

Сверхскоростные монокристаллические аналоговые микросхемы компании National Semiconductor

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Мировая микроэлектронная промышленность ныне выпускает огромную номенклатуру монокристаллических интегральных микросхем. Широчайшее применение нашли интегральные операционные усилители, построенные на основе дифференциальных каскадов. Обычно это низкочастотные микросхемы с полосой частот, редко достигающей десятков МГц. Однако бурное развитие СВЧ и скоростной импульсной техники привело к созданию монокристаллических аналоговых микросхем сверхвысокого быстродействия — с полосой частот выше 500 МГц. В статье описаны такие аналоговые схемы (в основном операционные усилители) американской компании National Semiconductor. У отдельных микросхем полоса частот достигает единиц ГГц, а скорость изменения выходного напряжения превышает 4000 В/мкс.

Введение

National Semiconductor — одна из крупнейших микроэлектронных компаний мира. Она была основана в 1959 году и прошла путь от производства первых дискретных транзисторов до монокристаллических аналоговых и цифровых микросхем высокой степени интеграции. National Semiconductor является вторым по объему производства поставщиком полупроводниковых приборов и интегральных схем для военной, автомобильной и аэрокосмической отраслей. И активно сотрудничает с другой крупной корпорацией — Texas Instruments. Продукция компании National Semiconductor представлена на ее интернет-сайте [1] и на русскоязычном сайте группы компаний Summetron [2].

В статье рассматривается лишь небольшая часть монокристаллических микросхем, выпускаемых National Semiconductor. Это сверхширокополосные и сверхскоростные аналоговые интегральные микросхемы с рекордными параметрами по полосе пропускания и крутизне изменения выходного напряжения. Они широко применяются в современной радиотехнике, технике связи, а также в импульсной и измерительной технике.

В этой области в последнее время на передовые рубежи вышла американская компания Hittite Microwave — основной разработчик сверхскоростных монокристаллических микросхем на GaAs, гетеропереходных SiGe транзисторах и других новейших сверхскоростных полупроводниковых приборах [3]. Уступая приборам Hittite Microwave по частотным свойствам, обычные кремниевые микросхемы компании National Semiconductor отно-

сятся к категории устройств массового применения. Это, прежде всего, универсальные операционные усилители с присущими им обширными возможностями. Описанные ниже микросхемы в этом классе устройств обладают рекордными параметрами и умеренной стоимостью.

Сверхширокополосный 1,7-Гц усилитель LMN6702

Микросхема LMN6702 — это сверхширокополосный (с полосой частот 1,7 ГГц при малых сигналах) операционный усилитель с ультрамалыми искажениями. Распайка выводов в миниатюрных корпусах микросхемы дана на рис. 1. Микросхема имеет дифференциальный вход и несимметричный выход.

Основные параметры LMN6702:

- Напряжение питания: ± 5 В, максимальное — $\pm 6,75$ В.
- Напряжение на выходе: $2 V_{\text{пит}}$ (от пика до пика).
- Сопротивление нагрузки: 100 Ом.
- Полоса частот на уровне спада усиления на -3 дБ и выходном напряжении 0,5 В/1,7 ГГц.
- Приведенный к входу уровень шума: $1,83 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.
- Время установления: 13,4 нс на уровне 0,1% от установившегося значения.
- Максимальная скорость изменения выходного напряжения: 3100 В/мкс.
- Потребляемый ток: 12,5 мА.
- Максимальный выходной ток: 80 мА.
- Уровень интермодуляционных искажений (на частоте 75 МГц): -67 дБс.

На рис. 2 показаны графики типовой частотной зависимости коэффициента передачи (усиления) и фазы при выходном напряжении 0,5 В и коэффициенте усиления 2. До частоты 1 ГГц амплитудно-частотная характеристика равномерная, с небольшим (примерно 0,8 дБ) подъемом.

Представление о динамических свойствах этого усилителя дают осциллограммы импульсов на выходе (рис. 3) при подаче на вход прямоугольных импульсов при коэффициенте

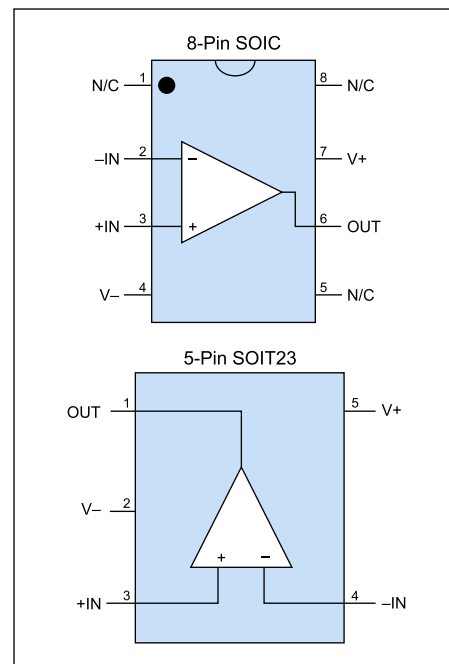


Рис. 1. Корпуса сверхширокополосного усилителя LMN6702

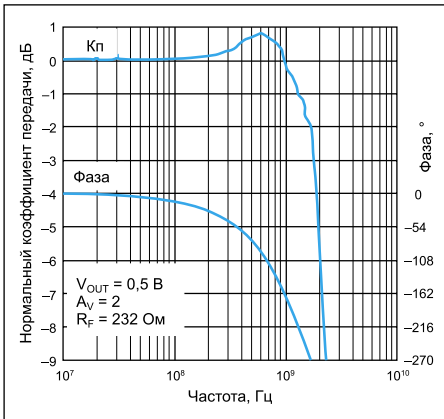


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента передачи и фазы при выходном напряжении 0,5 В и коэффициенте усиления 2 для микросхемы LMH6702

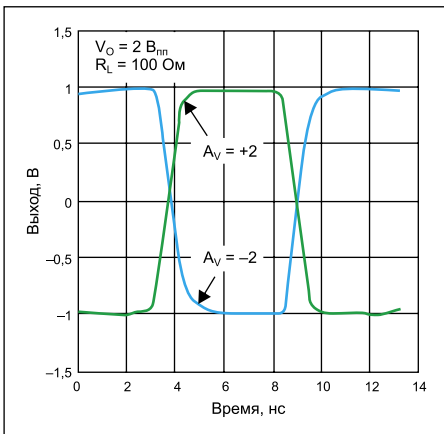


Рис. 3. Осциллограммы импульсов на выходе микросхемы LMH6702 при коэффициенте усиления, равном -2 и +2

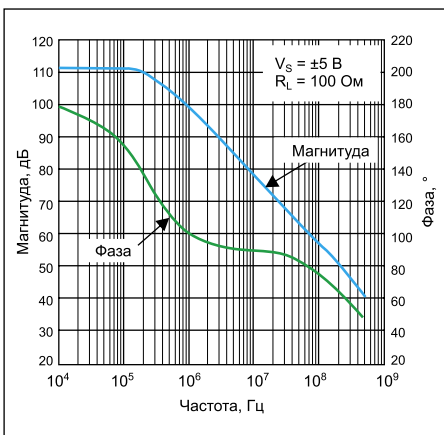


Рис. 4. ЛАЧХ магнитуды и фазы усилителя LMH6702 с разомкнутой цепью обратной связи

те усиления, равном -2 и +2, и двойном размахе выходного сигнала $2 V_{нп}$. Время нарастания и спада импульсов — около 1 нс. Это хороший показатель, но все же это в несколько раз больше теоретического значения $0,35 f_B$ (в данном случае $f_B = 1,7$ ГГц). Причина этого, скорее всего, — в конечном времени нараста-

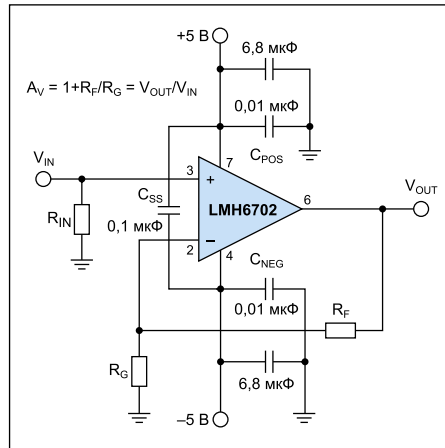


Рис. 5. Типовая схема неинвертирующего усилителя на микросхеме LMH6702

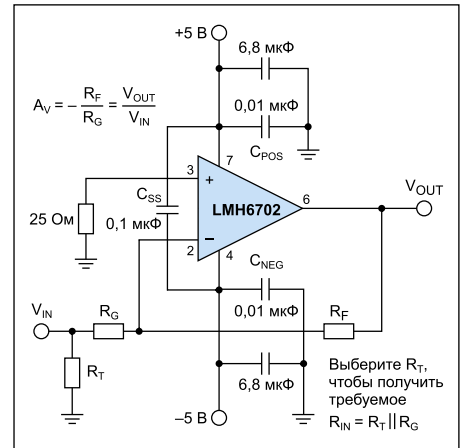


Рис. 6. Типовая схема инвертирующего усилителя на микросхеме LMH6702

ния и спада входного тестирующего импульса. К сожалению, в настоящее время номенклатура генераторов импульсов с временем нарастания и спада, которое заметно меньше 1 нс, очень ограничена [4].

О возможностях усилителя в линейном режиме обычно судят по его амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристикам при разомкнутой обратной связи. Они представлены на рис. 4 в логарифмическом масштабе.

Усилители такого типа без обратной связи практически не применяются из-за потери устойчивости и резкого снижения полосы усиливаемых частот. Типовые схемы неинвертирующего и инвертирующего усилителей на основе микросхемы LMH6702 показаны на рис. 5 и 6.

Хотя микросхема LMH6702 предназначена для работы в линейном режиме, она принципиально нелинейна, особенно при большом сигнале, когда наблюдается его ограничение. Мерой нелинейности считается появление высших гармоник при подаче на вход микросхемы синусоидального сигнала. На рис. 7 показаны типовые уровни второй

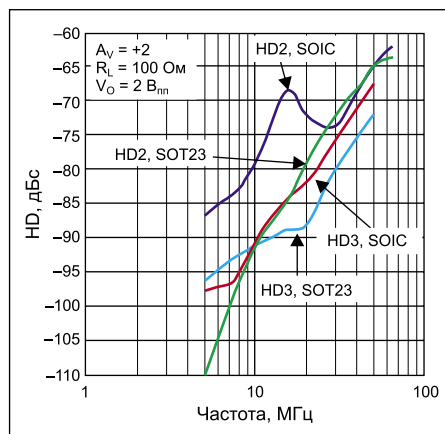


Рис. 7. Уровень гармонических искажений по второй и третьей гармоникам в зависимости от частоты для усилителя на микросхеме LMH6702

и третьей гармоник в зависимости от частоты при двойной амплитуде выходного сигнала $2 V_{нп}$. Степень этих искажений зависит и от типа корпуса, в котором размещена микросхема.

Выше приведены лишь основные и наиболее характерные параметры микросхемы LMH6702. Более подробное описание этой микросхемы (Data Sheet) можно найти на сайте National Semiconductor [1]. Микросхема предназначена для работы в качестве флэш A/D драйвера, линейного драйвера, в устройствах радиолокации и телекоммуникации, радиоприемных устройствах, измерительных приборах и т. д.

900-Гц полный дифференциальный усилитель LMH6553

Микросхема LMH6553 — это полный (с дифференциальным входом и выходом) сверхширокополосный и сверхскоростной дифференциальный усилитель с системой ограничения уровней выходного напряжения на заданном уровне и малосигнальной полосой в 900 МГц (и 670 МГц при большом сигнале).

Основные параметры LMH6553:

- Искажения по второй гармонике: -79 дБ THD при 20 МГц.
- Искажения по третьей гармонике: -92 дБ IMD3 при $f_c = 20$ МГц.
- Время установления: 10 нс на уровне 0,1% от установившегося значения.
- Время клампирования: 600 пс.
- Погрешность клампирования: 40 мВ.
- Напряжение питания: от 4,5 до 12 В.

Основные области применения микросхемы: дифференциальные драйверы скоростных АЦП, видеоустройства, дифференциальные линейные преобразователи несимметричных сигналов в симметричные, драйверы, I_F/R_F усилители, фильтры, буферы, драйверы различного типа и др. Распайка выводов в корпусах микросхемы типа PSOP и LLP показана на рис. 8.

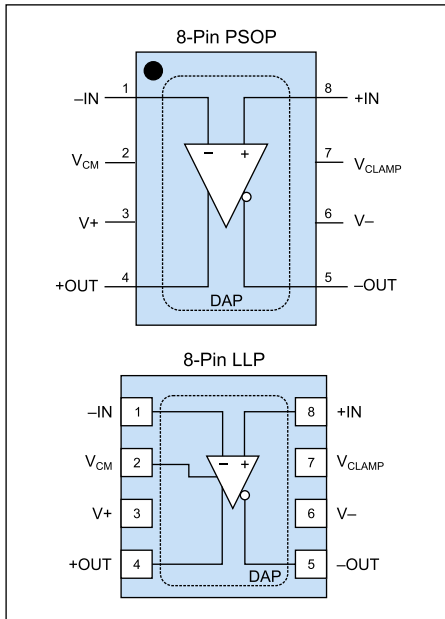


Рис. 8. Корпуса микросхемы LMH6553 PSOP и LLP

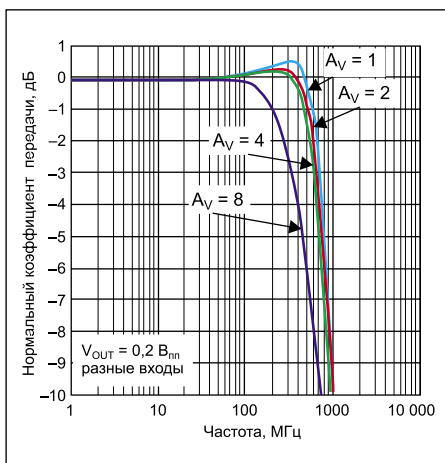


Рис. 9. Зависимость нормированного коэффициента передачи микросхемы LMH6553 от частоты при дифференциальном входе

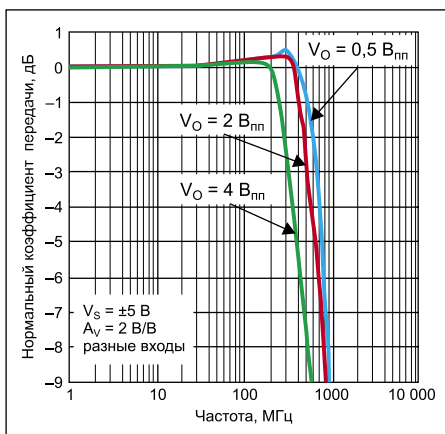


Рис. 10. Зависимость нормированного коэффициента передачи микросхемы LMH6553 от частоты при дифференциальном входе при разных значениях выходного напряжения

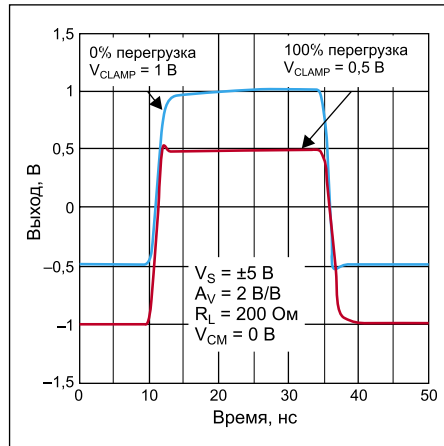


Рис. 11. Осциллограммы выходного сигнала при разных значениях напряжения ограничения при прямоугольном входном сигнале

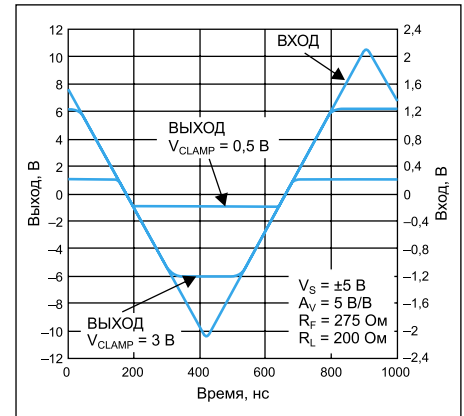


Рис. 12. Осциллограммы выходного сигнала при разных значениях напряжения ограничения выходного сигнала и треугольном входном сигнале

Зависимость нормированного коэффициента передачи микросхемы LMH6553 от частоты при дифференциальном входе представлена на рис. 9. На верхних частотах наблюдается очень небольшой (примерно до 0,5 дБ) подъем. При несимметричном входе эта зависимость имеет практически такой же характер.

Полоса частот микросхемы заметно снижается при увеличении двойной амплитуды выходного сигнала (рис. 10).

Осциллограммы выходного сигнала при разных напряжениях ограничения уровня при прямоугольном входном сигнале приведены на рис. 11. Они позволяют судить о времени нарастания и спада выходного сигнала: его значение — около 2 нс.

Аналогичные осциллограммы при треугольном входном сигнале показаны на рис. 12. Такая форма сигнала, получаемая от функциональных генераторов, удобна для оценки качества ограничения выходного сигнала. На рис. 12 видно, что оно достаточно высокое.

Об устойчивости усилителей с обратной связью обычно судят по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам (ЛАЧХ). Для микросхемы LMH6553 они представлены на рис. 13.

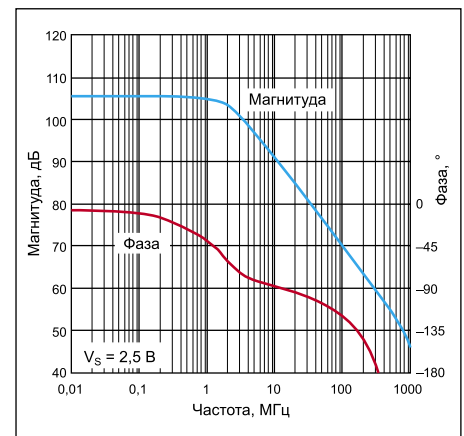


Рис. 13. Частотные характеристики магнитуды и фазы микросхемы LMH6553 с разомкнутой обратной связью

Основные схемы включения микросхемы LMH6553

На примере микросхемы LMH6553 можно рассмотреть основные схемы включения сверхскоростных монолитных интегральных операционных усилителей. На рис. 14 дана типичная схема усилителя с обратной связью и полным (к обоим выходам) включением нагрузки. Нагрузка в этом случае не имеет заземленного конца.

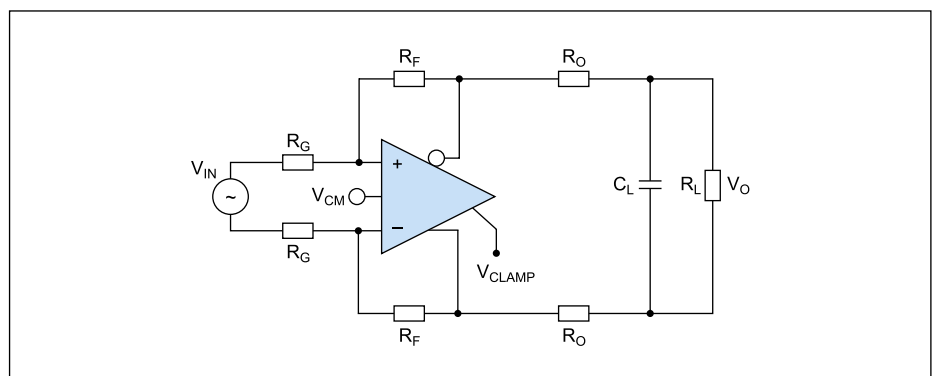


Рис. 14. Основная схема включения микросхемы LMH6553

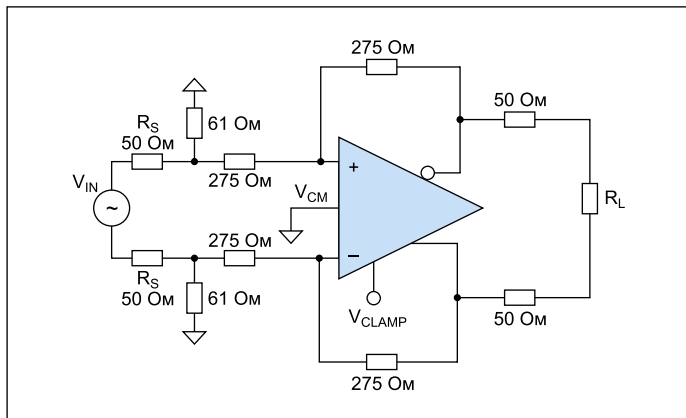


Рис. 15. 50-омная схема включения с симметричным входом

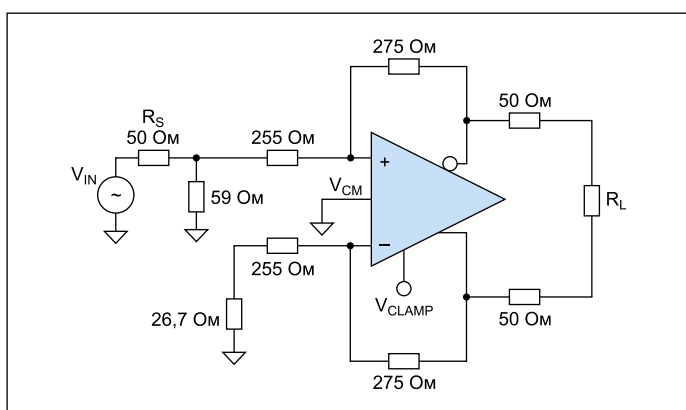


Рис. 16. 50-омная схема включения с несимметричным входом

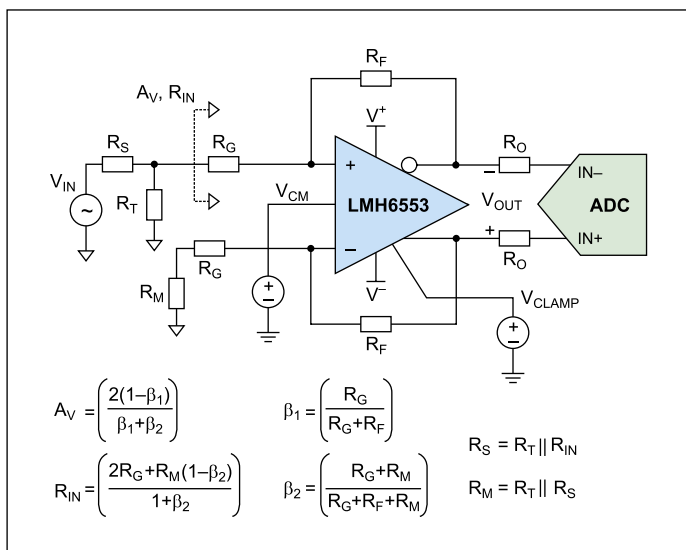


Рис. 17. Включение микросхемы LMH6553 на дифференциальный вход АЦП и основные расчетные выражения для параметров схемы

Спецификой сверхскоростных схем обычно является работа с 50-омной нагрузкой, номинал которой совпадает с волновым сопротивлением стандартных коаксиальных кабелей, применяемых в измерительной технике. (В радио- и телевизионной технике используются также кабели с волновым сопротивлением 75 Ом.) Согласование входного и выходного сопротивлений усилителей с волновым сопротивлением кабелей позволяет свести к минимуму частотные искажения и искажения формы усиливаемых импульсов.

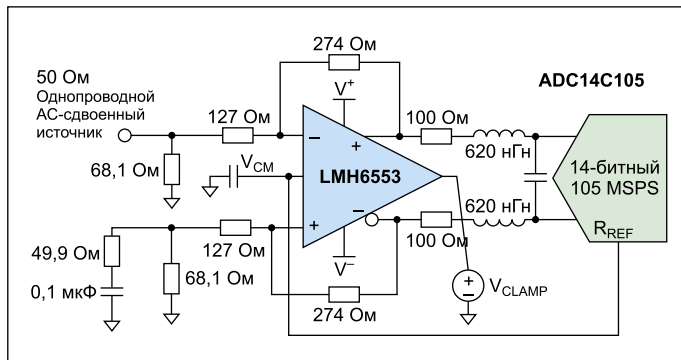


Рис. 18. Включение микросхемы LMH6553 на дифференциальный вход сверхскоростного 14-битового АЦП

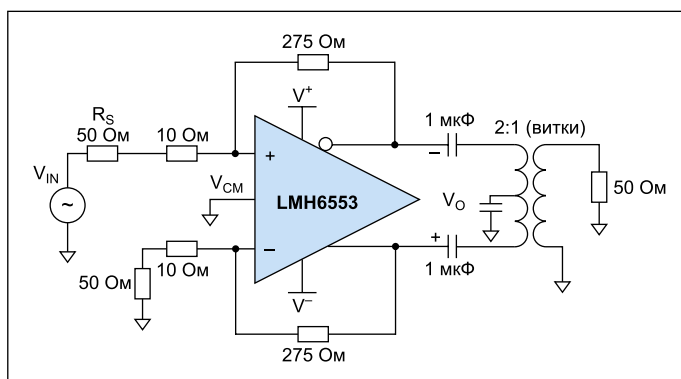


Рис. 19. Схема для снятия шумовых параметров микросхемы LMH6553

Типовая 50-омная схема включения с симметричным входом показана на рис. 15.

Подобная схема включения при несимметричном входе представлена на рис. 16.

Сверхширокополосные полные дифференциальные усилители часто используются в качестве драйверов для скоростных и сверхскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), обычно имеющих дифференциальный вход. Типичная схема такого рода представлена на рис. 17. На этом рисунке приведены также основные расчетные выражения для вычисления коэффициента усиления и входного сопротивления усилителя.

Подобная схема драйвера для скоростного и высокоточного (разрядность 14 бит) АЦП ADC14C105 со скоростью преобразования 105 Мвыб/с дана на рис. 18. Вход усилителя в этом случае 50-омный и несимметричный, а выход — симметричный дифференциальный с согласующими LC-цепями.

Сверхширокополосные операционные усилители часто применяются в радиоприемных и измерительных устройствах СВЧ-диапазона. В этом случае особое значение имеет измерение шумовых параметров таких усилителей. Типичная схема СВЧ-усилителя с 75-омным входом и трансформаторным выходом показана на рис. 19. Эту схему можно применять и для контроля шумовых параметров СВЧ операционных усилителей.

На рис. 20 показана типовая частотная зависимость шумовых параметров микросхемы LMH6553 в диапазоне коротких волн (до 30 МГц).

Еще одна область применения сверхширокополосных операционных усилителей — драйверы различных устройств. На рис. 21 показано применение микросхемы LMH6553 для работы на витую пару (Twisted Paie) с волновым сопротивлением 100 Ом. Витая пара — это одна из самых дешевых сверхширокополосных линий связи. Она применяется при организации высокоскоростных локальных компьютерных сетей.

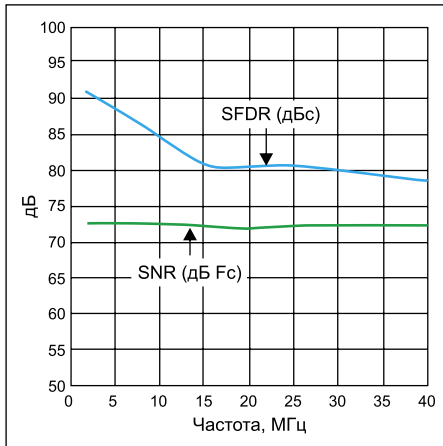


Рис. 20. Частотная зависимость шумовых параметров микросхемы LMH6553

Сверхскоростной усилитель LMH6554 с полосой 2,8 ГГц и крутизной изменения выходного напряжения до 6,2 В/нс

Монолитный операционный усилитель LMH6554 — это сверхширокополосный и сверхскоростной усилитель с полосой частот при малом сигнале 2,8 ГГц.

Основные параметры LMH6554:

- Полоса частот: 2,8 ГГц.
- Полоса частот при двойной амплитуде выходного напряжения 2 В/1,8 ГГц.
- Полоса частот на уровне спада АЧХ 0,1 дБ: 830 сГц.
- Уровень третьей гармоники OIP3 при 150 МГц: 46,5 дБм.
- Уровень второй/третьей гармоники HD2/HD3 при 75 МГц: -96/-97 дБс.
- Уровень приведенного к входу шума: 0,9 нВ/√Гц.
- Уровень шумового тока: 11 пА/√Гц.
- Высокая скорость изменения выходного напряжения: до 6200 В/мкс.
- Потребляемая от источника питания мощность: 260 мВт.
- Типичный потребляемый ток: 52 мА.
- Корпус LPT с 14 выводами (рис. 22).

Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты при разных значе-

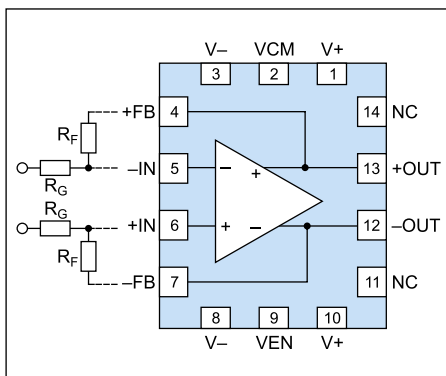


Рис. 22. Корпус LPT с 14 выводами

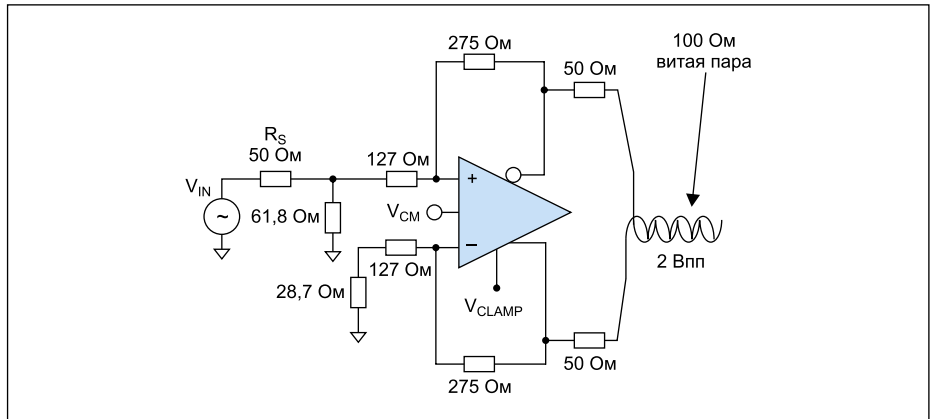


Рис. 21. Применение микросхемы LMH6553 для работы на витую пару

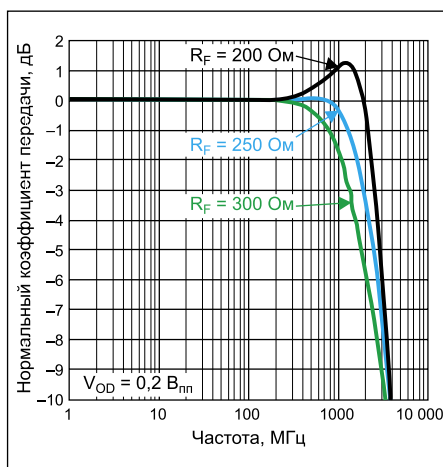


Рис. 23. Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты при разных значениях сопротивления R_F

ниях сопротивления R_F показана на рис. 23. Она соответствует малому уровню сигнала.

На рис. 24 представлена зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты при разных значениях сопротивления R_O и емкости C_L . Небольшая емкость нагрузки обычно оказывает корректирующее дей-

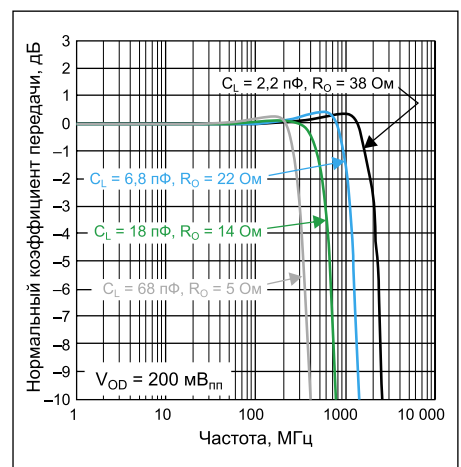


Рис. 24. Зависимость нормированного коэффициента передачи от частоты при разных значениях сопротивления R_O и емкости C_L

ствие, снижая неравномерность АЧХ и устраняя ее подъем в области высоких частот.

Осциллограммы выходных импульсов при амплитуде выходного напряжения 0,5 и 2 В показаны на рис. 25. Видно, что время нарастания и спада импульсов в режиме малого сигнала заметно меньше 1 нс.

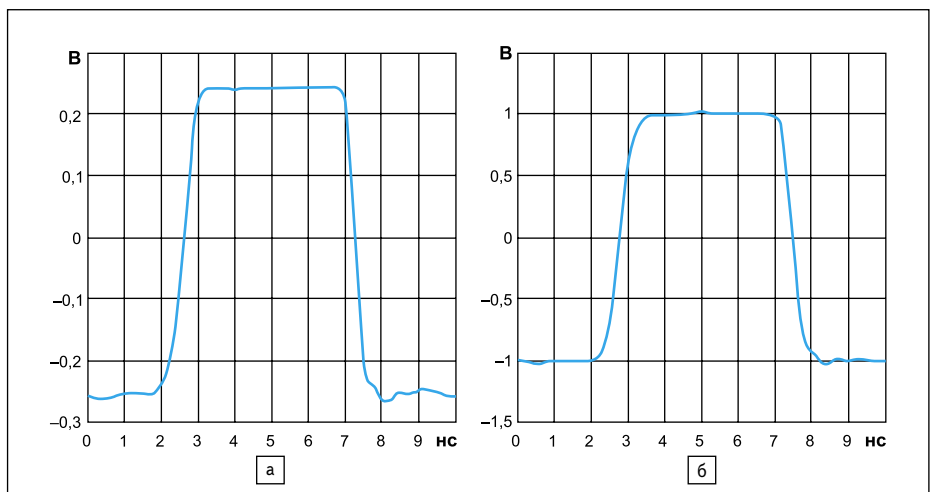


Рис. 25. Осциллограммы выходных импульсов при амплитуде выходного напряжения: а) 0,5 В; б) 2 В

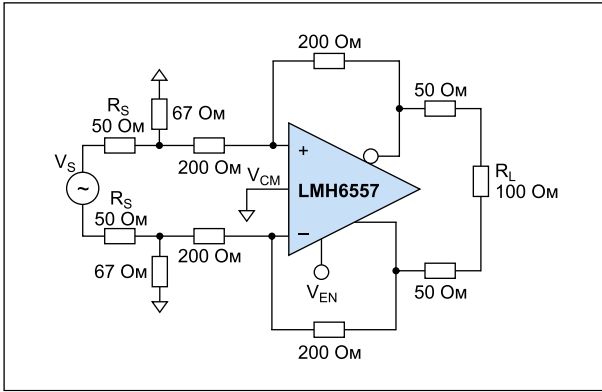


Рис. 28. Основная схема включения микросхемы LMH6557

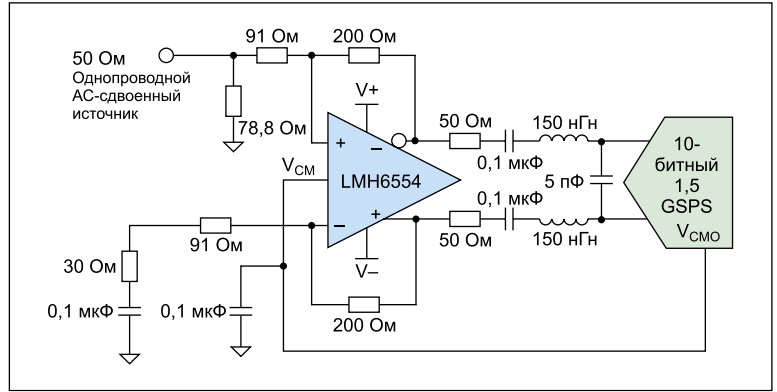


Рис. 29. Применение микросхемы LMH6554 в качестве драйвера для сверхскоростного (1,5 Гвыб/с) 10-битового АЦП

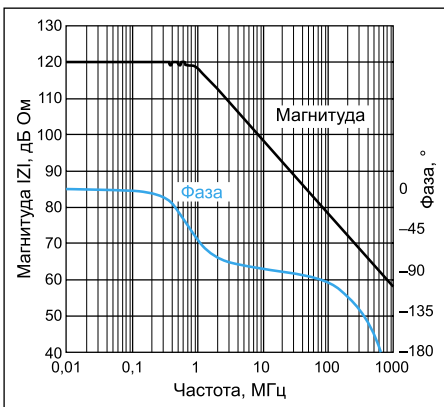


Рис. 26. Частотные характеристики магнитуды и фазы микросхемы LMH6554 с разомкнутой обратной связью

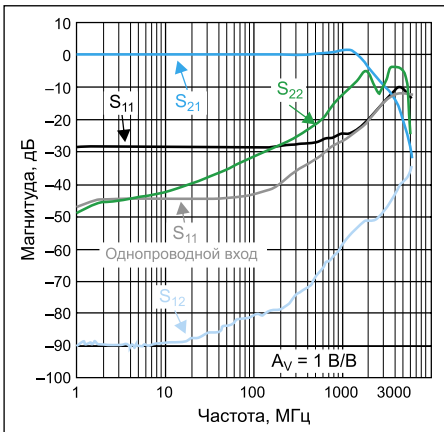


Рис. 27. Частотная зависимость S-параметров микросхемы LMH6554

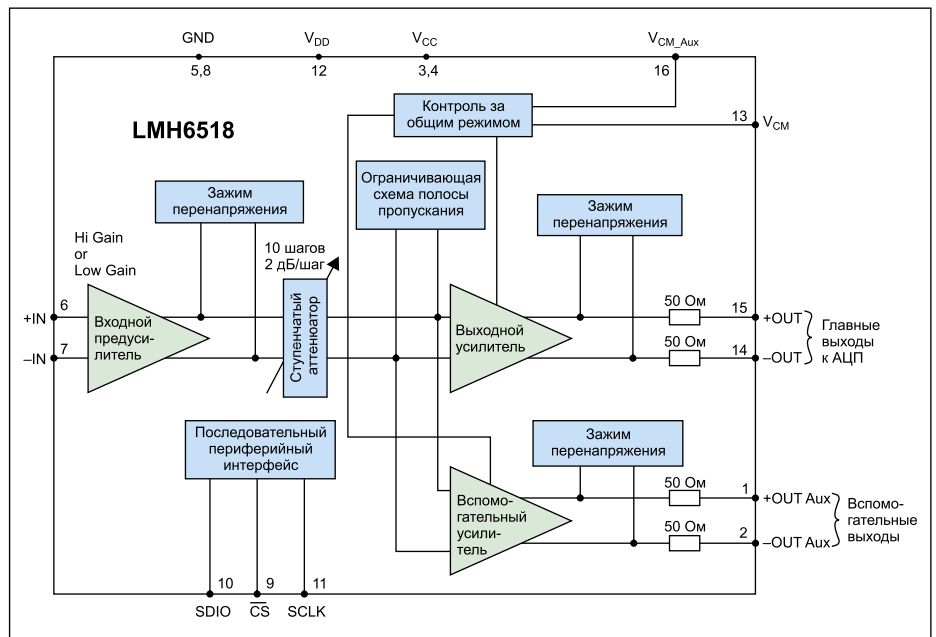


Рис. 30. Функциональная диаграмма микросхемы LMH6518

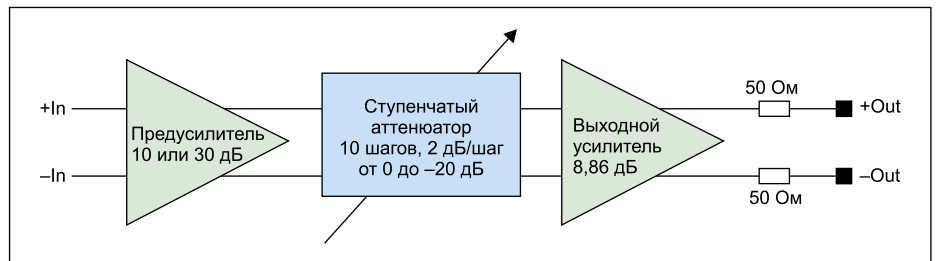


Рис. 31. Упрощенная структура микросхемы LMH6518

Частотные характеристики магнитуды и фазы микросхемы LMH6554 с разомкнутой обратной связью приведены на рис. 26. Частотные зависимости S-параметров микросхемы представлены на рис. 27.

Основную схему включения микросхемы LMH6554 можно видеть на рис. 28. Это типовая схема включения операционного усилителя, рекомендуемая изготовителем микросхемы.

Высокое быстродействие этой микросхемы позволяет использовать ее в качестве

драйвера для сверхскоростных АЦП. Пример такого применения представлен на рис. 29.

Усилитель LMH6518 с полосой частот до 900 МГц с цифровым управлением

Микросхема LMH6518 — это операционный усилитель с полосой 900 МГц с цифровым управлением и переменным коэффициентом усиления. Это позволяет построить на ее основе

цифровые осциллографы, цифровые регуляторы уровней сигналов, перестраиваемые фильтры и другие устройства. Функциональная диаграмма микросхемы — на рис. 30.

Более наглядная упрощенная структура микросхемы показана на рис. 31. Видно, что LMH6518 имеет предварительный усилитель с коэффициентом усиления 10 или 30 дБ и управляемый аттенуатор с ослаблением от 0 до -20 дБ с шагом в 2 дБ. Выходной усилитель имеет усиление в 8,86 дБ.

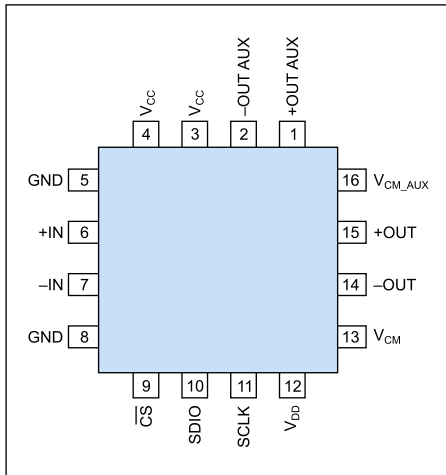


Рис. 32. Корпус микросхемы LMN6518

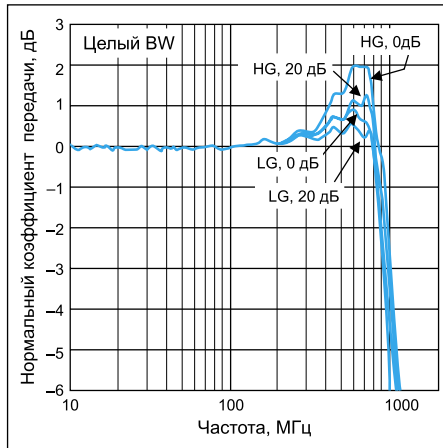


Рис. 33. Графики зависимости коэффициента передачи при разных установках коэффициента передачи

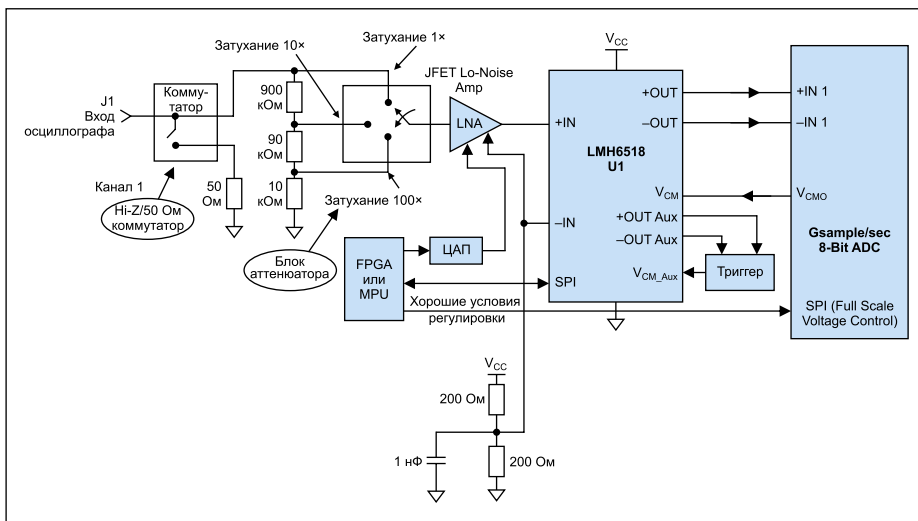


Рис. 34. Применение микросхемы LM6518 для построения цифрового осциллографа

Корпус микросхемы и назначение его выводов даны на рис. 32. Корпус имеет 16 выводов.

Графики зависимости коэффициента передачи при разных установках коэффициента передачи показаны на рис. 33. Большое число таких графиков при разных услови-

ях нормировки приведено в документации (Data Sheet) на эту микросхему.

На рис. 34 показано применение микросхемы LMN6518 для построения бюджетного цифрового осциллографа. Осциллограф имеет фиксированный резистивный аттенуатор с делением в 1, 10 и 100 раз, а микро-

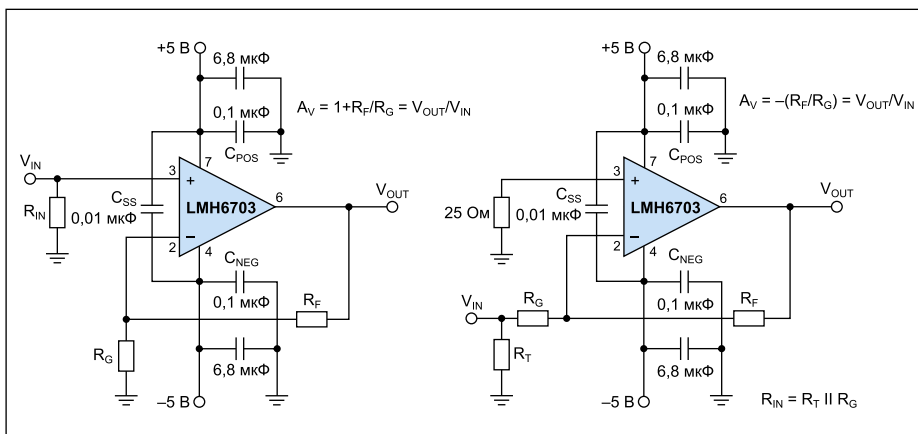


Рис. 35. Основные схемы включения микросхемы LMN6703

схема LMN6518 используется для устранения погрешностей коэффициента передачи всего тракта осциллографа.

Микросхема усилителя LMN6703 с крутизной изменения выходного напряжения 4,5 В/нс

Часто к усилителям, применяемым в импульсных устройствах, предъявляют требования обеспечения высокой скорости изменения (крутизны) выходного напряжения. Она измеряется в В/мкс или В/нс. Для линейных цепей крутизна прямо пропорциональна полосе частот. Но реальные усилители — нелинейные устройства, и далеко не всегда наиболее широкополосный усилитель будет обеспечивать и наиболее высокую крутизну выходного напряжения. Она, в частности, сильно зависит от размаха выходного напряжения усилителя и условий его ограничения.

Микросхема LMN6703 — это усилитель с малыми искажениями, малосигнальной полосой частот 1,2 ГГц и высокой скоростью изменения выходного напряжения: не менее 4500 В/мкс (4,5 В/нс). Микросхема имеет функцию отключения (Shutdown). Уровень 2-й и 3-й гармоник (на частоте 20 МГц, корпус SOT23-6): -69/-90 дБс. Уровень шума — 23 нВ/√Гц. Потребляемый от источника питания ток — 11 мА, максимальный выходной ток — 90 мА.

Основные схемы применения микросхемы LMN6703 показаны на рис. 35. Там же даны основные расчетные выражения для коэффициента усиления и входного сопротивления. Области применения микросхемы: RGB-видеодрайверы высокого разрешения, проекционные устройства, флэш A/D-драйверы, радары, устройства связи и т. д.

Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи при разных амплитудах выходного сигнала показана на рис. 36. Для этой микросхемы характерно, что спад усиления с ростом частоты слабо зависит от амплитуды выходного напряжения. Это

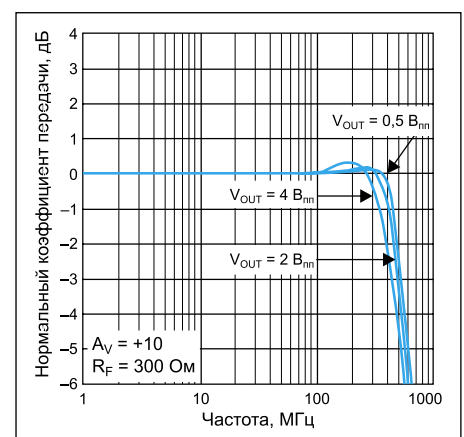


Рис. 36. Частотная зависимость нормированного коэффициента передачи при разных амплитудах выходного сигнала

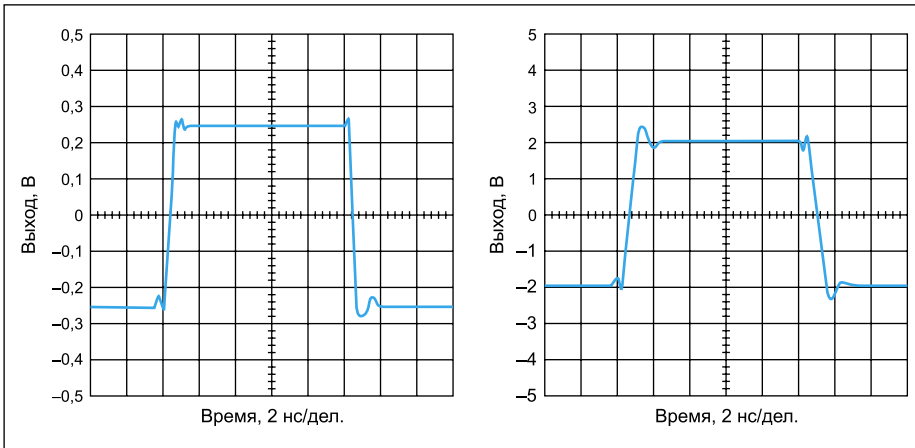


Рис. 37. Осциллограммы прямоугольного импульса при амплитуде 0,5 и 4 V_{пп} напряжения на выходе

говорит о том, что микросхема хорошо оптимизирована для работы в импульсном режиме и позволяет получить большую крутизну изменения выходного напряжения.

Осциллограммы, показанные на рис. 37 при двух значениях амплитуды выходного сигнала (от пика до пика), подтверждают сказанное. Время нарастания и спада импульсов не превышает 1 нс. Фронты импульсов имеют практически линейный характер и сопровождаются небольшими выбросами.

Микросхема сверхскоростного буфера LMH6559

Компания National Semiconductor выпускает высокоскоростные буферные микросхемы, в основном в виде дифференциальных усилителей. Но, как известно, максимальным быстродействием обладают все же несимметричные схемы, построенные на основе усилительных каскадов. Микросхемой такого рода является сверхскоростной буфер LMH6559 (рис. 38).

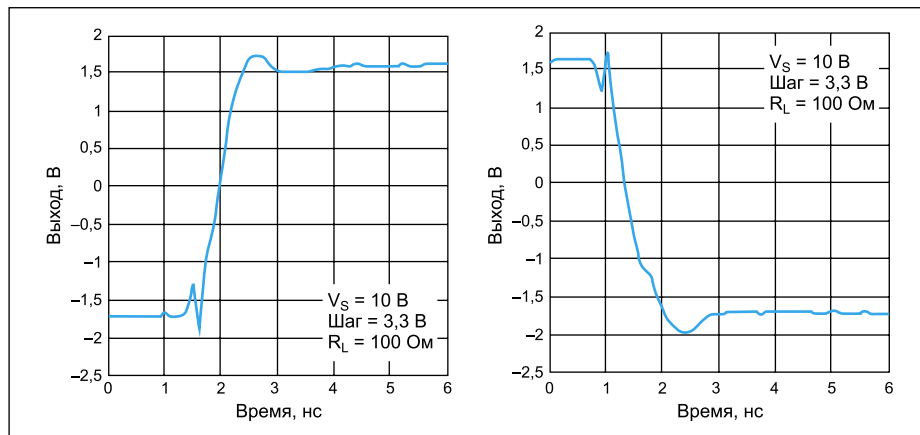


Рис. 39. Положительный и отрицательный перепады выходного напряжения микросхемы LMH6559

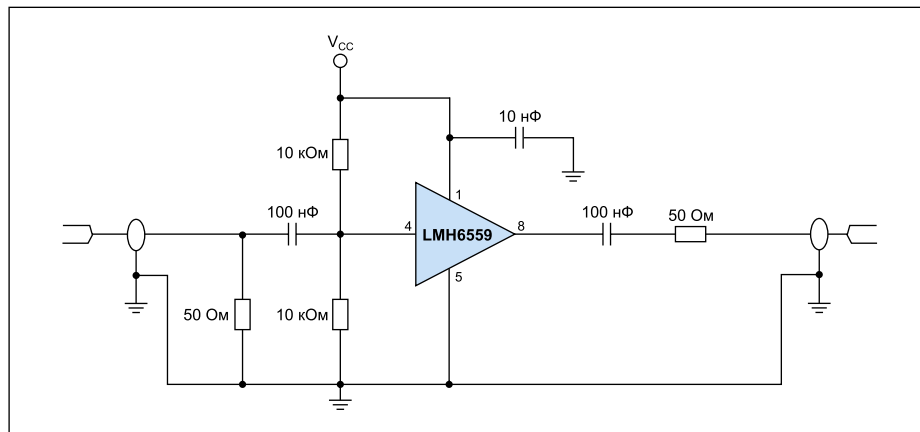


Рис. 40. Схема линейного драйвера на основе микросхемы LMH6559

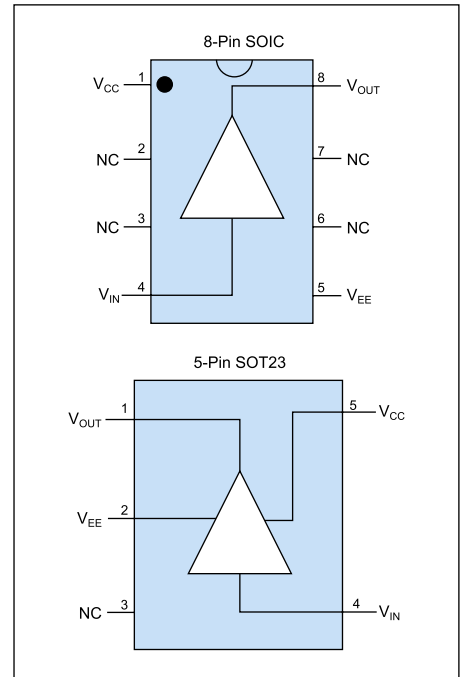


Рис. 38. Раскладка выводов корпусов микросхемы LMH6559

Осциллограммы перепадов выходного сигнала этой микросхемы показаны на рис. 39. Длительность перепадов — менее 1 нс. Характерны выбросы от фронтов входного импульса. Их наличие — признак того, что при тестировании использовался генератор входных импульсов с очень малым временем нарастания и спада.

Типичная схема сверхскоростного линейного драйвера на основе микросхемы LMH6559 показана на рис. 40. Драйвер имеет входное сопротивление 50 Ом и рассчитан на работу с 50-омной нагрузкой. Он оптимизирован на получение малых значений времени нарастания и спада импульсов на выходе драйвера.

Микросхема дифференциального сверхскоростного драйвера LMH6555

Некоторые сверхскоростные операционные усилители выпускаются специально как драйверы. К ним относится и микросхема LMH6555 (рис. 41).

АЧХ микросхемы LMH6555 представлена на рис. 42. Она характеризует работу этой микросхемы в режиме малого сигнала.

Осциллограммы импульсов на входе и на выходе микросхемы приведены на рис. 43. Ориентировочное время нарастания и спада достигает 0,5 нс. Это самые малые значения этих параметров для микросхем компании National Semiconductor.

Микросхему LMH6555 можно применять в качестве драйвера для сверхскоростных АЦП, например тех, что используются в цифровых запоминающих осциллографах. Такое применение показано на рис. 44.

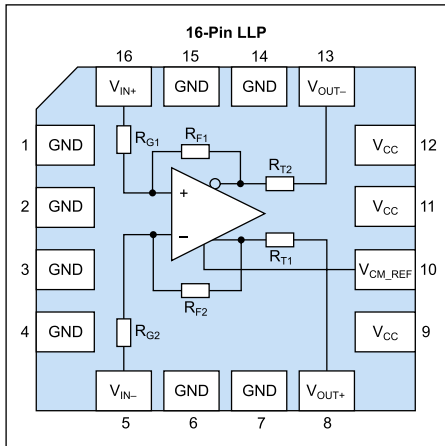


Рис. 41. Функциональная диаграмма LMH6555

На рис. 45 изображен спектр сигнала на выходе АЦП (рис. 44). Уровень шума мал, и спектр довольно равномерный за исключением самого начала и конца, где видны так называемые фундаментальные гармоники.

Заключение

В классе операционных усилителей и дифференциальных драйверов ряд микросхем фирмы National Semiconductor имеет ха-

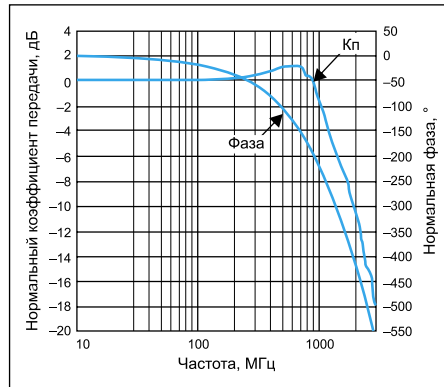


Рис. 42. АЧХ микросхемы LMH6555

рактеристики на уровне лучших в отрасли. Компания использует стандартную технологию изготовления кремниевых интегральных микросхем, дополненную многочисленными усовершенствованиями. Это позволило получить высокие параметры микросхем операционных усилителей и дифференциальных драйверов без существенного их удорожания. Микросхемы находят широкое применение в СВЧ-технике, радиотехнике, технике связи и в измерительных приборах. Особо следует выделить применение широкополосных операционных усилителей

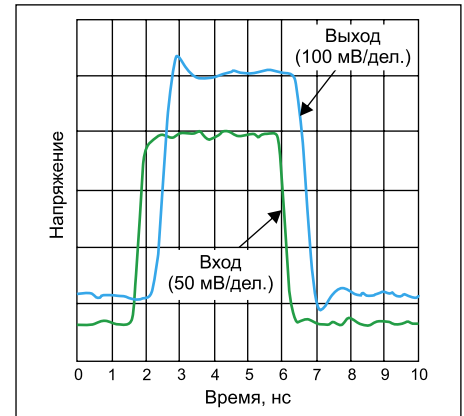


Рис. 43. Осциллограммы импульсов на входе и выходе микросхемы LMH6555

в качестве драйверов для сверхскоростных АЦП, светодиодов и высокочастотных мощных полевых транзисторов.

Литература

1. www.national.com
2. <http://www.symmetron.ru/suppliers/national/>
3. www.hittite.com
4. Дьяконов В. П. Современные измерительные генераторы импульсов. М.: ДМК-Пресс, 2011.

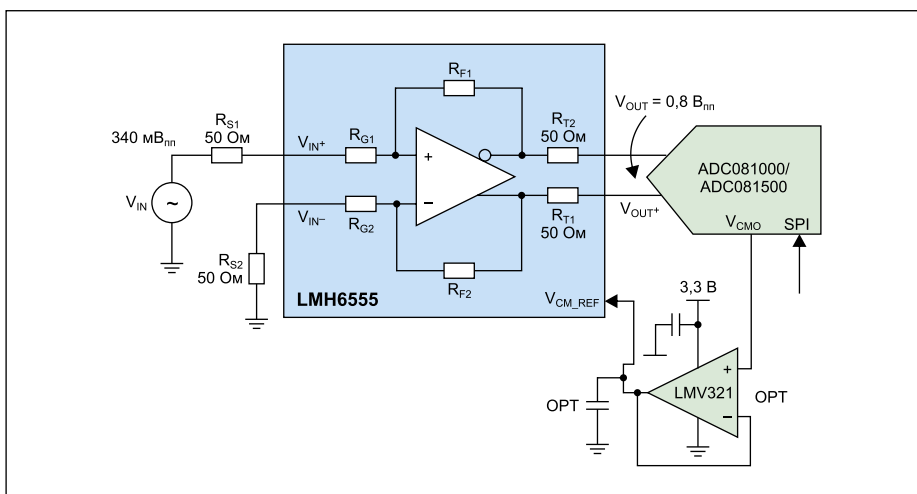


Рис. 44. Применение микросхемы LMH6555 в качестве драйвера сверхскоростного АЦП

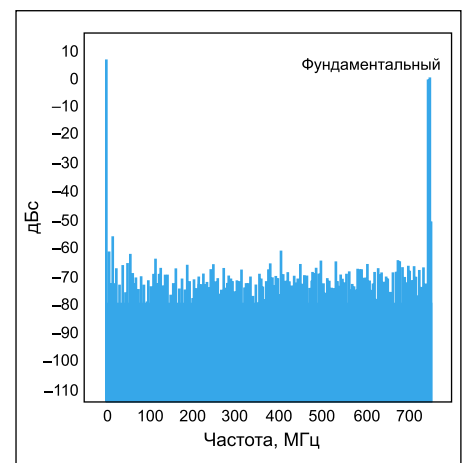


Рис. 45. Спектр АЦП с драйвером на основе микросхемы LMH6555