой цепи обратной связи на высоких частотах для стабилизации, а на низких частотах и постоянном токе конденсатор C_1 восстанавливает коэффициент усиления до единицы. Расчет значений сопротивлений R_A и R_B достаточно прост и основан на знании значения минимального стабильного коэффициента усиления ОУ. Для OP37 этот коэффициент равен 5, поэтому $R_B = 4R_A$ для $\beta = 1/5$. На высоких частотах, когда конденсатор C_1 представляет собой очень малое сопротивление, операционный усилитель ведет себя так, как будто он работает при коэффициенте усиления 5, и этим обеспечивается стабильность. На низких частотах и постоянном токе сопротивление C_1 очень велико и не вносит ослабления в отрицательную обратную связь, поэтому схема ведет себя как буфер с единичным коэффициентом усиления.

Значение емкости конденсатора должно быть таким, чтобы излом АЧХ происходил на частоте по крайней мере на декаду более низкой, чем частота единичного усиления ($f_{-3\text{дБ}}$):

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

На рисунке 19 приведены осциллограммы входного и выходного сигналов некомпенсированной и

скомпенсированной схемы буфера на ОУ ОР37. Значения компенсирующих компонентов следующие:

$$R_B = 10\text{ k}\Omega$$

$$R_A = R_B/4 = 2.5\text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 1/(2\pi \times 2.5\text{E}3 \times 16\text{E}6/10) = 39\text{ pF}$$

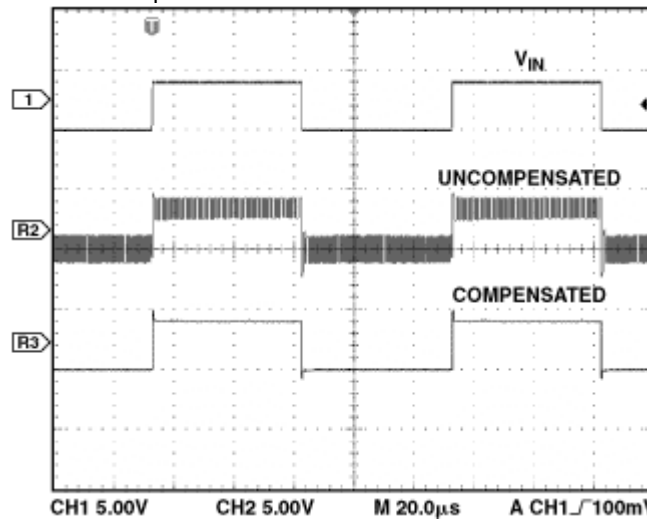


Рис. 19. Осциллограммы сигналов буфера на ОУ ОР37

Для инвертирующего включения анализ схемы подобен приведенному выше, но формулы немного другие. В этом случае, входной резистор, подключаемый к инвертирующему входу ОУ соединен параллельно резистору R_A на высоких частотах. Это параллельное соединение используется для расчета значения R_A при минимальном стабильном коэффициенте усиления. Значение емкости конденсатора C_1 рассчитывается аналогичным образом, как и для неинвертирующего включения усилителя.

Данный способ компенсации ОУ не лишен недостатков. Увеличение шумового усиления будет

приводить к увеличению уровня шумов на высоких частотах, который может быть неприятным в некоторых случаях. В схеме с повторителем напряжения внимание должно быть уделено трассировке соединений, особенно, при использовании источника сигнала с большим выходным импедансом. Поводом для этого является возможная положительная обратная связь через емкость с неинвертирующим входом на частотах, где усиление становится большим единицы. Это может приводить к нестабильности работы схемы или к возрастанию шума.