

# ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Джим Уильямс, технический специалист, Linear Technology

В сокращенном варианте мы публикуем перевод одного из разделов руководства по применению «Техника работы с быстродействующими усилителями. Спутник разработчика по широкополосной схемотехнике» компании Linear Technology. И хотя с момента опубликования оригинала прошло более 15 лет, все же многие положения статьи, как нам кажется, актуальны до сих пор. В статье приведены примеры проблем, встречающихся при работе с высокочастотными усилителями, и даны практические советы по их решению.

Проблемы могут начаться еще на стадии испытания усилителя, например, «звон» на фронтах сигнала (см. рис. 1) на выходе несогласованного кабеля генератора импульсов, используемого для проверки схемы. Всегда нагружайте источник сигнала на его характеристическое сопротивление, если в схеме присутствует кабель или длинные печатные проводники. Подозрения в этом плане должны вызывать любые проводники длиной более одного дюйма. Но даже и при согласованном кабеле возможно искажение сигнала, например, если кабель подключен к проводнику большой длины или из-за длинных выводов согласующего резистора.

Попутно отметим, что наилучшее согласование 50-Ом кабеля получается при использовании коаксиального устройства BNC-типа (отечественный аналог — разъемы серии РС50). Лучшие согласующие резисторы для

использования в печатных платах — углеродистые и металлопленочные, с максимально короткими выводами. Их конструкция, а именно — соединение вывода с резистивным элементом, обеспечивает лучшие высокочастотные характеристики, чем у композиционных. Проволочные резисторы из-за значительной паразитной индуктивности не подходят для применения в высокочастотных цепях.

При разработке топологии платы необходимо расположить проводник, соединяющий вывод согласующего резистора с шиной «земля» так, чтобы протекающий по нему высокочастотный ток не нарушал работу схемы. К примеру, неблагоприятно располагать согласующий резистор, через который ток возвращается на «землю», рядом с заземленным положительным входом ОУ. Значительные высокочастотные токи будут служить причиной серьезных нарушений, вызванных

смещением опорного «виртуального нуля» на положительном входе ОУ (импульсы напряжением 5 В при прохождении через 50-Ом согласующий резистор вызывают броски тока величиной 100 мА).

При исследовании и наладке быстродействующих усилителей следует внимательно относиться к выбору измерительного оборудования. Например, неправильно подобранный пробник осциллографа способен существенно исказить сигнал и породить «звон», затягивание фронтов и другие искажения, в том числе и значительную погрешность измерения амплитуды импульса.

Судя по осциллограмме (см. рис. 2), на которой показаны входной и выходной сигналы усилителя, задержка распространения сигнала составляет 12 нс, в то время как в документации изготовителя указано 6 нс. Несоответствие вызвано использованием разных пробников. Использование одинаковых пробников устраняет эту проблему, однако часто требуется использовать различные пробники. В этих случаях разницу между задержками следует измерить и затем учитывать для правильной интерпретации полученных результатов. Стоит заметить, что активные пробники FET и токовые пробники имеют задержку распространения сигнала около 25 нс. У высо-

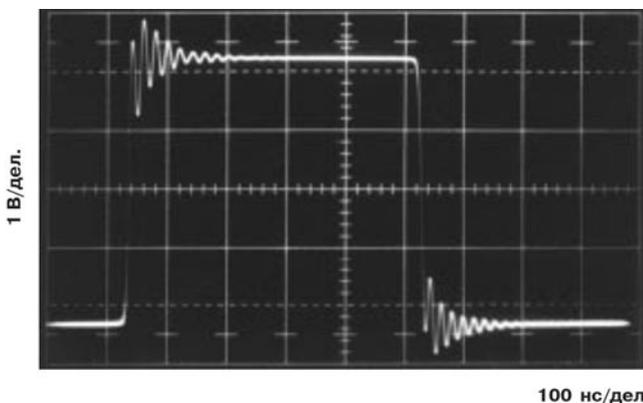


Рис. 1. Несогласованный кабель генератора импульсов создаёт «звон» вследствие отражений

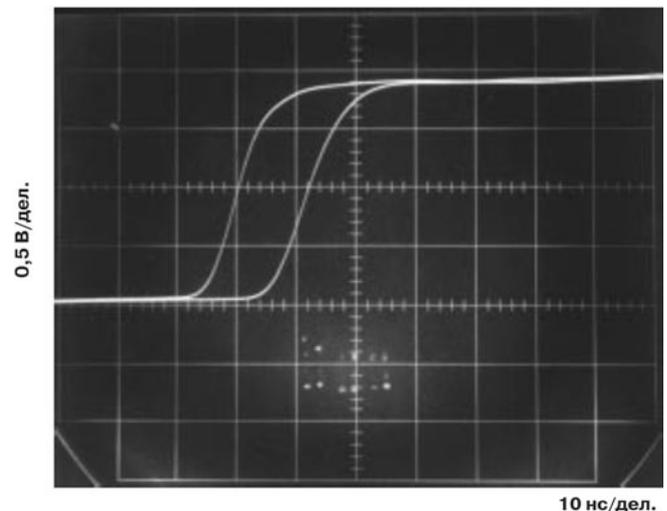


Рис. 2. Пробники с неодинаковыми задержками приводят к существенному отображаемому сдвигу фаз

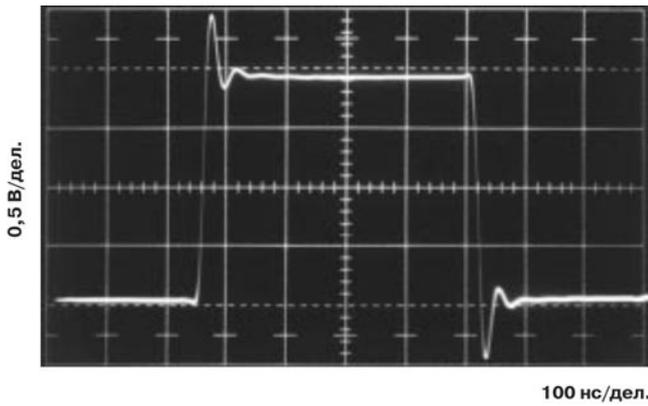


Рис. 3. Эффект влияния осциллографического пробника 10X, 10 пФ в суммирующей точке

кочастотных 10X и 50-Ом пробников задержка составляет около 3 нс.

На рисунке 3 видны выбросы и «звон» на выходе усилителя, порожденные использованием пробников. Выбросы на осциллограмме вызваны пробником 10X, присоединенным к суммирующему узлу ОУ. Действительно, часто при аномальной работе ОУ необходимо проконтролировать сигнал в этой точке, однако не следует забывать о паразитной емкости пробника. В данном случае эта емкость величиной 10 пФ послужила причиной запаздывания обратной связи, что, в свою очередь, привело к перерегулированию.

Минимизация этого эффекта достигается уменьшением входной емкости пробников, использованием активных и специальных типов пассивных пробников. На высоких частотах во входном импедансе пробника часто преобладает именно емкостная составляющая. Стандартный пробник 10X с входной емкостью 10 пФ создает запаздывание 10 нс от источника сигнала с выходным сопротивлением 1 кОм.

Топология шин питания имеет очень большое значение при проектировании высокочастотных усилительных схем. При разработке топологии платы шину «земля» необходимо выполнить сплошным слоем, желательно целиком занимающим одну из поверхностей платы. При этом решаются две задачи. Во-первых, уменьшается паразитная емкость между проводниками платы, во-вторых, шина «земля», выполненная таким образом, имеет минимальную паразитную индуктивность и сопротивление. На рисунке 4 показана осциллограмма выходного сигнала усилителя при отсутствии сплошной «земли». Аналогичную осциллограмму можно наблюдать в случае плохого соединения пробника с «землей».

Безусловно, наибольшее количество проблем связано с развязывающими конденсаторами в цепях питания. Активное и индуктивное сопротивление шин питания могут достигать неприемлемого уровня. Это почти всегда будет служить причиной некорректной работы схемы. Кроме того,

несколько устройств, подключенных к неразвязанному источнику питания, могут влиять друг на друга через конечный импеданс источника, что может привести к аварийным режимам работы. Развязывающие конденсаторы предоставляют простой способ разрешения этих проблем, обеспечивая буферный источник энергии для схемы. Он, подобно электрическому маховику, запасает энергию, необходимую для питания микросхемы при переходном процессе. Выходной сигнал усилителя со 100-Ом нагрузкой, питающегося от неразвязанных шин питания, показан на рисунке 5. Импеданс шин питания на высоких частотах высок, и при низкоомной нагрузке образует совместно с нагрузкой делитель напряжения, что порождает паразитную обратную связь и генерации на крутых фронтах. При работе усилителя на холостом ходу ситуация улучшается, но выбросы и «звон» все же остаются (см. рис. 6). Переходные процессы на фронтах могут остаться, если развязывающий конденсатор удален от микросхемы,

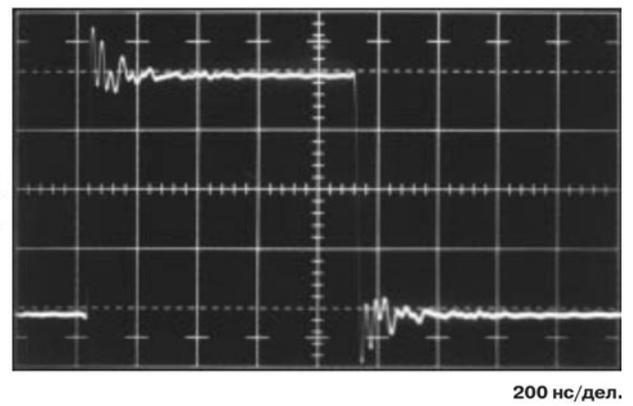


Рис. 4. Неустойчивая работа усилителя из-за отсутствия сплошного слоя «земли»

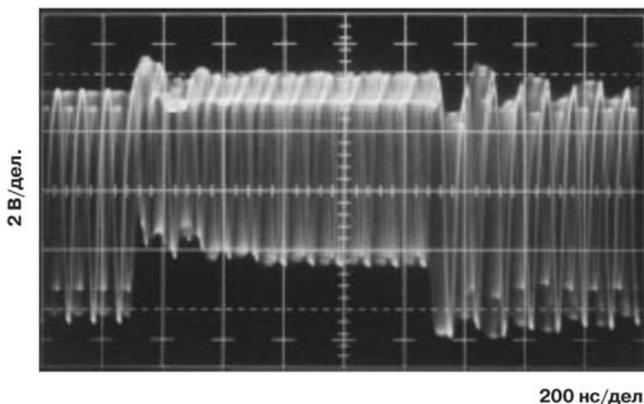


Рис. 5. Выходной сигнал усилителя, нагруженного на 100-Ом нагрузку, питающегося от неразвязанных шин питания

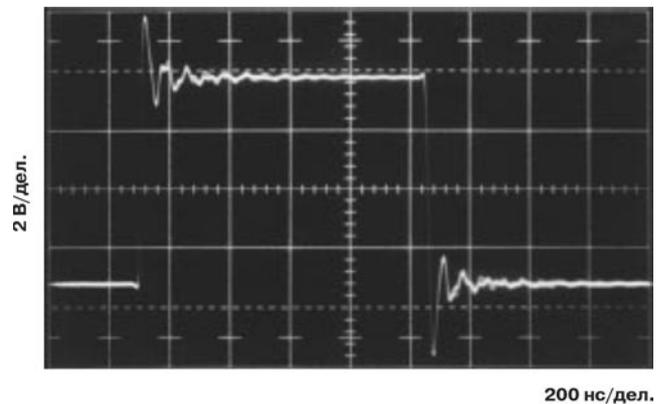


Рис. 6. Выходной сигнал усилителя без нагрузки, питающегося от неразвязанных шин питания



**Первое место** на рынке компонентов для автоэлектроники

**Первое место** на рынке радиочастотных полупроводников для базовых станций мобильной связи

**Второе место** на рынке микроконтроллеров для встраиваемых систем

**Четвертое место** на рынке специализированных микросхем для беспроводной связи

## **КОМПЭЛ представляет лидера в инновационных технологиях — Freescale Semiconductor**

- Аналоговые и смешанные микросхемы
- Управление питанием
- Микроконтроллеры
- Цифровые сигнальные процессоры и контроллеры
- Магниторезистивная память (MRAM)
- Датчики
- Беспроводные технологии
- Радиочастотные компоненты
- Отладочные средства CodeWarrior<sup>™</sup>

ОАО «ЗАВОД ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

[www.axionet.ru](http://www.axionet.ru)

**АКСИОН**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОНТАЖ  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

*«Искусство всех превосходить»*

Система менеджмента качества ISO 9001-2001

- качество технологических процессов
- качество бизнес-процессов
- качество материалов
- качество продукции
- качество сервиса

ЗАО «Корпорация «Аксион»

ТЕЛ. (3412) - 56-08-94; ТЕЛ. ФАКС. (3412) 60-13-27

ОДНОСТОРОННИЕ — ОТ 35 РУБ., ДВУХСТОРОННИЕ — ОТ 56 РУБ., МНОГОСЛОЙНЫЕ — ОТ 244 РУБ.

**DIAL**  
ELECTROLUX

**Электроника и  
Электротехника**

[www.dialelectrolux.ru](http://www.dialelectrolux.ru)

EPCOS

POWERTRON

YAGEO

VITROHM  
A YAGEO Company

Phicomp  
A FORMER PHILIPS COMPANY

Janitza  
electronics

WEBER

CONTA-CLIP

"ДИАЛ-Электролюкс"  
г. Москва, ул. Дегунинская, д. 1, к. 2  
Тел./факс: (495) 995-2020, 487-3350  
E-mail: [sales@dialelectrolux.ru](mailto:sales@dialelectrolux.ru)

Представительство в  
Республике Беларусь:

ООО "ДЭМС-Электро"  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 18  
Тел./факс: (017) 232-6231  
E-mail: [sales@dems.ru](mailto:sales@dems.ru)

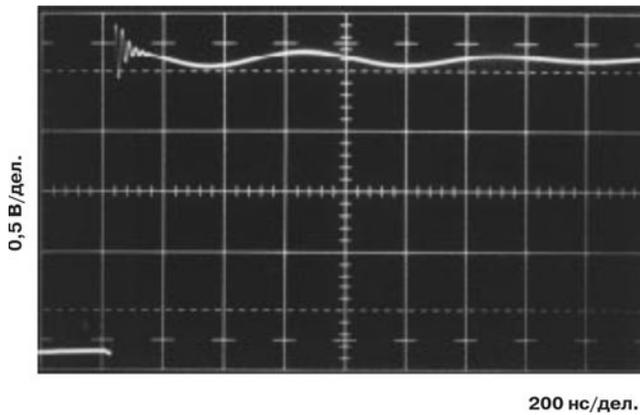


Рис. 7. Соединенные, параллельно развязывающие конденсаторы образуют резонансный контур

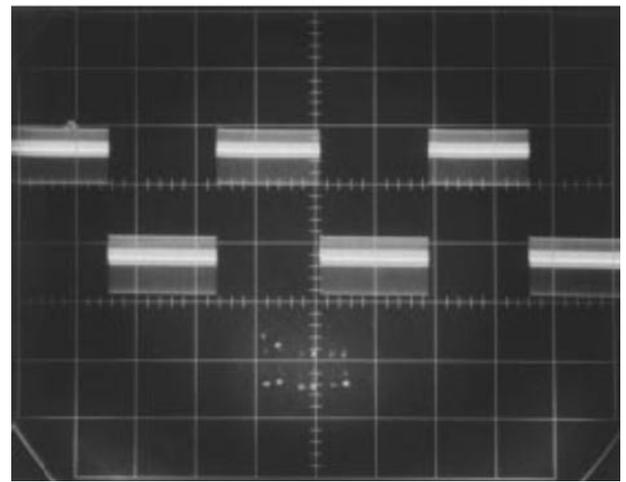


Рис. 8. Шумы генератора или импульсного преобразователя искажают выходной сигнал из-за плохой топологии платы

или его качество не соответствует требованиям.

Часто на плате устанавливают микросхемы с различными скоростями нарастания фронтов и частотой единичного усиления. В этом случае используют параллельное соединение нескольких разделительных конденсаторов. Если их соединение выполнено неверно, например, они слишком далеко отстоят друг от друга, то возможно получить осциллограмму, показанную на рисунке 7, — переходный процесс с несколькими постоянными времени. Если требуется уменьшить время установления сигнала, следует увеличить емкость развязывающих конденсаторов, но при этом надо помнить, что увеличение емкости приведет к уменьшению резонансной частоты конденсатора.

При разработке топологии печатной платы необходимо минимизи-

ровать длину проводников, соединяющих элементы обратной связи, так как их паразитные емкости и индуктивности оказывают негативное влияние на работу схемы. Длинный проводник, с одной стороны, является приемной антенной, а с другой стороны, сам является источником помех. Хорошая иллюстрация к сказанному — осциллограмма на рисунке 8. На ней высокочастотные колебания, наложенные на меандр выходного сигнала усилителя, — следствие наводок от цифрового генератора на длинные проводники печатной платы. Из-за паразитных емкостей и индуктивностей печатных дорожек на фронтах импульсов могут возникать дополнительные колебания.

Нескомпенсированный усилитель, работающий при слишком низком коэффициенте усиления, производит сигнал, показанный на рисун-

ке 9. Платой за увеличение полосы пропускания нескомпенсированного усилителя является ограничение на минимально допустимый коэффициент усиления. Такие усилители нестабильны ниже определенного (специфицируемого) минимального коэффициента усиления, и хотите вы того или нет, изменить это невозможно. Данный случай — распространенное упущение при работе с ОУ, при этом следует заметить, что выхода усилителя из строя это не влечет.

Генерация может возникать и при чрезмерной емкостной нагрузке (см. рис. 10). Заземленная емкость нагрузки приводит к задержке сигнала обратной связи на вход. Если емкость нагрузки велика, усилитель может возбудиться. Даже если нагруженный на емкость усилитель не возбуждается, будет полезно проверить его отклик на воздействие перепада

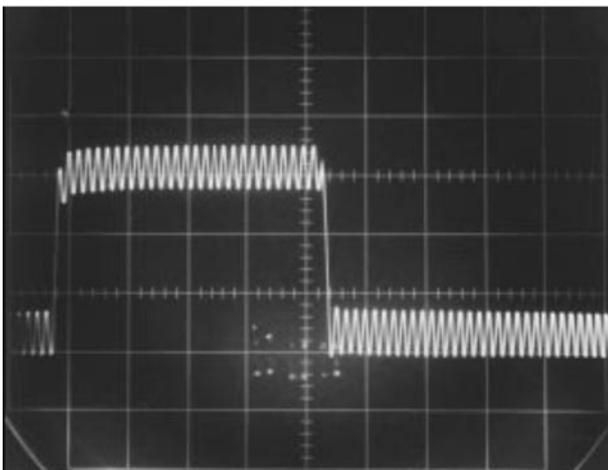


Рис. 9. Нескомпенсированный усилитель, работающий при слишком низком коэффициенте усиления

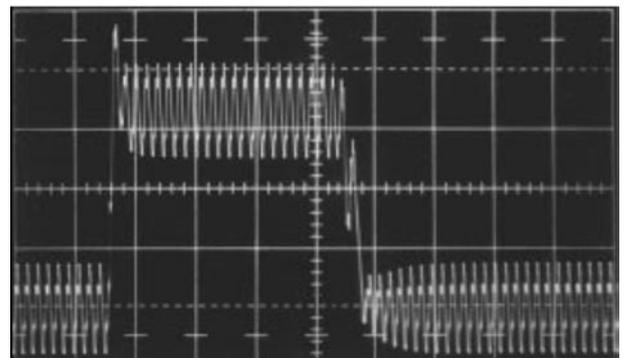


Рис. 10. Чрезмерная емкостная нагрузка нарушает работу усилителя

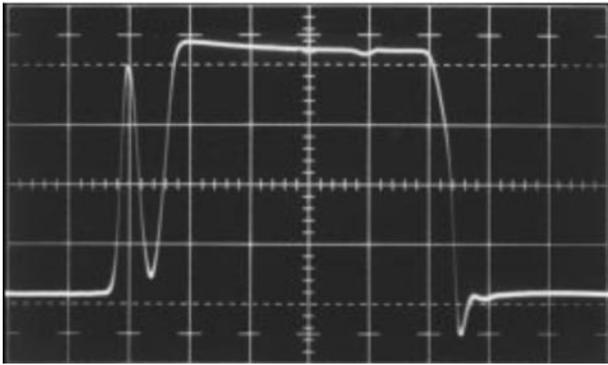


Рис. 11. Перегрузка входным синфазным сигналом приводит к лишним выходным импульсам

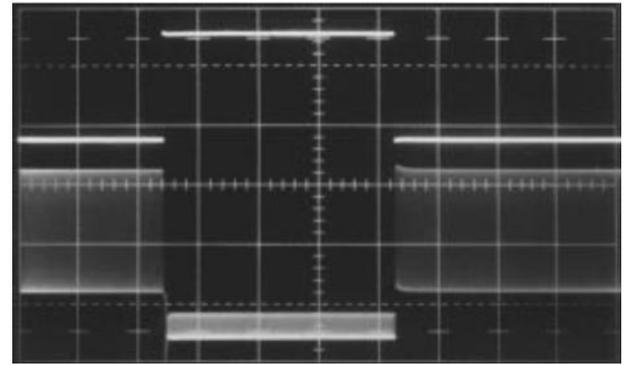


Рис. 12. Местные генерации в бустерном каскаде. Частота, как правило, высокая: а) — верхняя осциллограмма и б) — нижняя осциллограмма

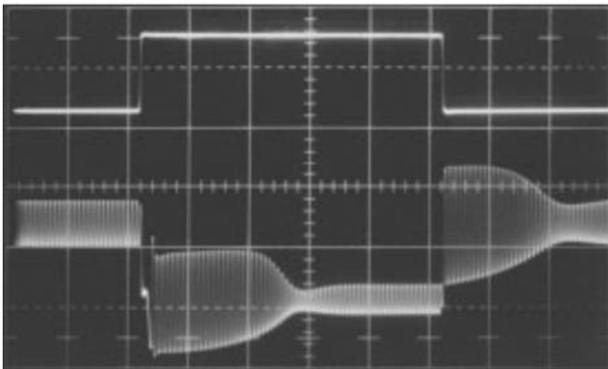


Рис. 13. Общие генерации в бустерном каскаде

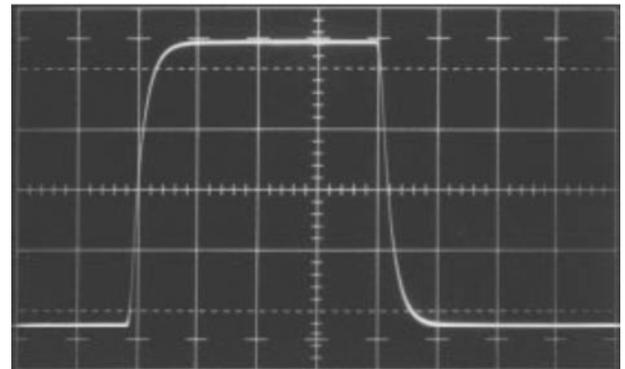


Рис. 14. Чрезмерный импеданс источника дает спокойный, но нежелательный отклик

напряжения. Может оказаться, что вы находитесь на грани нормальной работы усилителя. Избегайте емкостной нагрузки. Если такая нагрузка необходима, проверьте запас по допустимой емкости нагрузки и, если потребуется, буферизируйте ее.

Осциллограмма на рисунке 11 выглядит так, будто содержит один цикл колебания. Выход усилителя сначала откликается на входной сигнал, однако потом резко «проваливается» вниз и затем восстанавливается на уровень вершины импульса. По окончании импульса снова происходит перерегулирование и затянутое нелинейное установление до нулевого уровня. Несомненно, это странное поведение. Что здесь происходит? В показанных аномалиях виноват входной сигнал. Его амплитуда выходит за пределы допустимого синфазного напряжения, приводя к странным явлениям, показанным здесь. Никогда не выходите за пределы допустимого входного синфазного напряжения.

Рисунок 12 показывает колебания нагруженного выхода (осциллограмма «б») инвертирующего повторителя, входной сигнал отображается осциллограммой «а». Форма входного сигнала прослеживается в выходном, однако последний искажен колебаниями очень высокой частоты и выбросами. В этом случае усилитель содержит бустер, включенный в цепь обратной связи, для увеличения выходного тока. Отмеченные искажения относятся к локальной неустойчивости внутри цепи бустера. Когда используете выходные бустерные каскады, убедитесь, что они действительно стабильны, перед тем как включите их в цепь обратной связи. Широкополосные бустерные каскады чрезвычайно склонны к высокочастотному самовозбуждению.

Инвертирующий повторитель на ОУ, дополненный бустером, также возбуждается (см. рис. 13), но на существенно более низкой частоте. Кроме того, перерегулирование и нелинейное восстановление преобла-

дают в огибающей сигнала. Такое поведение имеет место не вследствие местной генерации в бустерном каскаде, оттого, что этот бустер слишком медленный и вносит достаточную для самовозбуждения задержку. Убедитесь, что бустерный каскад имеет достаточное быстродействие, чтобы обеспечить стабильность, будучи охваченным цепью обратной связи усилителя.

Спокойные фронты импульса на рисунке 14 приятно контрастируют с предыдущей осциллограммой. К сожалению, платой за это спокойствие является замедленное нарастание фронта. Эта осциллограмма вызвана чрезмерным выходным импедансом источника сигнала. Высокий выходной импеданс источника совместно с входной емкостью усилителя ограничивают полосу пропускания входной цепи, и выходной сигнал это отражает. Снижайте импеданс источника сигнала до уровня, который обеспечивает требуемую полосу пропускания. Минимизируйте паразитную входную емкость.

# АНАЛОГОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ И УПРАВЛЕНИЕ ПИТАНИЕМ



ON

ON Semiconductor®

**MT**system

официальный дистрибьютор ON Semiconductor  
в России с апреля 2007 года

 **техническая поддержка • сопровождение проектов**

Санкт-Петербург, ул. Калинина, 13  
Тел.: (812) 325-3685  
Факс: (812) 786-8579  
e-mail: [micro@mtgroup.ru](mailto:micro@mtgroup.ru)

Московское представительство:  
ул. Дубининская, д. 71, корп. 1  
Тел.: (495) 237-8838

**MT**system  
[www.mt-system.ru](http://www.mt-system.ru)