

На правах рукописи

САВЧЕНКО Евгений Матвеевич

**ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ
С ТОКОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ВЫСОКИМ УРОВНЕМ
ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ**

Специальность:

05.27.01 Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро-
и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2011

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Пульсар».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Васильев А.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Петросянц К.О.

кандидат технических наук Данилов А.А.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт микроэлектронной аппаратуры «Прогресс» (г. Москва)

Защита состоится «14» декабря 2011 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 409.004.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное предприятие «Пульсар» в г. Москва (конференц-зал) по адресу: Окружной проезд д.27, г. Москва, 105187.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственное предприятие «Пульсар».

.

Автореферат разослан «11» ноября 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук

А.Л. Филатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одними из важнейших показателей качества радиоэлектронных систем является их динамический диапазон, который в значительной степени определяется параметрами электронных устройств, причём как аналогового тракта, так и цифрового тракта обработки сигнала. Исходные сигналы большинства систем являются аналоговыми и для оптимального преобразования в цифровую форму необходима их предварительная аналоговая обработка, включающая масштабирование сигнала, предварительную фильтрацию, согласование импеданса и др.

Одним из основных устройств, используемых в трактах предварительной аналоговой обработки сигнала, являются операционные усилители. С момента появления операционных усилителей сфера их применения постоянно расширялась, и поэтому ранее основными характеристиками интегральных микросхем (ИМС) данного класса было принято считать статические характеристики, которые показывают точность работы по постоянному току, а так же динамические характеристики, которые показывают частотные свойства и быстродействие схем данного класса. В связи использованием таких ИМС в высокоскоростных аналого-цифровых системах появилась необходимо уделять внимание не только этим параметрам, но и параметрам, характеризующих динамическую точность обрабатываемых сигналов.

Постоянное увеличение скорости и точности обработки информации требует расширения как частотного, так динамического диапазона аналого-цифровых систем. ИМС операционных усилителей являются основой для построения таких систем и оказывают на их характеристики существенное влияние, поэтому их исследование и разработка является актуальной и позволит решить комплекс задач, стоящих перед отечественным радиоэлектронным комплексом в целях укрепления обороноспособности страны и создания нового поколения радиоэлектронной аппаратуры различного назначения.

За рубежом имеется широкий класс аналогичных ИМС с требуемыми параметрами, однако они достигнуты благодаря субмикронным размерам эмиттеров комплементарных биполярных транзисторов в комбинации с полной диэлектрической изоляцией элементов ИМС. В РФ в настоящее время не освоено в производстве подобных технологических процессов, поэтому актуальной является задача исследования и разработки высокоскоростных ИМС операционных усилителей с токовой обратной связью (ОУ с ТОС) с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов на основе освоенного в производстве комплементарного биполярного технологического процесса с изоляцией элементов ИМС обратносмещённым р-п переходом с шириной эмиттеров транзисторов 6 мкм.

За рубежом в указанном направлении работает ряд крупных компаний, таких как Analog Devices, Texas Instruments (Burr Brown), Intersil (Elantec),

National Semiconductor, Maxim, Linear Technology и Cadeca Microcircuits (ранее Comlinear Corporation).

Цель работы - разработка и исследование высокоскоростных ИМС ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов, обеспечивающих согласованную работу с ИМС аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с разрядностью до 10 бит и частотой дискретизации до 50-60 МГц на основе отечественных и зарубежных комплементарных биполярных технологических процессов с изоляцией элементов ИМС обратносмещённым р-n переходом.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- развиты теоретические и экспериментальные методы:
 - ◆ оценки динамической точности обрабатываемых сигналов высокоскоростных ОУ с ТОС;
 - ◆ оптимизации схемного и топологического решения ОУ с ТОС;
 - ◆ исследования времени установления выходного напряжения с точностью 0,1% до 10-15 нс как в инвертирующем, так и в неинвертирующем включении;
 - ◆ исследования коэффициента гармоник при частоте входного сигнала до 20 МГц и уровне гармонических искажений до -78 дБ;
 - ◆ исследования коэффициента разделения каналов многоканальных ОУ с ТОС на частотах до 20 МГц и значением коэффициента разделения до 80 дБ;
- разработаны методические основы проектирования высокоскоростных ИМС ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов (время установления выходного напряжения 12 нс, уровень гармонических искажений -60 дБ, коэффициент разделения каналов 74 дБ) изготовленных на основе комплементарных биполярных технологических процессов изоляции элементов ИМС обратносмещённым р-n-переходом;
- получены экспериментальные результаты, подтверждающие теоретически обоснованные причины ограничений уровня динамической точности обработки сигналов ОУ с ТОС:
 - ◆ значение времени установления выходного напряжения ограничивается заниженным значением частоты паразитного полюса, формируемого элементами токового зеркала усилительного каскада и переходом рабочей точки транзисторов усилительного каскада в область квазинасыщения;
 - ◆ уровень гармонических искажений ограничивается разбалансом паразитных емкостей транзисторов в высокоомной точке усилительного каскада;
 - ◆ коэффициент разделения каналов ограничивается гальванической связью каскадов через общий источник тока и пространственным взаимодействием каналов при отсутствии гальванической связи.

- установлена связь режима работы интегральных элементов, схемного и топологического решения основных каскадов ОУ с ТОС с параметрами, характеризующими уровень динамической точности обработки сигналов:
 - ◆ переход рабочей точки транзисторов усилительного каскада в область квазинасыщения в 2-3 раза завышает значение времени установления выходного напряжения и приводит к дополнительному ограничению скорости нарастания выходного напряжения;
 - ◆ учёт паразитных параметров металлизации входного каскада ОУ с ТОС и оптимизация его топологического решения позволяет на 20-30 % снизить паразитную ёмкость, ограничивающую скорость нарастания во входном каскаде и улучшить показатели устойчивости ОУ с ТОС;
 - ◆ в случае использования низковольтного технологического процесса НЛV допустима схмотехническая избыточность при реализации входного каскада, позволяющая при обеспечении заданных требований динамической точности обработки сигнала обеспечить исключение подстройки напряжения смещения.

Практическая значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в том, что на основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований выполнена разработка ряда отечественных ИМС ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов (1432УД6, 1432УД8, 1432УД11, 1432УД12, 1432УД15). Данные ИМС прошли полный комплекс испытаний, освоены в серийном производстве и используются в радиоэлектронной аппаратуре широкого применения, в том числе совместно с 8-12 разрядными аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями.

Научные положения, выдвигаемые для защиты:

1. Достижение уровня гармонических искажений ВЧ сигнала до -60 дБ на частоте 20 МГц обеспечивается идентичностью ёмкости коллектор-подложка комплементарных биполярных транзисторов усилительного каскада с уровнем разбаланса не более 10%, скоростью нарастания выходного напряжения не менее 800 В/мкс, модуляцией выходного сопротивления не более 1% при петлевом усилении на частоте сигнала не менее 10.
2. Для достижения времени установления выходного напряжения 12 нс (для точности 0,1%) необходимо исключить переход рабочей точки транзисторов ИМС в область квазинасыщения, и обеспечить ширину полосы пропускания не менее 300 МГц при близкой к двухполусной амплитудно-частотной характеристике ИМС с критерием устойчивости - подъёмом АЧХ при замкнутой цепи обратной связи не более 2,5 дБ и скоростью нарастания выходного напряжения не менее 800 В/мкс.
3. Для обеспечения коэффициента разделения каналов многоканальных ОУ на ВЧ на уровне 74 дБ для отечественного корпуса 2101.8-7 необходимо обеспечить раздельное задание режимов работы каналов

ИМС и электрическое соединение крышки корпуса с одним из потенциалов напряжения питания.

4. Обеспечение заданных параметров динамической точности (Кг не более -60 дБ, туст не более 12 нс) при работе ОУ с большим сигналом достигается введением интегрирующего конденсатора в схему источника опорного тока, снижающего коэффициент передачи по петле положительной обратной связи на высоких частотах.
5. При использовании технологического процесса Р35ХХ на этапе технологического процесса необходимо обеспечивать удельное поверхностное сопротивление эмиттерного р⁺-слоя не более 50 Ом/□ для достижения динамических параметров ОУ с ТОС, необходимых для получения заданного уровня динамической точности обработки сигналов (Кг не более -60 дБ, туст не более 12 нс).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на следующих научно-технических конференциях и семинарах: **«Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем»** (г. Москва, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2006, 2008 и 2010 гг.); **ICCSC'06** (July 6-7, Bucharest, Romania, 2006); ежегодных международных научно-практических семинарах **«Актуальные проблемы аналоговой микросхемотехники»** (г. Шахты, ЮРГУЭС), научно-технических конференциях **«Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА»** (г. Москва, ФГУП «НПП «Пульсар», 2001-2010 гг.), международной научно-практической конференции **«INTERMATIC-2003»**, международной научно-технической конференции **«Электроника и информатика-2005»**, **ECCSC'08** (Politehnica University, Bucharest, Romania: July 10-11, 2008), **«Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС - 2008»** (г. Омск, 14-17 октября 2008 г.), **International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2009”** (г. Звенигород, 5-9 октября 2009 г.).

По теме диссертации опубликовано 42 работы в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, 5 работ в изданиях рецензируемых ВАК, получено 5 патентов РФ и 10 свидетельств об официальной регистрации топологии ИМС.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 153 страницах текста, иллюстрированного таблицами, графиками и рисунками, библиографического списка и приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы. Сформулированы цели и задачи, решаемые в диссертации, приведено краткое содержание глав диссертации. Отмечены научная и практическая ценность результатов работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту. Приведен список конференций и публикаций, в которых докладывались материалы диссертации.

В первой главе проводится обзор основных типов ОУ их особенностей и свойств. Рассматриваются основные параметры конструктивно-технологического базиса отечественного и зарубежных технологических процессов, проводится сопоставление полученных результатов по зарубежным публикациям и промышленным результатам. Излагаются тенденции по улучшению основных параметров ОУ, проводится формулирование основных технических требований к ОУ данного класса.

Анализируя зарубежные разработки можно отметить, что первые ИМС ОУ с ТОС разрабатывались на основе высоковольтных комплементарных биполярных процессов для напряжения питания ± 15 В и граничными частотами транзисторов 0,5-1,5 ГГц и их рабочие частоты для малого сигнала составляли 50-150 МГц.

Для изготовления более высокоскоростных ОУ необходимо использовать транзисторы с большими граничными частотами, что приводит к снижению их пробивных напряжений, поэтому большая часть таких ОУ работает при напряжении питания ± 5 В.

При рассмотрении ОУ с ТОС выделяют две основных структуры, отличающиеся количеством каскадов усиления. Первая предложена Нельсоном и содержит один каскад усиления, вторая, содержащая два каскада усиления, предложена Гёссером.

Преимуществами ОУ с ТОС с одним каскадом усиления является наиболее широкая полоса пропускания, меньший ток потребления и более высокая скорость нарастания выходного напряжения. Совершенствование таких ОУ с ТОС происходит по пути улучшения параметров отдельных каскадов ОУ.

Основным преимуществом ОУ с ТОС с двумя каскадами усиления является малый уровень гармонических искажений, что достигается за счёт повышения запаса по коэффициенту усиления ОУ на высокой частоте. Однако по остальным динамическим параметрам ОУ с ТОС с двумя каскадами усиления проигрывают, что объясняется их большей электрической длиной [9] и сложностями с обеспечением устойчивости за счёт частотной коррекции.

Большинство ОУ с ТОС зарубежными компаниями выпускаются по технологическим процессам с полной диэлектрической изоляцией, что

обеспечивает значительное снижение паразитной изолирующей ёмкости транзисторов.

Обобщённая информация по параметрам конструктивно-технологического базиса различных комплементарных биполярных технологических процессов представлена в таблице 1,

Таблица 1

Параметр	НПП «Пульсар», P35XX	National Semiconductor, VIP3	Analog Devices, CB	Analog Devices, XFCB	Plessey (Zarlink), HJV
Год разработки	1986	1994	1985	1992	1998
Изоляция	p-n переходом	p-n переходом	p-n переходом	диэлектрическая (КНИ)	Щелевая
Uкэ. проб	36 В	>32 В	36 В	>12 В	>12 В
ft, n-p-n	1,5 ГГц	3 ГГц	0,65 ГГц	4,5 ГГц	9 ГГц
h21э, n-p-n	70	150	175	70	170
Va, n-p-n	40 В	150 В	60 В	80 В	120 В
Скб/Скп	140/910 фФ	500/ - фФ	0,6/1,3 пФ	70/31 фФ	5/15 фФ
ft, p-n-p	2,0 ГГц	1,6 ГГц	0,6 ГГц	2,5 ГГц	8 ГГц
h21э, p-n-p	40	60	180	55	50
Va, p-n-p	50 В	50 В	55 В	25 В	45 В
Скб/Скп	250/2000 фФ	-	1,1/3,4 пФ	66/31 фФ	8/30 фФ

Представленные в таблице технологические процессы можно разделить на две группы, в первой представлены высоковольтные процессы с пробивными напряжениями больше 32 В, предназначенные для создания ИМС с номинальным напряжением питания до ± 15 В, во второй группе представлены процессы с напряжением пробоя больше 12 В, предназначенные для создания ИМС с номинальным напряжением питания до ± 5 В.

В виду наличия ограничений Джонсона достижимые граничные частоты высоковольтных транзисторов оказываются значительно меньшими. При этом стоит отметить, что снижение граничной частоты транзисторов способствует улучшению их усилительных свойств.

В зависимости от требований, предъявляемых к ОУ целесообразно подбирать оптимальный технологический процесс. Из отечественных, освоенным в производстве является только высоковольтный комплементарный биполярный технологический процесс P35XX. На основе данного технологического процесса необходимо разрабатывать и выпускать как высоковольтные, так и низковольтные ИМС ОУ, что накладывает дополнительные ограничения при разработке высокоскоростных ОУ с ТОС с

высокой динамической точностью обработки сигнала. В указанных обстоятельствах, целесообразным является использование структуры ОУ с ТОС с одним каскадом усиления.

Рассматриваемый класс ИМС предназначен для разработанных и разрабатываемых в РФ ИМС аналого-цифровых преобразователей с разрядностью до 10 бит и частотой дискретизации 50-60 МГц. Зарубежные аналоги AD9057, AD9058, AD9059, AD9221 и др. Освоенные в промышленном производстве отечественные ИМС АЦП уступают им по параметрам. Для обеспечения универсальности разрабатываемых ОУ и возможности их стыковки с вновь разрабатываемыми отечественными АЦП они должны обладать следующими основными параметрами:

- полоса пропускания для малого сигнала не менее 200 МГц;
- скорость нарастания выходного напряжения не менее 1000 В/мкс;
- время установления выходного напряжения с точностью 0,1% не хуже 15 нс;
- гармонические искажения сигнала не хуже -60 дБ на частоте 20 МГц;
- спектральная плотность ЭДС шума не более 10 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$;
- напряжение смещения не более $\pm 10,0$ мВ;
- коэффициент разделения каналов не менее 60 дБ.

Для большинства АЦП для работы с указанными частотами характерны входное сопротивление более 1 кОм и входная ёмкость 5-15 пФ, поэтому необходимым является указание зависимости основных параметров от сопротивления и ёмкости нагрузки.

Кроме того, следует отметить, что рассматриваемые ИМС будут использоваться в комплекте не только с АЦП, но и с ЦАП с аналогичными характеристиками. Использование ОУ с ЦАП в первую очередь подразумевает применение в инвертирующем включении для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение. Поэтому основные характеристики ОУ необходимо рассматривать как для инвертирующего, так и для неинвертирующего включения.

Во второй главе формулируются требования к динамическим параметрам ОУ с ТОС для достижения высокой динамической точности обработки сигнала, проводится анализ методов и схемотехнических решений, связанных с улучшением характеристик динамической точности ОУ, рассматриваются результаты моделирования отдельных каскадов ОУ и особенности их объединения, производится выбор и оптимизация режимов работы интегральных элементов при проектировании ОУ с ТОС, проводится анализ многоканальных ОУ с ТОС в части взаимодействия каналов ОУ на высокой частоте.

Для достижения минимального времени установления выходного напряжения ОУ с замкнутой обратной связью (ОС) необходимо обеспечить

амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) с затуханием 20 дБ на декаду в широком диапазоне частот [7], зависящем от требуемой точности.

На практике для высокоскоростных ОУ с ТОС, удаётся получать АЧХ ОУ, которые приближённо можно описывать передаточной функцией второго порядка:

$$K(s) = \frac{K}{T_2 s^2 + T_1 s + 1},$$

где K – коэффициент передачи, T_1 и T_2 – постоянные времени, соответствующие частоте первого и второго полюсов передаточной функции ОУ, s – оператор Лапласа.

Для иллюстрации на рис. 1 приведены переходные процессы в различных масштабах для однополюсной системы (кривая 1), и для двухполюсных систем с разной степенью устойчивости (кривые 2 и 3), а на рис. 2 приведены соответствующие им АЧХ.

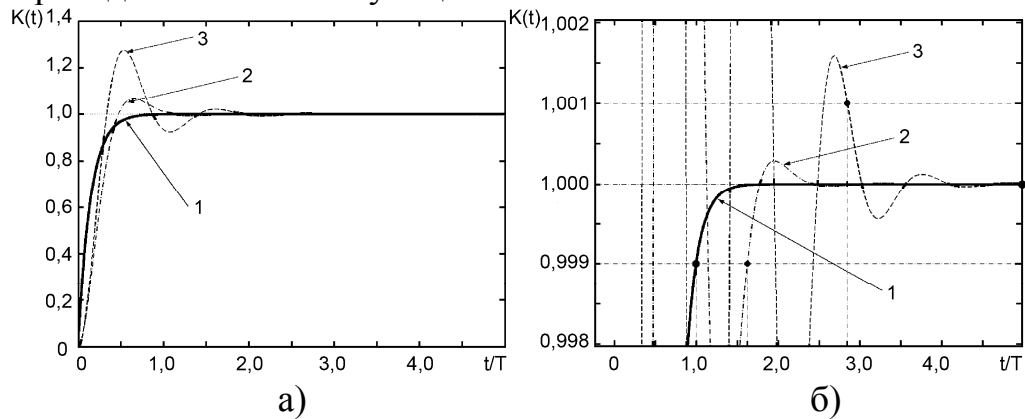


Рис. 1 Переходные процессы в различных масштабах для однополюсной системы, и для двухполюсных систем с разной степенью устойчивости

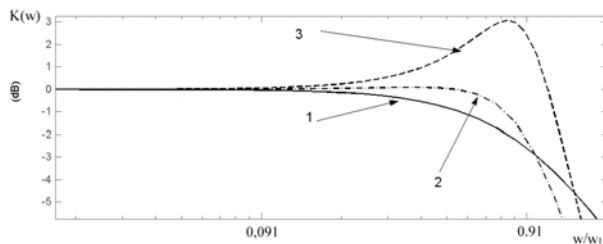


Рис. 2 АЧХ для однополюсной (кривая 1) и двухполюсных систем с разной степенью устойчивости (кривые 2 и 3)

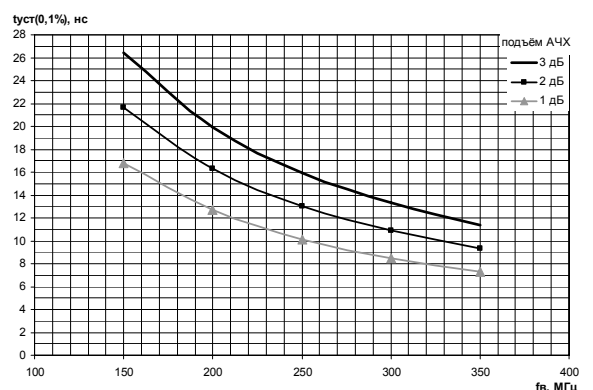


Рис. 3 Зависимости времени установления от значения верхней граничной полосы пропускания ОУ

На рис. 3 для двухполюсной АЧХ приведены зависимости времени установления выходного напряжения при $\delta=0,1\%$ от значения верхней

граничной полосы пропускания ОУ при различных значениях подъёма на АЧХ.

В ОУ с ТОС время установления выходного напряжения ограничивается следующими основными факторами:

- временем фронта импульса в режиме большого сигнала;
- колебаниями на вершине импульса;
- локальными эффектами теплового разогрева элементов.

Для ОУ с ТОС, изготавливаемых на основе высоковольтной комплементарной биполярной технологии Р35ХХ к наиболее значительным процессам, нарушающим гармонический характер колебаний на вершине импульса, относится переход рабочей точки транзисторов усилительного каскада в область квазинасыщения, что приводит к значительному затягиванию переходного процесса [1].

Уровень гармонических искажений в ОУ с ТОС на высокой частоте ограничивается нелинейными эффектами и запасом по коэффициенту усиления на частоте сигнала.

Для ОУ с ТОС, изготавливаемых на основе высоковольтной комплементарной биполярной технологии с изоляцией р-п переходом Р35ХХ можно выделить несколько основных нелинейных эффектов: нелинейность емкостей изоляции комплементарных транзисторов, нелинейность емкостей коллектор-база, нелинейность выходного сопротивления выходного буферного усилителя, нелинейность коэффициента передачи по току ($h_{21э}$) транзисторов при значительном изменении уровня тока.

Влияние емкостей изоляции комплементарных транзисторов преобладает при работе ОУ с ТОС на высокоомную нагрузку, когда выходной каскад практически не вносит искажений. Для минимизации этого эффекта необходимо выбирать транзисторы усилительного каскада, таким образом, чтобы паразитная изолирующая ёмкость р-п-р и п-р-п транзисторов была одинакового номинала. Поскольку ёмкости комплементарных транзисторов изменяются противофазно (рис. 4), то при равных емкостях это снижает модуляцию суммарной ёмкости высокоомной точки выходным напряжением.

Влияние емкостей переходов коллектор-база не столь значительно, как емкостей изоляции ввиду их меньшей величины, но их необходимо учитывать, особенно для случаев использования полной диэлектрической изоляции элементов ОУ с ТОС.

Нелинейность, обусловленная выходным буферным усилителем является доминирующим фактором при работе на низкоомную нагрузку. Это объясняется сильной модуляцией выходного сопротивления током нагрузки, протекающим через выходные эмиттерные повторители.

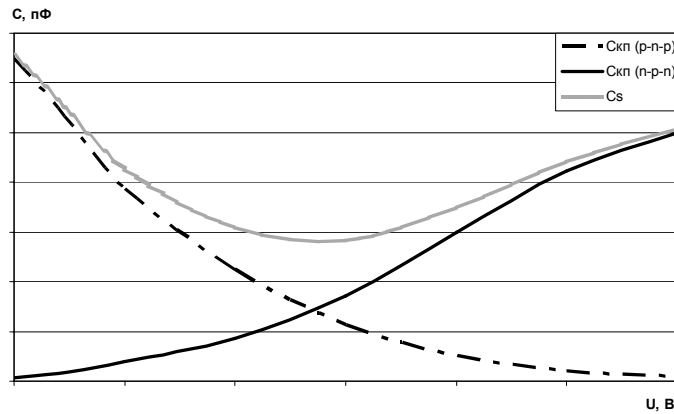


Рис. 4 Зависимость ёмкости изолирующего перехода комплементарных биполярных транзисторов от приложенного напряжения

Одним из вариантов снижения гармонических искажений, вносимых выходным каскадом, является снижение его собственного выходного сопротивления за счёт увеличения режимных токов и соответственно размеров выходных транзисторов, но это требует увеличения площади выходного каскада и увеличивает общий ток потребления.

Снизить модуляцию выходного сопротивления можно повысив его, что достигается введением последовательно с нелинейным сопротивлением выходного каскада линейного резистора. При этом выходное сопротивление несколько увеличивается, а модуляция выходного сопротивления снижается. Эффективность снижения модуляции определяется соотношением:

$$\Theta = \frac{R_o + R_{доп}}{R_o}$$

где Θ – эффективность снижения модуляции выходного сопротивления, R_o - собственное выходное сопротивление ОУ с ТОС без ООС, $R_{доп}$ - сопротивление дополнительного резистора.

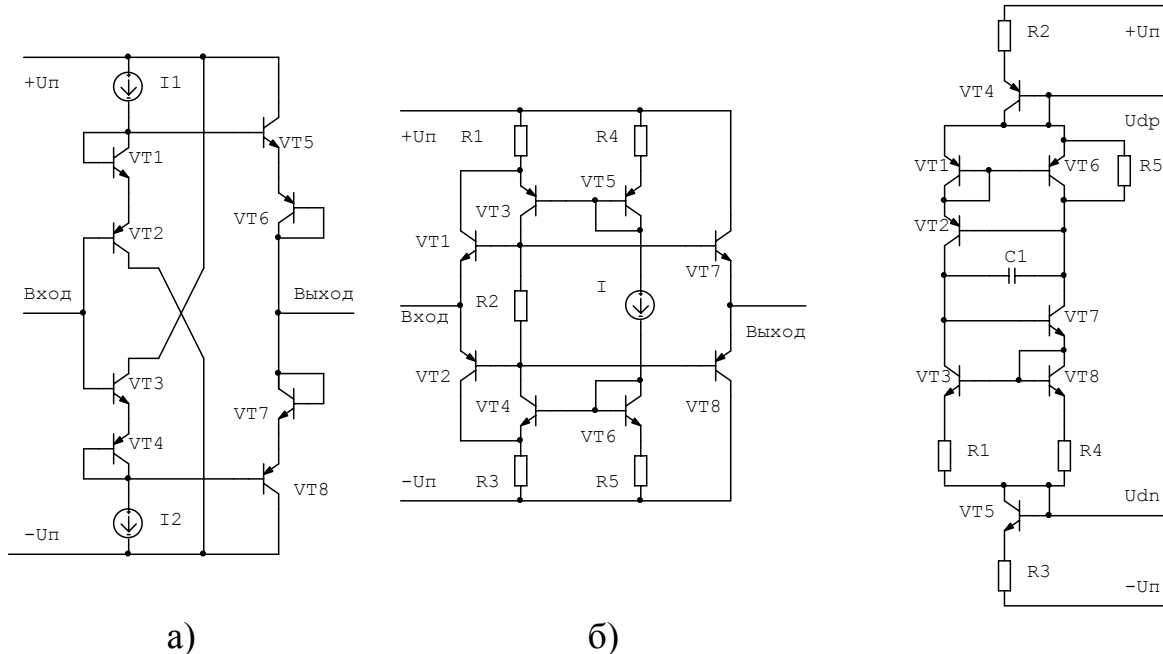
Нелинейность $h_{21э}$ транзисторов при значительном изменении уровня тока оказывает несколько меньшее влияние на общие гармонические искажения и проявляется в передаче нелинейных составляющих токов базы транзисторов через входные эмиттерные повторители выходного буферного усилителя в высокоомную точку усилительного каскада. Для снижения влияния этой составляющей необходимо обеспечение режима работы выходных транзисторов в области с минимальным изменением $h_{21э}$ при изменении тока в заданном диапазоне.

Снижения влияния всех перечисленных факторов на уровень гармонических искажений ОУ с ТОС можно добиться за счёт введения ООС. Гармонические искажения тем меньше, чем выше запас по коэффициенту усиления ОУ (без ООС) на частоте обрабатываемого сигнала.

Динамические параметры ОУ с ТОС связаны со схемотехническим решением каскадов, которое в свою очередь зависит от заданной совокупности параметров.

Входной каскад определяет статические характеристики ОУ с ТОС и скорость нарастания выходного напряжения. Для создания ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности наиболее подходящим является входной каскад с транзисторами на входе, однако его использование приводит к возникновению значительного напряжения смещения ОУ (до ± 50 мВ).

Существует вариант построения входного каскада ОУ, в котором для компенсации разности $U_{бэ}$ комплементарных транзисторов последовательно с основными транзисторами включаются дополнительные противоположного типа проводимости [11]. Схема такого входного каскада изображена на рис. 5а. Напряжение смещения такой схемы составляет 1-2 мВ. При этом схеме не присущи такие недостатки входного каскада с диодным включением входных транзисторов [2], как высокий I_{BX}^+ , малое входное сопротивление, высокая входная ёмкость. Однако в такой схеме сокращается динамический диапазон по входу и снижается скорость нарастания выходного напряжения.



а) Рис. 5 Варианты схемотехнического решения входного каскада ОУ с ТОС

б) Рис. 6 Схемотехническое решение источника опорного тока

Кроме этого одним из компромиссных решений является схема входного каскада, приведённая на рис. 5б, в которой смещение выходных транзисторов буферного усилителя осуществляется однотипными транзисторами [12]. В сравнении с диодным входным каскадом данная схема имеет меньшую входную ёмкость; большую скорость нарастания и динамический диапазон.

За основу источников опорного тока ОУ с ТОС часто принимается схема, основанная на встречном включении токовых зеркал с положительной обратной связью. Такая схема является безусловно устойчивой на низких частотах. На высоких частотах при подаче на вход ОУ с ТОС «большого»

сигнала существует вероятность перехода схемы в отключённое состояние. При этом происходит резкое снижение тока, протекающего через диоды, задающие ток каскадов ОУ с ТОС и происходит значительная деградация динамических параметров и параметров динамической точности ОУ с ТОС. Для исключения этого эффекта в схему необходимо введение интегрирующего конденсатора С1, снижающего коэффициент передачи по петле положительной обратной связи на высоких частотах, как это показано на рис. 6.

Наличие нескольких идентичных ОУ в корпусе одной микросхемы вызывает взаимодействие каналов ОУ между собой, которое характеризуется коэффициентом разделения каналов. Взаимодействие между каналами ИМС можно разделить на две составляющие: взаимодействие за счёт гальванической связи и за счёт пространственного взаимодействия.

На рис. 7 показаны входные ступени буферных усилителей двух каналов ОУ с ТОС, режимный ток которых задаётся через общий источник опорного тока. В таком случае удобно представить взаимодействие каналов в виде эквивалентного входного напряжения и эквивалентного входного тока взаимодействия, приведённых ко входу второго канала ОУ:

$$U_{infl_eqv}(f) = \frac{U_{out_2_PNP}(f) + U_{out_2_NPN}(f)}{2 \cdot K_{e_f}},$$

$$I_{infl_eqv}(f) = \frac{I_{e_f2_PNP}(f)}{\beta_{PNP}} + \frac{I_{e_f2_NPN}(f)}{\beta_{NPN}},$$

где $U_{infl_eqv}(f)$ – эквивалентное входное напряжение взаимодействия каналов;

$I_{infl_eqv}(f)$ – эквивалентный входной ток взаимодействия каналов;

$U_{out_2}(f)$ – напряжение на каждом из выходов ступени второго канала;

$K_{e_f}(f)$ – коэффициент передачи эмиттерного повторителя по напряжению;

$I_{e_f}(f)$ – сквозной ток, протекающий через источник тока первого канала;

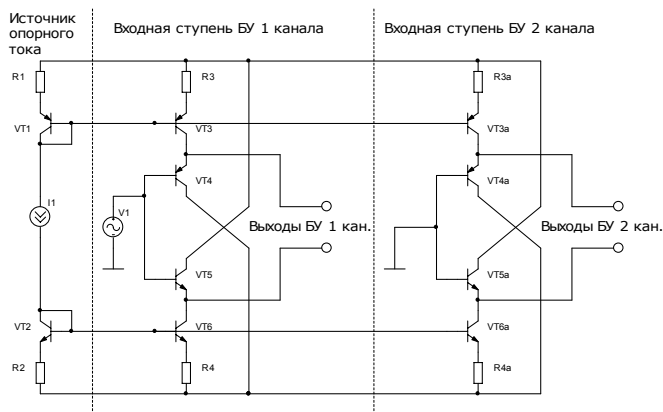


Рис. 7 Схематическое решение входных ступеней двухканального ОУ с

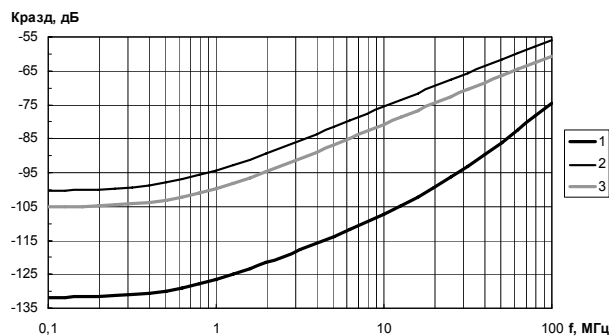


Рис. 8 График зависимости коэффициента разделения каналов

ТОС с общим источником опорного тока двухканального ОУ с ТОС от частоты

Значительного снижения взаимодействия между каналами можно добиться, исключив протекание базового тока транзисторов VT3 и VT6 через диодные цепочки источника опорного тока.

В связи с наличием паразитных емкостей транзисторов и их частотными свойствами происходит ухудшение коэффициента разделения каналов ОУ с ростом частоты сигнала, что показано на рис. 8 для различных вариантов схемотехнического решения цепей смещения.

В случае использования отдельных источников опорного тока для каналов ОУ с ТОС конечность коэффициента разделения каналов обуславливают несколько типов связи через корпус многоканальных ОУ:

- 1) Емкостная связь между выводами кристалла и корпуса ИМС.
- 2) Трансформаторная связь между выводами кристалла и корпуса ИМС
- 3) Двойная трансформаторная связь через ободок корпуса микросхемы

Эквивалентная схема двух каналов ОУ с ТОС в корпусе 2101.8-7, построенная на основе доминирующих элементов всех видов пространственной связи, приведена на рис. 9.

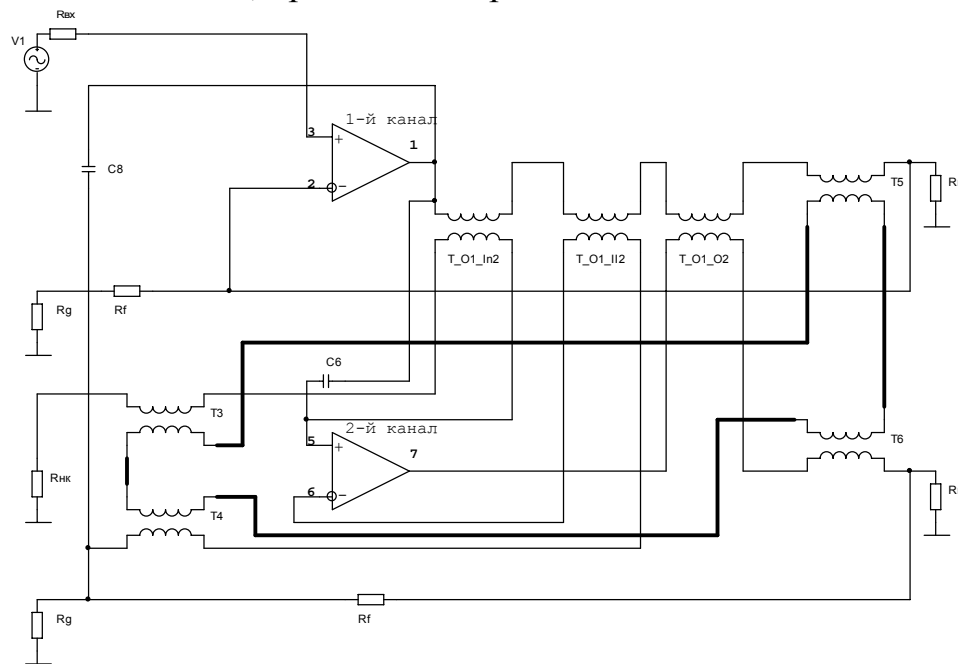


Рис. 9 Эквивалентная схема двухканального ОУ с ТОС в корпусе 2101.8-7

В третьей главе излагается методика и особенности исследования параметров динамической точности ОУ с ТОС, проводится обсуждение режимов измерения, рассматриваются вопросы проектирования топологического решения ОУ с ТОС, методик учёта влияния корпуса на динамические параметры ОУ с ТОС и параметры динамической точности обработки сигнала.

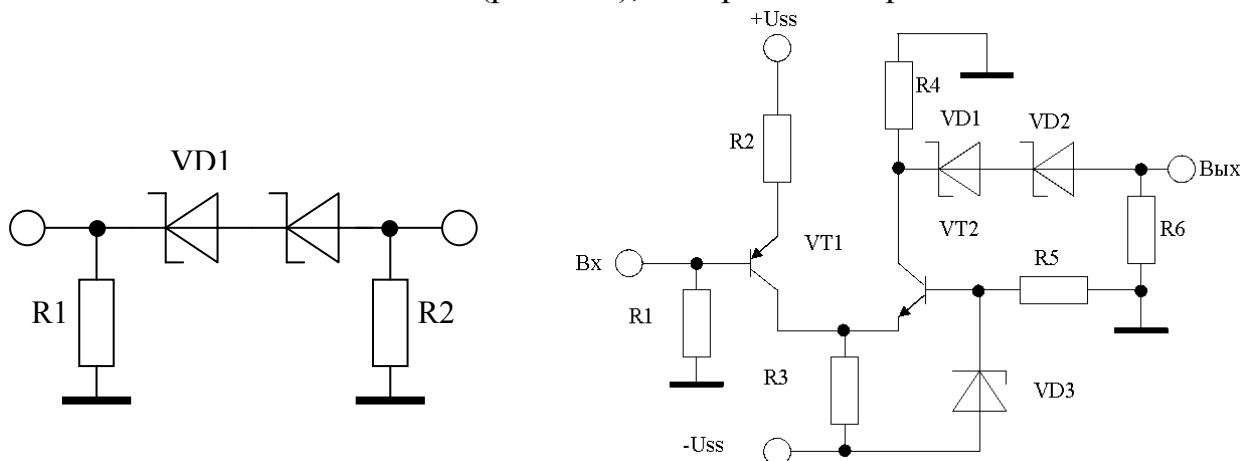
Результаты измерения параметров динамической точности обработки сигнала, в значительной степени зависят от следующих основных условий измерения:

- инвертирующее или неинвертирующее включение ОУ, что определяет форму АЧХ и время фронта импульса выходного напряжения;
- коэффициент усиления ОУ с ТОС с замкнутой цепью ОС определяет как форму АЧХ, так и уровень динамической перегрузки входного каскада, что влияет на время фронта импульса;
- сопротивление и ёмкость нагрузки влияют на форму АЧХ и возможность возникновения нелинейных процессов, связанных с динамической перегрузкой выходного каскада;
- амплитуда входного и выходного сигнала определяет динамический режим работы каскадов ОУ и возможность их перехода в нелинейные режимы;
- значение резистора в цепи обратной связи определяет форму АЧХ ОУ с ТОС при заданном коэффициенте усиления.

Время установления выходного напряжения определяется путем измерения интервала времени от момента подачи на вход микросхемы импульсного перепада напряжения до момента, когда напряжение на выходе микросхемы будет отличаться от установившегося значения на величину не более заданной (0,1% от величины выходного перепада напряжения).

Существует ряд методик для исследования времени установления выходного напряжения ОУ. Наиболее распространённой из них является измерение времени установления в инвертирующем включении ОУ с ТОС, однако в большинстве случаев необходимо проводить измерения и в неинвертирующем включении. Основной проблемой при этом является необходимость формирования плоской вершины импульса, для чего дополнительно в схему измерения вводится формирователь вершины импульса.

Хорошо известным решением проблемы формирования плоской вершины импульса является схема на основе цепочки из последовательно включенных диодов Шоттки (рис. 10а), которая имеет ряд недостатков.



а)

б)

Рис. 10 Варианты схемотехнического решения вводятся формирователей плоской вершины импульса

Решить проблемы простейшего формирователя позволяет схемотехническое решение, представленное на рис. 10б. В этой схеме активный формирователь на транзисторах VT1, VT2 совместно с цепью на диодах Шоттки VD1, VD2 преобразует отрицательный импульс с генератора в импульс с инвертированными перепадами напряжения.

В процессе исследования измерение времени установления выходного напряжения проводилось стробоскопическим методом с помощью импульсного вольтметра В4–24. Измеряемая ИМС включалась в режиме неинвертирующего усилителя напряжения. С выхода усиливается та часть импульсного сигнала, на которой измеряется время установления. На осциллограмме, полученной таким образом определяется интервал времени между началом импульса и последним вхождением в зону где напряжение отклоняется от установившегося значения на величину не более 0,1%.

Измерение уровня гармонических искажений проводилось согласно ГОСТ 19799 (метод 6670). Основной особенностью при этом являлось наличие дополнительных фильтров на входе и выходе. Назначением входного фильтра являлось подавление гармонических искажений в исходном входном сигнале для частоты 20 МГц до уровня не хуже -74 дБ. Выходной фильтр необходим для подавления основной гармоники в спектре выходного сигнала, при этом чрезвычайно важным является этап калибровки выходного фильтра, поскольку именно он в значительной степени определяет погрешность проводимых измерений.

При проектировании топологического решения на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса P35XX основной особенностью была необходимость его выполнения в рамках строго зафиксированного положения элементов ИМС. Для разработки топологического решения использовался комплект фотошаблонов 3513. На его основе за счёт слоя металлизации необходимо было выполнить разводку в соответствии с полученным схемотехническим решением. Разводка металлизации осуществлялась в одном слое. Экстракция паразитных емкостей металлизации позволила выработать требования по корректировке схемотехнического и топологического решений ИМС. В результате было разработано две модификации ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов.

Проектирование топологического решения на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса HJV проводилось в едином цикле с разработкой схемотехнического решения в САПР Cadence. Разводка металлизация проводилась в трёх слоях, что позволило избежать значительных дополнительных паразитных емкостей при реализации пересечений.

Проектирование топологии на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса НJV проводилось в соответствии с принципами унификации и функциональной избыточности. Разработка топологии каждого функционального блока ОУ с ТОС проводилась в отдельности, и на основе разработанных блоков был сформирован унифицированный кристалл, содержащий в своём составе 2 входных буферных усилителя, источник опорного тока, усилительный каскад и выходной буферный усилитель с соответствующими контактными площадками. На основе унифицированного кристалла был разработан ряд ИМС, включающий в свой состав, в том числе три модификации ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов.

Для высокоскоростных ИМС, в частности ОУ с ТОС сверхвысокочастотного диапазона, чрезвычайно важным оказывается учёт паразитных параметров корпуса, поскольку не только каждый вывод корпуса, но и проволоки при помощи которых осуществляется соединение контактной площадки кристалла с траверсом корпуса в области СВЧ представляет собой сложную эквивалентную схему в состав которой входят не только катушки индуктивности и конденсаторы, но и, например, катушки, обладающие взаимной индуктивностью.

Для используемого корпуса 2101.8-7 была разработана модель, которая на этапе проектирования ОУ с ТОС на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса НJV позволила учесть ухудшение устойчивости при размещении кристалла в корпусе и увеличить номинал корректирующей ёмкости, что в дальнейшем было подтверждено результатами измерений.

В четвёртой главе представлена экспериментальная последовательность разработки ОУ с ТОС, приводятся полученные результаты экспериментальных исследований ИМС и результаты исследования зависимостей параметров динамической точности от режимов работы, проводится сопоставление расчётных и экспериментальных результатов.

Реализация ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала была начата на основе первых работ по созданию отечественных ИМС ОУ с ТОС, в ходе которых был разработан шаблон 3513-16. Исследование АЧХ показало, что хотя полоса пропускания ОУ с ТОС на основе шаблона 3513-16 при увеличенном рабочем токе соответствует требованиям, необходимым для получения заданного значения времени установления, но данные образцы имеют устойчивость близкую к критической. Подъём АЧХ составлял 5-8 дБ при $R_f=510$ Ом и $K_u=+2$. Анализ полученных результатов показал, что это обстоятельство в совокупности с перемещением рабочей точки биполярных транзисторов каскадов ОУ в область квазинасыщения, являлось одной из важнейших причин

завышенного времени установления. На рис. 11 представлены экспериментально полученные осциллограммы импульсов выходного напряжения ОУ с ТОС при различных напряжениях питания. Видно, что выход рабочей точки транзисторов из области квазинасыщения происходит при напряжении питания $\pm 8 \div \pm 9$ В. Для исключения этого эффекта при номинальном напряжении питания ± 5 В необходимо изменение режима работы транзисторов усилительного каскада.

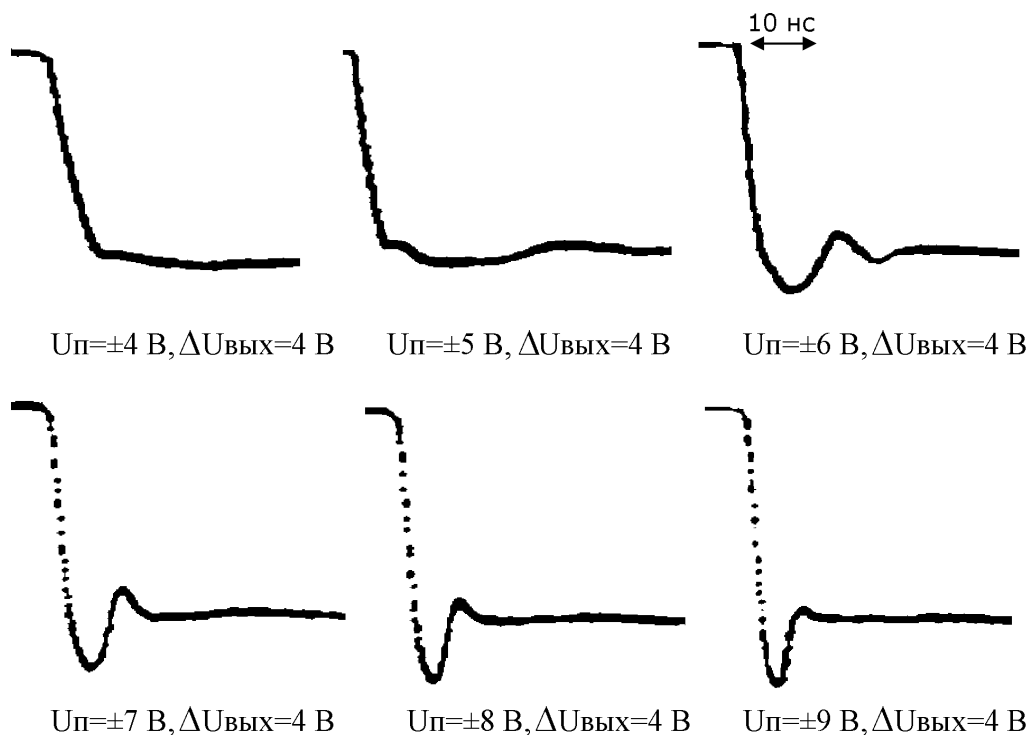


Рис. 11 Осциллограммы импульсов выходного напряжения ОУ с ТОС при различных напряжениях питания

Большое значение для обеспечения динамических параметров ОУ с ТОС и параметров динамической точности обработки сигнала играет выбор коэффициента отражения токов в усилительном каскаде и из усилительного каскада в выходной буферный усилитель. Коэффициент отражения в первую очередь определяется номиналом соответствующих резисторов для р-п-р и п-р-п полярностей схемы. На основе проведённых исследований установлено оптимальное значение коэффициента отражения.

Кроме того, установлено, что важно не только соотношение номиналов резисторов, определяющих коэффициент отражения в усилительном каскаде, но и их номинал. При выборе номинала этих резисторов необходимо руководствоваться двумя соображениями: с одной стороны, снижение номинала приводит к улучшению динамических параметров и параметров динамической точности обработки сигнала, но с другой стороны, снижение номинала приводит к ухудшению ряда статических параметров и увеличению их разброса.

В результате был разработан и изготовлен шаблон 3513-62 в котором были изысканы пути снижения номинала резисторов, что позволило при $I_{\text{пот}}=20$ мА улучшить устойчивость, снизить корректирующую ёмкость и получить $f_{\text{в}}$ до 400 МГц, $V_{\text{вых}}$ до 1600-1900 В/мкс. Кроме этого симметрирование разбаланса емкостей в высокоомной точке усилительного каскада позволило существенно улучшить гармонические искажения при работе на сравнительно высокоомную нагрузку. Так при сопротивлении нагрузки 1 кОм искажения по 2-й гармонике удалось улучшить с -58 -60 дБ до -70 -74 дБ. Искажения по 3-й гармонике, остались практически без изменений, но они в гораздо большей степени поддаются фильтрации.

ОУ с ТОС 1432УД6 и 1432УД8 изготавливаются на основе высоковольтного комплементарного биполярного технологического процесса P35XX на основе комплекта фотошаблонов 3513 с металлизационными стёклами 3513-62-3 и 3513-62-4. В их схемно-топологическом решении были использованы следующие результаты, полученные в диссертации: диагональная разводка металлизации, снижение номиналов резисторов в токовых зеркалах усилительного и выходного каскадов; линеаризующий резистор для снижения модуляции выходного сопротивления, входной каскад с транзисторами на входе и возможностью подстройки напряжения смещения с дискретом 10 мВ, симметрирование разбаланса емкостей в высокоомной точке усилительного каскада.

ОУ с ТОС 1432УД11, 1432УД12, 1432УД15 изготавливаются на основе технологического процесса HJV. В значительной степени в данных ИМС были использованы вышеперечисленные результаты, полученные в диссертации. Для двухканальных ОУ с ТОС (1432УД12) использованы отдельные источники опорного тока. Данные ИМС реализованы на основе комплекта фотошаблонов HJV332, HJV333 и HJV344.

К особенностям схмотехнического решения ИМС ОУ с ТОС 1432УД11, 1432УД12, 1432УД15 можно также отнести, что источник опорного тока данных ИМС построен на основе схемы с компенсацией температурного дрейфа в результате чего общий ток потребления ОУ с ТОС остаётся практически неизменным в диапазоне рабочих температур. При этом малосигнальные динамические параметры (полоса пропускания при $K_u = +1$ и $K_u = +2$) изменяются обратно пропорционально температуре окружающей среды, в то время как скорость нарастания выходного напряжения, характеризующая работу ОУ с ТОС с «большими» сигналами, изменяется слабо. И именно в связи с тем, что основным назначением ОУ с ТОС является обработка «больших» сигналов, предпочтение было отдано источнику опорного тока, обеспечивающему слабое изменение тока потребления ОУ с ТОС в диапазоне рабочих температур.

В источнике опорного тока ИМС ОУ с ТОС 1432УД11, 1432УД12, 1432УД15 не предусмотрены цепи подстройки общего тока потребления, т.к.

он задаётся номиналом поликремниевых резисторов, для которых в технологическом процессе предусмотрен отдельный комплекс технологических операций легирования, что обеспечивает высокую воспроизводимость его номинала. Гарантируемое отклонение не превышает $\pm 10\%$, типовое значение разброса не превышает 2-3 %.

С целью исключения необходимости подстройки напряжения смещения во входном каскаде данных ИМС использована схема, приведённая на рис. 5а, что стало возможным благодаря малым паразитным емкостям транзисторов. Классический входной каскад с транзисторами во входной ступени основе технологии HJV обеспечивает скорость нарастания выходного напряжения более 2500 В/мкс, поэтому и при введении дополнительных транзисторов в диодном включении удалось обеспечить скорость нарастания более 1500 В/мкс.

Частотная коррекция ОУ с ТОС осуществляется интегрирующими конденсаторами в усилительном каскаде, что в сравнении с заземлённым конденсатором, подключаемым в высокоомную точку, обеспечивает большее значение скорости нарастания выходного напряжения, т.к. при этом заданный уровень устойчивости обеспечивается при меньших значениях их номинала.

Ввиду существенно меньших паразитных емкостей транзисторов и слабовыраженного эффекта квазинасыщения при использовании данного конструктивно-технологического базиса не столь значимым оказывается выбор номиналов резисторов усилительного каскада. Коэффициенты отражения токовых зеркал выбраны с такими же соотношениями, как и в случае ОУ с ТОС на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса P35XX.

В выходной буферный усилитель введены дополнительные транзисторы, которые необходимы для устранения пробоя переходов U_{be} основных транзисторов выходного буферного усилителя. Данный эффект при отсутствии этих транзисторов возникает в том случае, когда выходной ток превышает максимальное значение диапазона линейного изменения выходного тока. После их введения этот эффект был исключён, т.к. данные транзисторы являются закрытыми в нормальном режиме работы ОУ и открываются при появлении значительной разности потенциалов между входом и выходом выходного буферного усилителя, тем самым фиксируя напряжение между базой и эмиттером основных транзисторов выходного буферного усилителя. В нормальном режиме работы разность потенциалов между входом и выходом буферного усилителя соответствует его напряжению смещения и является незначительной (единицы-десятки мВ).

Для снижения уровня гармонических искажений, а также в для установления в выходной ступени буферного усилителя оптимального

режимного тока, последовательно с эмиттерами выходных транзисторов подключены поликремниевые низкоомные резисторы

На рис. 12 представлены фотографии топологии кристаллов ИМС ОУ с ТОС 1432УД8, разработанной на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса P35XX, и ИМС ОУ с ТОС 1432УД11 разработанной на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса НJV. Размер кристалла ИМС 1432УД8 составляет 2,4x2,2 мм², а размер кристалла ИМС 1432УД11 составляет 1,6x1,4 мм².

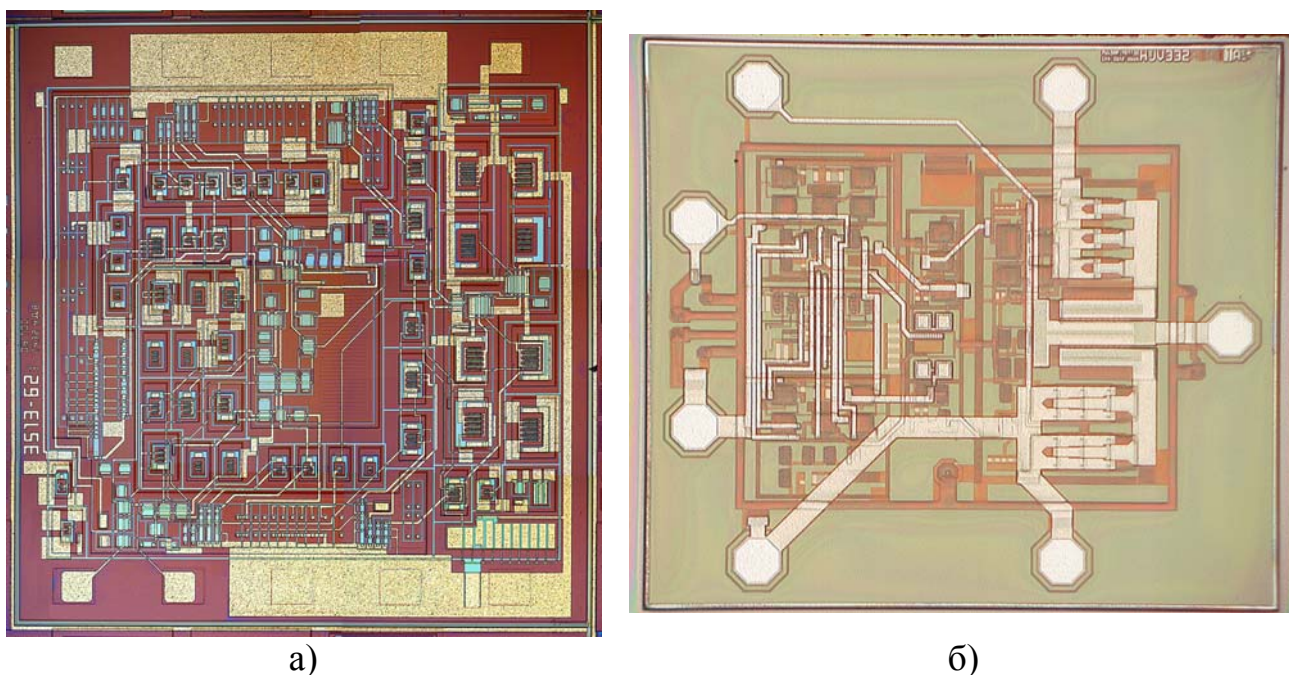


Рис. 12 Фотографии топологии кристаллов ИМС ОУ с ТОС в высоком уровне динамической точности обработки сигнала: а - 1432УД8, б - 1432УД11

Сравнительные характеристики разработанных ИМС ОУ с ТОС представлены в таблице 2 для напряжения питания ± 5 В, $R_H=100$ Ом, $K_u=+2$.

Таблица 2

	1432УД6	1432УД8	1432УД11	1432УД12	1432УД15
Количество каналов, шт.	1	1	1	2	1
Полоса пропускания ($K_u=+1$), МГц	320	400	950	900	370
Полоса пропускания ($K_u=+2$), МГц	235	300	520	500	200
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	700	1600	2000	2000	1200
Время установления (0,1%), нс	15	12	10	12	9
Гармонические искажения на частоте 20 МГц (при $R_H=1$ кОм), дБ	-54 (-61)	-57 (-64)	-63	-63	-55
Коэффициент разделения каналов, дБ	-	-	-	74	-
Напряжение смещения, мВ	± 10	± 10	± 2	± 2	± 2
Ток потребления, мА	10	20	10	10/кан.	2,0

Результаты исследований показали, что реализация требуемых параметров динамической точности обработки сигнала возможна как на

основе процесса P35XX, так и на основе технологического процесса HJV. При использовании технологического процесса HJV удаётся получить значительно меньшее энергопотребление при большем уровне динамических параметров, что позволяет строить ОУ с ТОС не требующих подстройки статических параметров.

При изготовлении ОУ с ТОС на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса HJV удаётся значительно сократить площадь кристалла ИМС.

При использовании технологического процесса HJV появляется возможность создания ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала с уровнем тока потребления 1-3 мА, что является недостижимым при использовании технологического процесса P35XX.

Результаты экспериментального исследования показывают близкое соответствие с расчётными данными, что подтверждает корректность используемой методики проектирования ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала.

Заключение

Основные итоги теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в настоящей работе, заключаются в следующем:

1. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что при использовании комплементарных биполярных технологических процессов с изоляцией обратносмещённым р-п переходом для реализации ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала наиболее целесообразным является использование однокаскадной структуры построения ОУ с ТОС.
2. Проведён анализ и выполнен отбор основных схмотехнических решений пригодных для использования в ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигналов на основе технологических процессов с изоляцией элементов ИМС обратносмещённым р-п переходом.
3. Определены основные требования к схемно-топологическому решению и режимам работы каскадов ОУ с ТОС, как при использовании конструктивно-технологического базиса технологического процесса P35XX, так и конструктивно-технологического базиса технологического процесса HJV.
4. Определены основные режимы включения ОУ с ТОС для исследования параметров динамической точности обработки сигнала, отработаны методики измерения и даны рекомендации по построению отдельных узлов контрольно-измерительных стендов.
5. Дополнена методика проектирования ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала в части учёта топологического решения ИМС и учёта влияния корпуса ИМС на

динамические параметры и параметры динамической точности обработки сигнала, для чего разработана модель отечественного металлокерамического корпуса 2101.8-7 в который собираются кристаллы ИМС.

6. Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы ОУ с ТОС в высоком уровне динамической точности обработки сигнала на основе конструктивно-технологического базиса технологических процессов P35XX и HJV.
7. Положения, составляющие основу методики проектирования ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала, выработанные при использовании технологического процесса P35XX распространяются и на ОУ с ТОС на основе конструктивно-технологического базиса технологического процесса HJV.
8. Результаты диссертационной работы являются внедрёнными в производство, а разработанные ОУ с ТОС с высоким уровнем динамической точности обработки сигнала (1432УД6, 1432УД8, 1432УД11, 1432УД12, 1432УД15), как на основе отечественного, так и на основе зарубежных технологических процессов являются освоенными в серийном производстве с приёмкой категории качества «ВП».

Публикации по теме диссертационной работы

1. Савченко Е.М., Ксенофонтов Д.Л. Оптимизация динамических параметров быстродействующих операционных усилителей. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-практической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2001.
2. Савченко Е.М., Виноградов Р.Н., Ксенофонтов Д.Л., Корнеев С.В. Улучшение статических параметров быстродействующих операционных усилителей с токовой обратной связью. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-практической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2002.
3. Савченко Е.М., Виноградов Р.Н., Ксенофонтов Д.Л., Корнеев С.В. Операционные усилители с токовой обратной связью, предназначенные для работы с 10 разрядными АЦП/ЦАП с частотой дискретизации до 100 МГц. // Труды международного научно-практического семинара «Проблемы современной аналоговой микросхемотехники». – Шахты, 2002.
4. Савченко Е.М., Виноградов Р.Н., Ксенофонтов Д.Л., Корнеев С.В. Монолитные СВЧ операционные усилители. // Материалы международной научно-практической конференции «INTERMATIC-2003». – Москва, 2003
5. Ксенофонтов Д.Л., Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Савченко Е.М. Особенности цепей формирования тестового сигнала при измерении времени установления быстродействующих линейных микросхем. //

- Материалы международной научно-практической конференции «INTERMATIC-2003». – Москва, 2003
6. Корнеев С.В., Савченко Е.М. Вопросы обеспечения устойчивости быстродействующих операционных усилителей. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научной конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2003.
 7. Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Ксенофонтов Д.Л., Савченко Е.М. Архитектура современных быстродействующих операционных усилителей. // Материалы международной научно-технической конференции «Электроника и информатика-2005». – Москва, 2005
 8. Савченко Е.М. Особенности построения выходных каскадов быстродействующих ИМС обработки сигнала с малой потребляемой мощностью. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научной конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2005.
 9. Савченко Е.М., Корнеев С.В., Будяков А.С., Прокопенко Н.Н. Предельные динамические параметры операционных усилителей с обратной связью по напряжению и усилителей с «токовой обратной связью» в линейном и нелинейном режимах. // Электронный журнал «Исследовано в России». – М.: МФТИ, 2006.
 10. Савченко Е.М. Влияние корпуса ИМС на взаимодействие каналов ВЧ операционных усилителей. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-практической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2007.
 11. Савченко Е.М. Анализ методов построения прецизионных операционных усилителей с токовой обратной связью. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-практической конференции – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2007.
 12. Savchenko E.M., Budyakov A.S., Prokopenko N.N.. Generalized Current Feedback Operational Amplifier. Proceeding of the 4-th European Conference on Circuits and Systems for Communications – ECCSC'08 /- Politehnica University, Bucharest, Romania: July 10-11, 2008.- pp.87-90
 13. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Савченко Е.М. Операционные усилители с обобщенной токовой обратной связью. // Проблемы разработки перспективных микро- и нано-электронных систем – 2008. Сборник научных трудов III Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. Академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, 2008.- С. 330-333
 14. Савченко Е.М., Корнеев С.В., Ширяева А.С. Выбор оптимальных параметров температурного дрейфа источника опорного тока операционных усилителей с токовой обратной связью. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008.
 15. Савченко Е.М., Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Ксенофонтов Д.Л., Анохин И.С. Результаты исследования экспериментальных образцов ИМС

- операционных усилителей, изготовленных при взаимодействии с зарубежной foundry-фабрикой. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008.
- 16.Аронов В.Л., Евстигнеев А.А., Романов А.С., Савченко Е.М. Использование возможностей программ инженерных и математических расчётов компании Mathworks при разработке ИЭТ. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008
 - 17.Будяков А.С., Зайцев А.А., Савченко Е.М. Основные подходы к учету параметров влияния параметров корпуса полупроводниковых ИЭТ с использованием современных САПР. // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2008
 - 18.Виноградов Р.Н., Корнеев С.В., Ксенофонтов Д.Л., Савченко Е.М. Широкополосные, быстродействующие аналоговые интегральные микросхемы. // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС - 2008. Омск, ЦКБА, 2008.
 - 19.Савченко Е.М. Перспективы разработки стандартных и специализированных ВЧ и СВЧ ИМС и систем на их основе. // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС - 2008. Омск, ЦКБА, 2008.
 - 20.Savchenko E.M., Budyakov A.S. The specifics of modeling high-speed integrated amplifiers with high amount of feedback. // International Conference “Micro- and nanoelectronics – 2009”, Zvenigorod, Russia.
 - 21.Савченко Е.М. Методы обеспечения высокой динамической точности обработки сигнала в операционных усилителях с токовой обратной связью. Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып. 2, 2009.
 - 22.Васильев А.Г., Дроздов Д.Г., Савченко Е.М. Оптимизация конструкции и технологии изготовления интегральных кремниевых СВЧ диодов Шоттки. // Электроника микро- и нанoeлектроника: материалы научно-технической конференции. – М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2010.

Заказ №_____. Тираж 120 экз. Уч.-изд. л 1,75. Формат 60x48 1/16.
Отпечатано в типографии ФГУП «НПП «Пульсар»
105187, г. Москва ул. Окружной проезд, д.27.
Подписано в печать 03.11.2011 г.