

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

ПЕТР КАРТАШОВ, инженер

В статье рассматриваются основные причины потери стабильности операционных усилителей, и даются практические рекомендации по улучшению этой характеристики.

УСИЛИТЕЛИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Рассмотрим упрощенную модель операционного усилителя (ОУ), охваченного обратной связью (ОС) по напряжению и включенного по схеме повторителя напряжения (см. рис. 1). Характеристика этого ОУ имеет, по крайней мере, два полюса. Обозначим полюс на низкой частоте F1, на высокой – F2; конденсатор C3 вносит ноль, чтобы компенсировать полюс на частоте F3. На рисунке 2 показана выходная характеристика ОУ с кусочно-линейной аппроксимацией.

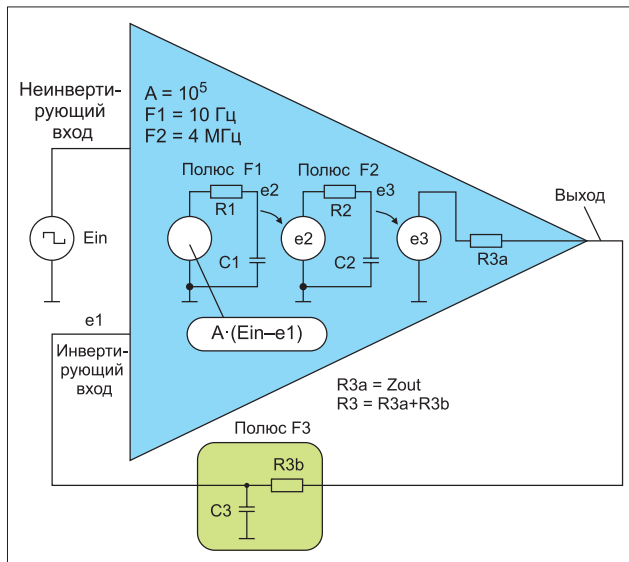


Рис. 1. Упрощенная схема ОУ, охваченного полной ОС

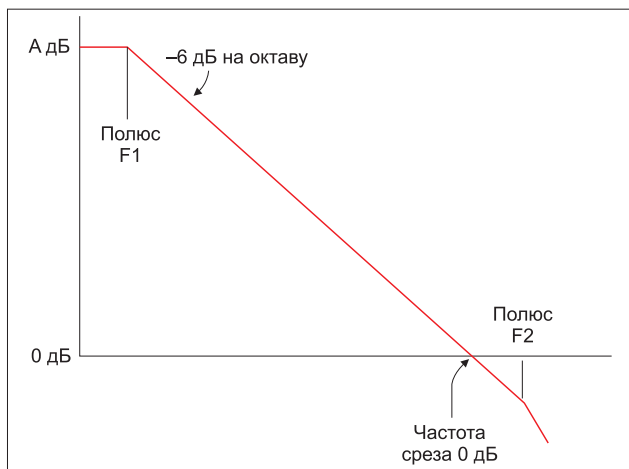


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ОУ

Если частота F2 выше частоты среза 0 дБ, наклон участка с частотой среза близок к –6 дБ на октаву. При этих условиях запаса устойчивости по амплитуде и фазе недостаточно, и самовозбуждение усилителя не происходит.

Однако если полюс F2 находится на недостаточно высокой частоте, т.е. она меньше частоты среза, наклон характеристики на участке с точкой среза составляет почти –12 дБ на октаву (см. рис. 3). Запаса по амплитуде и фазе недостаточно, и усилитель с большой вероятностью перейдет в осцилляцию, т.е. схема будет работать нестабильно.

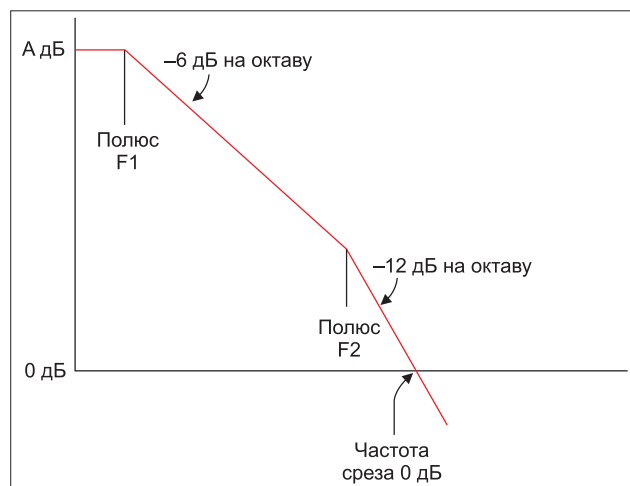


Рис. 3. АЧХ ОУ при F2 ниже частоты среза 0 дБ. Наклон характеристики –12 дБ на октаву

Если частота F2 достаточно высока, но имеется еще один полюс (см. рис. 4), то наклон характеристики в точке среза снова равен –12 дБ на октаву, и схема с большой степенью вероятности будет работать нестабильно. Заметим, что при

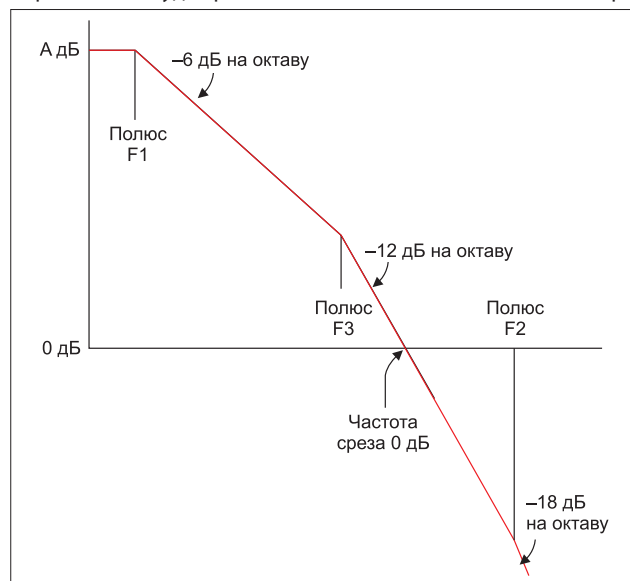


Рис. 4. При наличии 3-го полюса повышение F2 не приводит к стабилизации схемы

внесении еще одного полюса F3 при низкой частоте F2 наклон характеристики на частоте среза равен -18 дБ на октаву, т. е. осцилляция начнется обязательно.

Рассмотрим схему на рисунке 5. Конденсатор C3 включен между инвертирующим и неинвертирующим входами, обратная связь обеспечивается двумя резисторами. При бесконечно большом сопротивлении R ОС максимально полная. Для анализа стабильности следует подключить C3 не к источнику питания, а к общему проводу, как показано на рисунке 5б.

Принимая R3 = 10 кОм и используя рекурсивный дифференциальный анализ, исследуем характеристику в неустановившемся режиме в зависимости от значения C3.

В качестве примера рассмотрим усилитель с коэффициентом усиления при разомкнутой петле ОС 100 дБ, F1 = 10 Гц, F2 = 4 МГц. При этих данных точка единичного усиления приходится на частоту 1 МГц. Результаты для других значений C3 показаны на рисунке 6.

Таким образом, можно сделать вывод, что желательно исключить электромагнитные помехи, улучшить топологию платы и полностью отказаться от конденсатора C3, порождающего нестабильности контура ОС за счет потери запаса по фазе.

УСИЛИТЕЛИ С ТОКОВОЙ ОС

Усилители с токовой ОС могут иметь большой выброс в выходном сигнале и работать нестабильно вплоть до перехода в режим генерации.

Двумя основными причинами нестабильности являются низкое сопротивление резистора в цепи ОС и появление паразитных емкостей на входе и выходе по отношению к земле.

В то время как малые емкости приводят к появлению выбросов на высоких частотах, большие емкости вызывают самовозбуждение усилителя, когда он перестает реагировать на входной сигнал.

Во избежание негативного воздействия паразитной емкости на стабильность усилителя следует:

- 1) обеспечить правильную трассировку платы для сведения к минимуму паразитных связей;
- 2) использовать указанные в документации номиналы резисторов ОС и резисторов, определяющих коэффициент усиления, чтобы обеспечить достаточный запас по фазе и повысить устойчивость;
- 3) использовать компенсационные цепи для сглаживания выбросов в частотной характеристике.

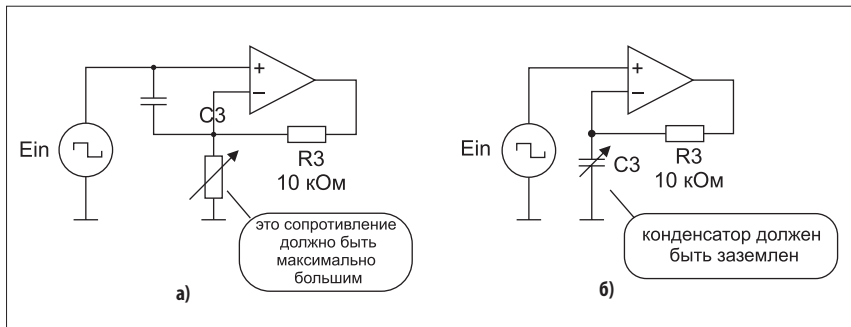


Рис. 5. Пример повышения стабильности схемы

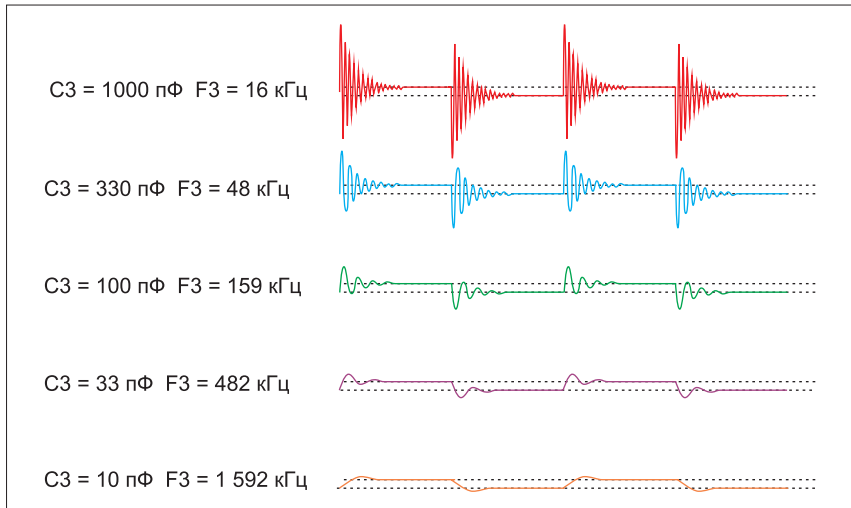


Рис. 6. Выходной сигнал при подаче прямоугольного напряжения

Рассмотрим эти рекомендации подробнее.

ТОПОЛОГИЯ ПЛАТЫ

Для обеспечения оптимальных характеристик усилителей требуется внимательно относиться к топологии и трассировке платы. Особое внимание следует уделить паразитным связям, внешним компонентам и номиналам резисторов (см. рис. 7–8).

Во-первых, необходимо использовать развязывающие конденсаторы на выводах питания. Для высоких частот конденсаторы 100 нФ и 100 пФ включаются параллельно и располагаются на расстоянии не более 6 мм от вывода питания. Для низких частот следует установить танталовые конденсаторы емкостью 6,8 мкФ на большем расстоянии от усилителя, чтобы использовать их одновременно для

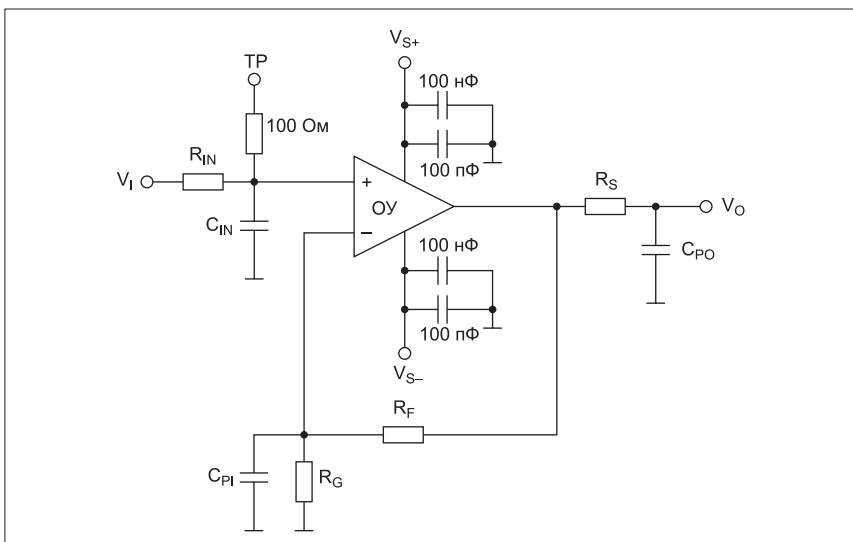


Рис. 7. Усилитель с токовой связью и компенсированными паразитными емкостями. Элементы R_S, R_{IN} и C_{IN} служат для компенсации

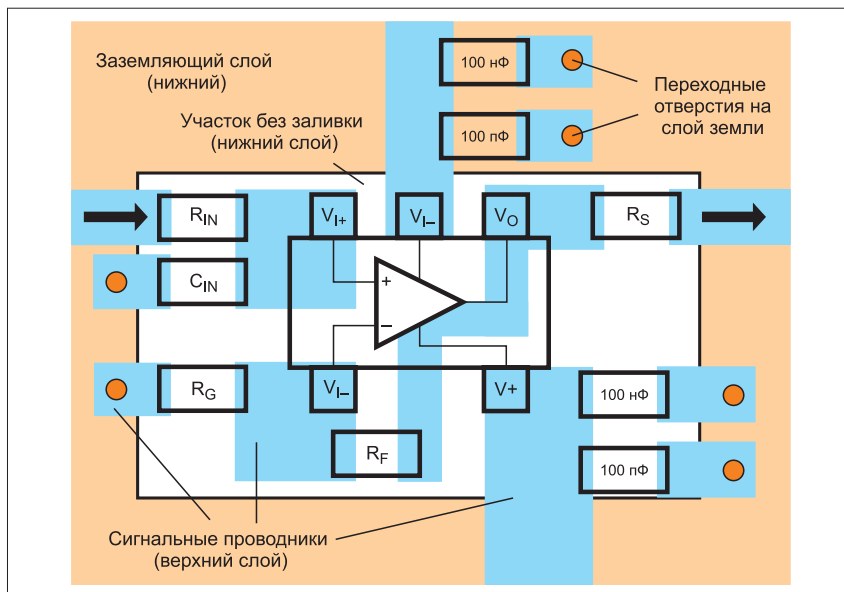


Рис. 8. Предлагаемая топология двухслойной печатной платы с участками без заливки

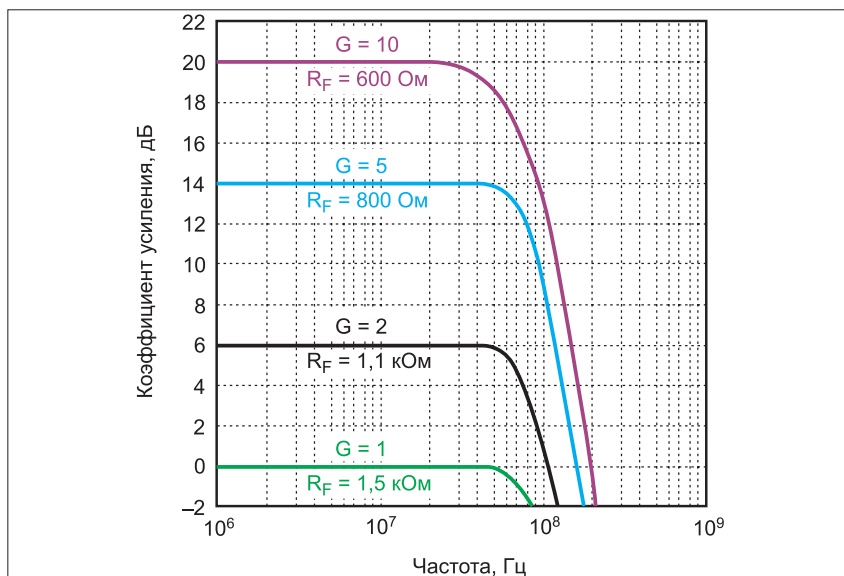


Рис. 9. Коэффициент усиления при разных номиналах элементов

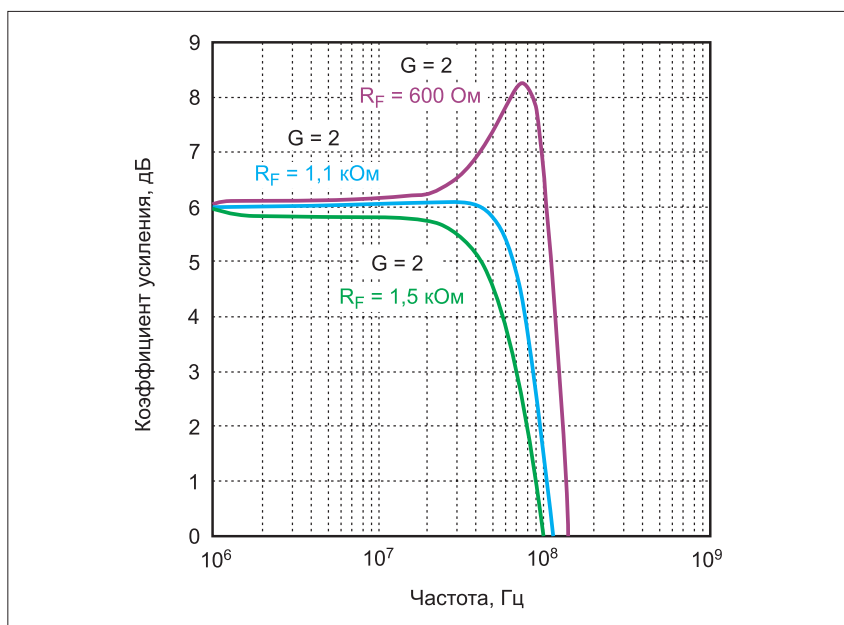


Рис. 10. Отклонение от рекомендуемого значения R_F вызывает выброс и сокращает полосу пропускания

нескольких устройств. Кроме того, необходимо избегать близкого расположения линий питания и заземления, чтобы уменьшить паразитную индуктивность, особенно между выводами источника питания и развязывающими конденсаторами.

Во-вторых, поскольку выход и инвертирующий вход усилителя являются наиболее чувствительными к паразитной емкости, выходной резистор R_S следует располагать наиболее близко к выходному выводу. Резистор в цепи ОС и резистор, устанавливающий коэффициент усиления (R_F и R_G), должны находиться близко к инвертирующему входу. Они изолируют соответствующие порты от емкостных наводок со стороны линий передачи.

Простой пассивный RC-фильтр из компонентов R_{IN} и C_{IN} на неинвертирующем входе поможет компенсировать всплески коэффициента усиления, вызванные паразитными емкостями на инвертирующем входе.

Следует определить необходимость в выходном развязывающем резисторе. При малых паразитных емкостных нагрузках (менее 5 пФ) R_S , как правило, не требуется. При большей паразитной выходной емкости можно обойтись без него, однако следует установить более высокий коэффициент усиления при замкнутой ОС.

Вблизи входных и выходных выводов следует оставлять участки, свободные от линий питания и заземления, во избежание появления паразитных связей по переменному току. На плате должен быть только один неразрывный слой питания и заземления.

Подключение тестового оборудования к измеряемой линии осуществляется через резистор 100 Ом для ее изоляции от емкости щупа.

Как правило, производители указывают несколько значений R_F для разных значений коэффициента усиления. Номиналы из рекомендуемого перечня обеспечивают оптимальные характеристики – остальные могут вызвать отклонения. На рисунке 9 показано, как влияет сопротивление R_F на работу схемы при коэффициенте усиления 2. Оптимальное сопротивление $R_F = 1,1$ кОм для данного коэффициента усиления, и это подтверждается характеристиками, приведенными на рисунке 9. При увеличении R_F до 1,5 кОм начинается ограничение полосы пропускания; уменьшение до 600 Ом приводит к появлению выброса (см. рис. 10).

КОМПЕНСАЦИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЕМКОСТЕЙ

Чтобы различить паразитную емкость на входе и выходе, анализи-

руют реакцию на импульсное возмущение.

Паразитная емкость на входе всегда меньше выходной, вызывает короткие выбросы в сигнале. Паразитная емкость на выходе, как правило, вызывает продолжительный «звон» (см. рис. 11).

ПАРАЗИТНАЯ ЕМКОСТЬ НА ВХОДЕ

Обычно паразитная емкость C_{PI} на инвертирующем входе мала, составляет 0,5–5 пФ и обусловлена конструкцией схемы, а также шунтирующим резистором R_G . Вместе R_F , R_G и C_{PI} вносят низкочастотную составляющую в ОС усилителя, которая преобразуется в высокочастотную в выходной характеристике усилителя V_O/V_I . Для ее компенсации ставят ФНЧ на неинвертирующем входе усилителя. С этой целью входная емкость на неинвертирующем входе должна соответствовать паразитной емкости на инвертирующем входе. Аналогично, сопротивление R_{IN} должно быть равно параллельному соединению R_F и R_G . На рисунках 12–13 показаны частотная

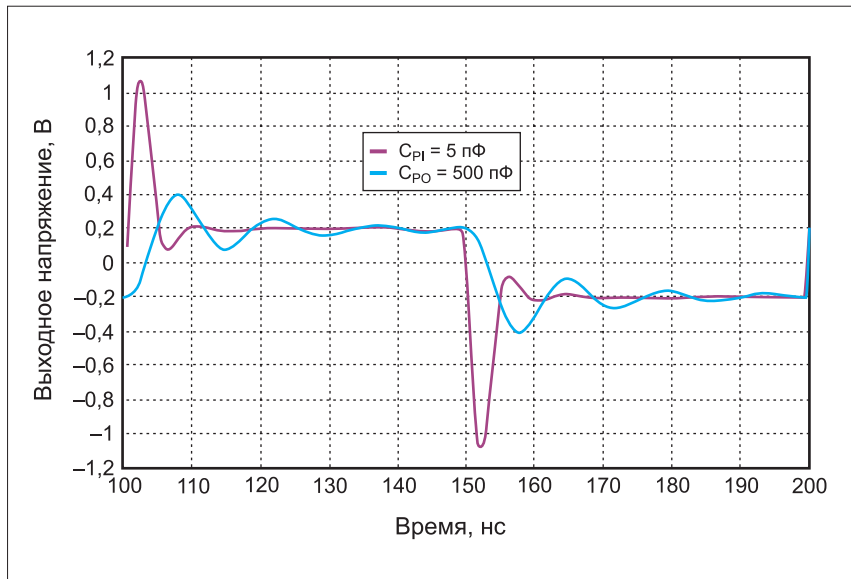


Рис. 11. Перегулирование сигнала за счет действия паразитной емкости на входе и «звон», обусловленный выходной паразитной емкостью

и импульсная характеристики схемы, приведенной на рисунке 7. Коэффициент усиления $G = 2$, $R_F = R_G$ и имеют номиналы, рекомендованные производителем.

При $C_{PI} = 0$ (черные кривые на рисунках 12 и 13) отсутствуют выбросы на обеих зависимостях. Номинальный коэффициент усиления: 6 дБ, амплитуда импульса: ± 200 мВ при тестовом

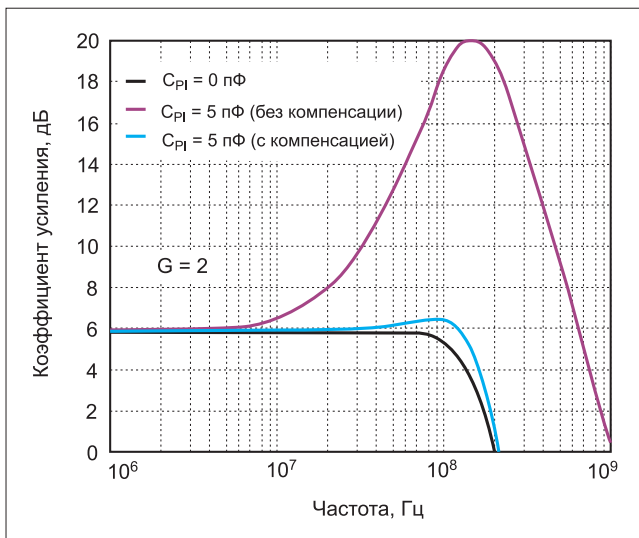


Рис. 12. Удаление выброса за счет R_{IN} и C_{IN}

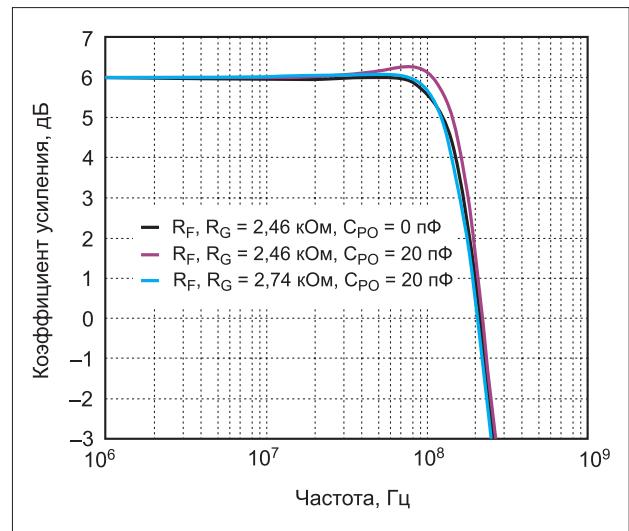


Рис. 14. Компенсация небольшой выходной паразитной емкости путем увеличения R_F

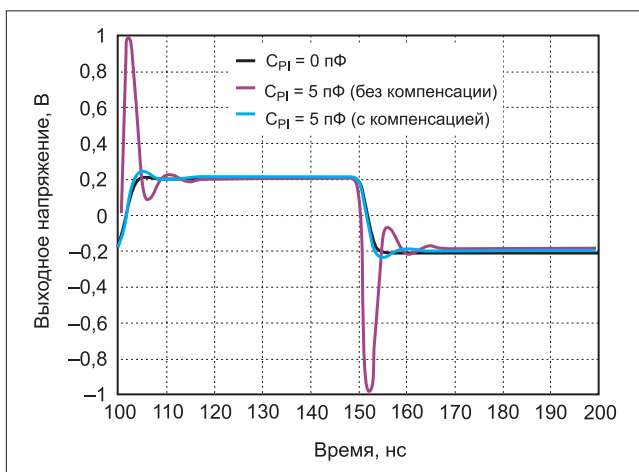


Рис. 13. Компенсация перегулирования за счет R_{IN} и C_{IN}

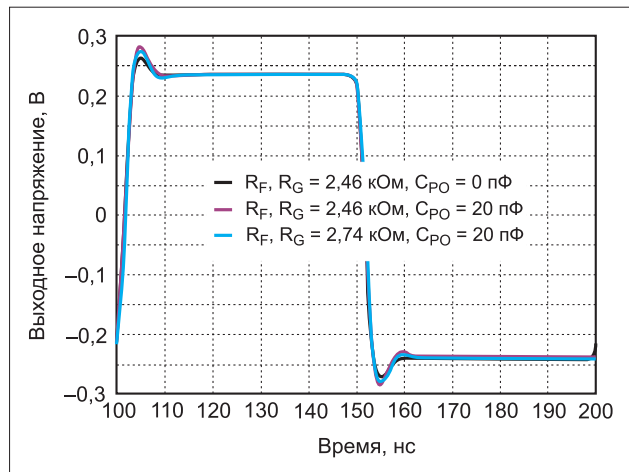


Рис. 15. После компенсации выходной сигнал практически не меняется

входном сигнале ± 100 мВ на частоте 10 МГц. При $C_{PI} = 5$ пФ (красные кривые) наблюдается выброс почти 21 дБ и перерегулирование ± 1 В.

После компенсации (голубые линии) $C_{IN} = C_{PI} = 5$ пФ и $R_{IN} = R_F || R_G = R_F / 2$; коэффициент усиления увеличивается на 0,5 дБ, а перерегулирование выходного сигнала достигает ± 45 мВ.

ПАРАЗИТНАЯ ВЫХОДНАЯ ЕМКОСТЬ

Паразитная емкость на выходе усилителя обусловлена конструктивными особенностями схемы, однако основной вклад вносят:

- большая емкость нагрузки, в т. ч. емкость переходов в подавителях помех;
- емкость управляющих диодов;
- емкость кабелей;
- входные емкости АЦП и других усилителей.

Общее значение паразитной выходной емкости изменяется с 20 пФ до нескольких сотен пФ.

Как уже упоминалось, малая паразитная емкость на выходе незначительно влияет на передаточную функцию, а большая может вызвать всплеск коэффициента усиления и продолжительный «звон» в импульсной характеристике. На рисунках 14–15 показано влияние выходной емкости 20 пФ. Коэффициент усиления увеличивается менее чем на 1 дБ, а перерегулирование не достигает 30 мВ. Компенсация не требуется, хотя при необходимости достаточно немного увеличить сопротивления R_F и R_G .

Напротив, компенсация больших емкостей необходима. На рисунках 16–17 показана частотная зависимость коэффициента усиления и выходная характеристика схем без компенсации. На сиреневой кривой наблюдается всплеск 15 дБ в передаточной характеристике и звон при реакции на импульс при $C_{PO} = 500$ пФ. За счет увеличения R_F и R_G не удается добиться значительного улучшения (синяя кривая).

Использование последовательно включенного резистора R_S позволяет изолировать выход усилителя от емкости нагрузки (см. рис. 7).

Достаточно $R_S = 3,9$ Ом для сокращения всплеска коэффициента усиления до 0,5 дБ; при этом перерегулирование сигнала на выходе уменьшается с ± 400 до ± 50 мВ.

Итак, для обеспечения стабильности усилителя следует придерживаться следующих рекомендаций:

- выбирать топологию платы, обеспечивающую минимальные паразитные емкости;

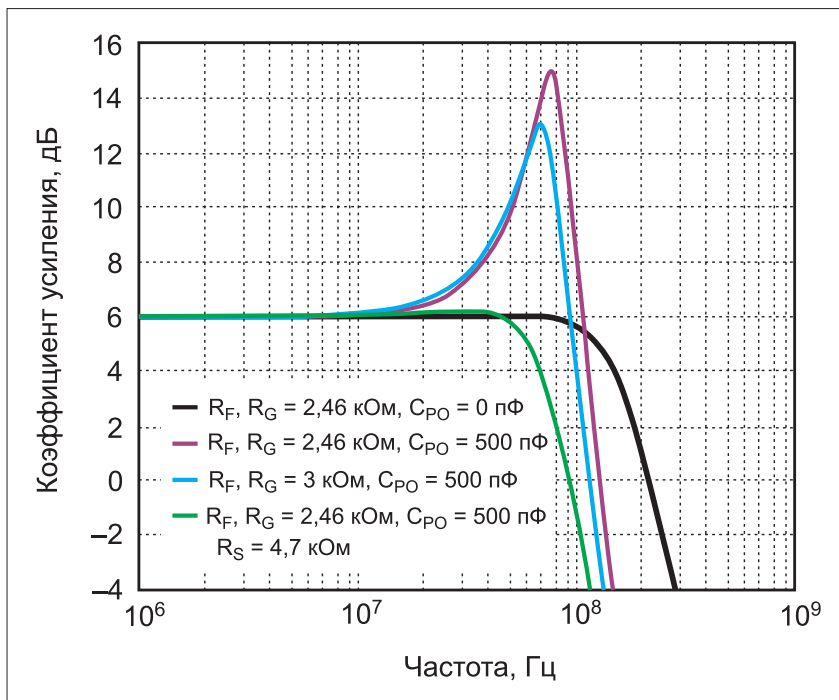


Рис. 16. Компенсация большой паразитной выходной емкости за счет R_S

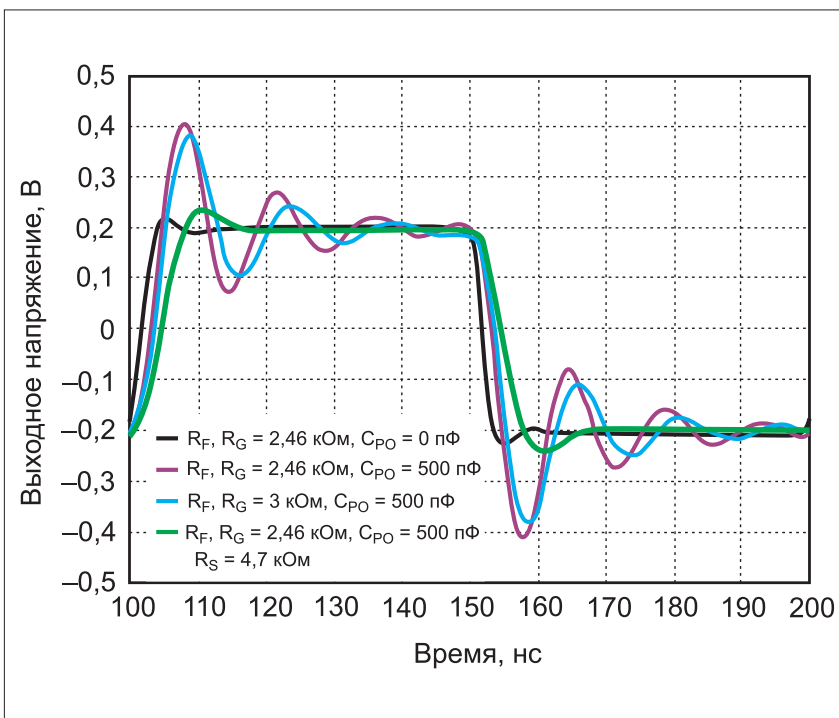


Рис. 17. Компенсация резистором R_S обеспечивает значительное улучшение выходного сигнала

- буферизовать линию питания на низких и высоких частотах при помощи конденсаторов 6,8 мкФ, 100 нФ и 100 пФ;
- установить резисторы с сопротивлением 100 Ом между тестовой точкой и измеряемой линией передачи для развязки сигнальной линии с емкостью шупа;
- использовать номиналы резисторов, рекомендуемые производителем;
- провести исходный анализ на импульсное воздействие, чтобы выделить паразитную емкость на выходе и входе;
- компенсировать входную паразитную емкость, подключив RC-контур на инвертирующий вход;
- компенсировать малую выходную емкость путем увеличения R_F и R_G ;
- компенсировать большую выходную емкость включением небольшого развязывающего резистора R_S .