

Анализ устойчивости КМОП дифференциальных усилителей к воздействию накопленной дозы ионизирующих излучений

Д.Ю. Адамов¹, Ю.Ф. Адамов², Е.С. Балака²

¹ООО «Юник Ай Сиз» (г. Москва)

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (г. Москва)

Analysis of Stability of CMOS Differential Amplifiers to Effects of Ionizing Radiation Accumulated Dose

D.Y.Adamov¹, Y.F.Adamov², E.S.Balaka²

¹LLC «Unique ICs», Moscow

²Federal State-Funded Institutions of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences

Проведен сравнительный анализ известных и новых схем КМОП дифференциальных усилителей для моделей КМОП-транзисторов, не подвергавшихся и подвергнутых облучению от источника гамма-квантов с накопленной дозой 1 Мрад. Анализ результатов показал, что наилучшая стойкость наблюдается для асимметричных дифференциальных усилителей с цепями автосмещения статического режима. При этом изменение коэффициента усиления после воздействия излучения менее 5%, синфазное смещение выходного сигнала менее 0,1 В. Такой же результат получен и для симметричных дифференциальных усилителей на основе двух асимметричных усилителей с противофазным подключением входных сигналов и независимой стабилизацией статического режима.

Ключевые слова: радиационная стойкость; модели МОП-транзисторов; дифференциальные усилители.

The comparative analysis of conventional and new CMOS differential amplifier circuits (DA) has been conducted for the models of the CMOS transistors not exposed to the gamma-ray source with a cumulative dose of 1 Mrad. The analysis of results have shown that the best resistance to ionizing radiation (IR) has been observed for asymmetric DA with the self-bias circuits, for which the change of the amplification coefficient after exposure was less than 5%, the in-phase output signal bias was less than 0.1 V and of symmetric DA, built based on two asymmetric amplifiers with the counterphase input signals and independent static mode stabilization.

Keywords: radiation resistance; CMOS transistor models; differential amplifiers.

Введение. Большинство аналоговых устройств содержит каскады на основе дифференциальных усилителей (ДУ) [1, 2]. В электронных системах космических аппаратов используются микросхемы, которые должны иметь стойкость к воздействию ионизирующих излучений (ИИ) с накопленной дозой до 1 Мрад [3]. Стойкость

аналоговых микросхем к ИИ достигается применением комплекса конструктивно-технологических и схемотехнических решений. Конструктивно-технологические решения направлены на стабилизацию параметров элементов микросхемы, а схемотехнические – на компенсацию изменений этих параметров на уровне функциональных блоков [4].

В настоящей работе проводится сравнительный анализ статических характеристик известных и новых схем КМОП ДУ в диапазоне напряжений питания 1,8–3,3 В. Результаты для сравнения получены методом схемотехнического моделирования ДУ с использованием моделей КМОП-транзисторов, подвергнутых облучению от источников гамма-квантов с накопленной дозой 1 Мрад, а также аналогичных моделей КМОП-транзисторов, не подвергнутых облучению.

Для сравнения выбраны физические структуры транзисторов, в которых использованы конструктивно-технологические решения для подавления токов утечки. В моделях МОП-транзисторов воздействия ИИ учитываются путем изменения значений порогового напряжения и поверхностной подвижности неосновных носителей.

Объект исследования. В диапазоне облучения до 1 Мрад основные изменения характеристик ДУ определяются изменением пороговых напряжений МОП-транзисторов. В исследованиях авторов настоящей работы и в литературных источниках [4–6] показано, что изменение порогового напряжения в *p*-МОП- и *n*-МОП-транзисторах имеет отрицательное значение и совпадает по абсолютной величине для приборов, подзатворный окисел которых сформирован в одном процессе. В моделях до облучения пороговое напряжение *n*-МОП-транзисторов составляет 0,4 В, а *p*-МОП-транзисторов равно –0,4 В. В моделях после облучения для *n*-МОП-транзисторов получено значение 0,2 В, а для *p*-МОП-транзисторов соответственно –0,6 В. Для сравнения отобраны известные и новые схемы ДУ. Схемы № 1 (рис.1,а) и № 2 (рис.1,б) не содержат цепей автосмещения, а входной дифференциальный сигнал имеет синфазную составляющую 1 В. Остальные исследуемые схемы ДУ содержат цепи автосмещения входного сигнала и стабилизации статического режима.

Методы исследования. При моделировании переходных характеристик на дифференциальные входы подается серия парафазных импульсов с частотой 100 кГц. Амплитуда входного сигнала ограничена линейным режимом и устанавливается в зависимости от коэффициента усиления ДУ.

Асимметричный ДУ (см. рис.1,а) описан в [6]. При номинальном напряжении питания 3,3 В он характеризуется коэффициентом усиления $K_{yc} = 40$ дБ и сохраняет это значение после воздействия ИИ. Синфазная составляющая смещения выходного сигнала $V_{c.c}$ снижается после облучения с 2,5 до 2,3 В. Снижение напряжения питания до 2,4 В приводит к снижению исходного K_{yc} до 32 дБ и нарушению функционирования ДУ после воздействия ИИ.

Асимметричный ДУ (см. рис.1,б) описан в [6]. При напряжении питания 3,3 В его $K_{yc} = 42$ дБ, а после воздействия ИИ это значение возрастает до 45 дБ. При этом $V_{c.c}$ снижается с 1,55 до 1,25 В. Снижение напряжения питания до 2,4 В приводит к увеличению K_{yc} до 47 дБ без воздействия ИИ и снижению K_{yc} до 43 дБ после воздействия, при этом $V_{c.c}$ снижается с 1,47 до 1,24 В. При напряжении питания 1,8 В коэффициент $K_{yc} = 43$ дБ до облучения и 35 дБ после облучения, при этом $V_{c.c} = 0,96$ В до облучения и 0,76 В после.

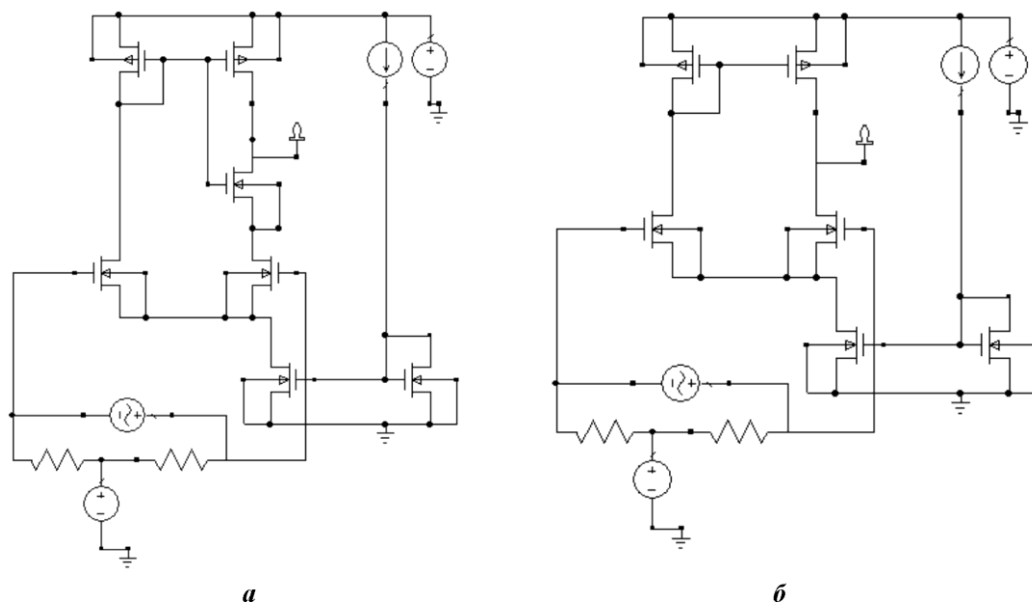


Рис.1. Асимметричный ДУ: а – схема № 1; б – схема № 2

Простой асимметричный ДУ с автосмещением построен всего на шести МОП-транзисторах (рис.2) [7]. При напряжении питания 3,3 В до облучения ДУ характеризуется $K_{yc} = 36$ дБ и $V_{c.c} = 1,7$ В. После облучения значение K_{yc} не меняется, а $V_{c.c}$ снижается на 0,1 В. При снижении напряжения питания до 2,4 В K_{yc} также не меняется после облучения и равен 36 дБ, а значение $V_{c.c} = 1,2$ В, т.е. изменилась примерно на 30 мВ, что существенно меньше технологического разброса этого параметра. При напряжении питания 1,8 В переходные характеристики полностью совпадают для расчетов до и после облучения ДУ: $K_{yc} = 35$ дБ, $V_{c.c} = 0,9$ В.

Существенным недостатком рассмотренных усилительных каскадов является относительно низкий коэффициент усиления, что ограничивает их использование с цепями отрицательной обратной связи.

На основе ДУ с автосмещением предложена схема с дополнительным усилительным каскадом (рис.3), в которой ток выходного каскада непосредственно связан с током входного дифференциального каскада. Эта связь ограничивает фазовый сдвиг выходного сигнала и обеспечивает работу ДУ с отрицательной обратной связью без корректирующих конденсаторов. Моделирование этого ДУ в малосигнальном линейном режиме при напряжении питания 3,3 В показало, что коэффициент усиления совпадает для ис-

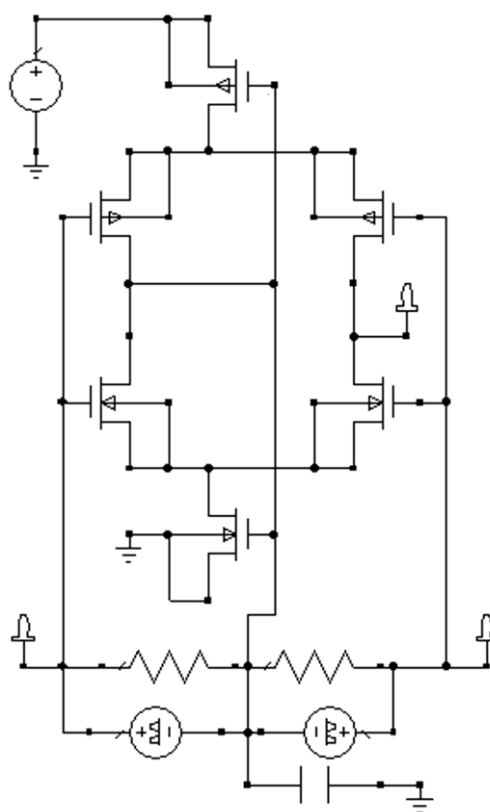


Рис.2. Простой асимметричный ДУ с автосмещением

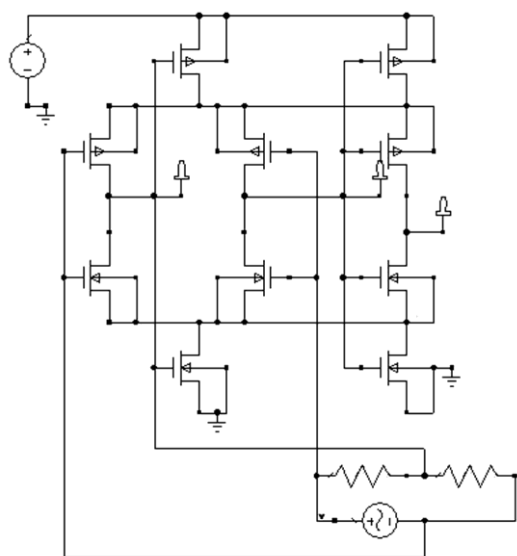


Рис.3. Асимметричный ДУ с автосмещением с дополнительным усилительным каскадом

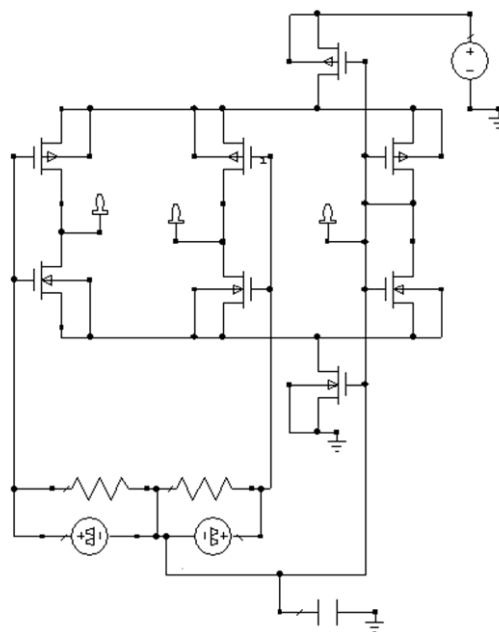


Рис.4. Симметричный ДУ с элементами автосмещения

ходных моделей МОП-транзисторов и для моделей транзисторов, получивших дозу облучения 1 Мрад. Смещение синфазного выходного напряжения $V_{c.c}$ не превышает 0,2 В, значение K_{yc} превышает 67 дБ. При напряжении питания 2,4 В значение $V_{c.c}$ менее 0,1 В, а $K_{yc} = 68$ дБ.

Во многих случаях предпочтение отдается симметричным ДУ с парафазным выходом. Использование парафазного сигнала увеличивает динамический диапазон усилителя до значений, превышающих напряжение питания. Парафазный сигнал более устойчив к импульсным помехам. Последовательное включение нескольких усилительных каскадов проще реализуется для устройств с парафазными выходами.

В цепях автосмещения в симметричных ДУ не могут использоваться входные транзисторы, поэтому в схему вводятся дополнительные элементы, увеличивающие сложность и размеры устройства. Примером симметричного ДУ с элементами автосмещения служит схема с опорным эквивалентом входной цепи (рис.4).

При напряжении питания 3,3 В значение $K_{yc} = 36$ дБ для ДУ на основе исходной модели транзисторов. Для моделей транзисторов после облучения $K_{yc} = 34$ дБ, а $V_{c.c} = -200$ мВ. Недосток такого решения – понижение коэффициента усиления и увеличение значения синфазного смещения сигнала после облучения.

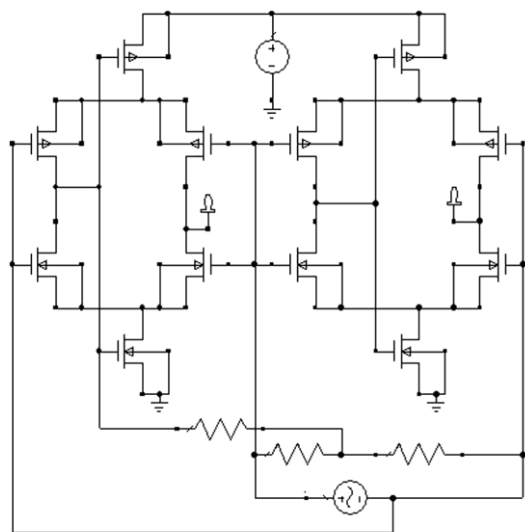


Рис.5. Радиационно стойкий симметричный ДУ

Очевидный вариант построения радиационно стойкого симметричного ДУ – это использование двух идентичных асимметричных ДУ с противофазным подключением входных сигналов (рис.5). Эта схема характеризуется стабильно высоким значением $K_{ус}$ в пределах от 42 до 41,5 дБ в диапазоне напряжений питания 3,3–1,8 В как для исходных, так и для облученных транзисторов. Изменение $V_{с.с}$ после облучения не превышает 0,2 В при напряжениях питания 3,3 и 0,1 В при напряжениях питания 2,4 и 1,8 В.

Результаты моделирования сведены в таблицу.

Основные параметры КМОП ДУ в диапазоне напряжений питания до и после воздействия ИИ

Параметр усилителя	ДУ					
	Асимметричный		Простой асимметричный с авто-смещением (см. рис.2)	Асимметричный с авто-смещением с дополнительным каскадом (см. рис.3)	Симметричный с элементами автосмещения (см. рис.4)	Радиационно стойкий симметричный (см. рис.5)
	Схема №1 (см. рис.1,а)	Схема №2 (см. рис.1,б)				
Напряжение питания 3,3 В						
$K_{ус}$, дБ до облучения	40	42	36	67	36	42
$K_{ус}$, дБ после облучения	40	45	36	67	34	42
$V_{с.с}$, В до облучения	2,5	1,55	1,7	1,5	1,65	1,6
$V_{с.с}$, В после облучения	2,3	1,25	1,6	1,3	1,45	1,4
Напряжение питания 2,4 В						
$K_{ус}$, дБ до облучения	32	47	36	68	36	42
$K_{ус}$, дБ после облучения	0	43	36	68	30	41,5
$V_{с.с}$, В до облучения	1,3	1,47	1,2	1,2	1,25	1,25
$V_{с.с}$, В после облучения	-	1,24	1,17	1,15	1,15	1,15
Напряжение питания 1,8 В						
$K_{ус}$, дБ до облучения	20	43	35	58	30	42
$K_{ус}$, дБ после облучения	-	35	35	56	30	41,5
$V_{с.с}$, В до облучения	0,9	0,96	0,90	0,90	0,90	0,90
$V_{с.с}$, В после облучения	-	0,76	0,90	0,90	0,85	0,90

Заключение. Проведенный анализ показал, что схемотехнические средства моделирования позволяют качественно повысить стойкость КМОП ДУ к накопленной дозе ИИ. Схемотехнические решения не могут обеспечить исключение токов утечки, поэтому они должны применяться совместно с комплексом известных конструктивно-технологических решений [8, 9].

Основой стабилизации статических и низкочастотных характеристик КМОП ДУ является использование асимметричных структур ДУ с цепями автосмещения. На основе асимметричных ДУ реализуются симметричные ДУ с парафазным выходным сигналом, не уступающие по усилению и по радиационной стойкости асимметричным ДУ.

Предложенные новые схемотехнические решения для повышения коэффициента усиления КМОП ДУ позволяют использовать их как операционные усилители и компараторы. Достижение полной компенсации изменений коэффициента усиления КМОП ДУ требует увеличения числа транзисторов в схеме на 30–40 % для создания цепей автосмещения статического режима. При этом коэффициент усиления стабилизируется в диапазоне напряжений питания и при воздействии ИИ в диапазоне накопленной дозы до 1 Мрад.

Литература

1. Цумбален Х. Линейные схемы: руководство по проектированию. – М.: Техносфера, 2011. – 1127 с.
2. Корис Р., Шмидт-Вальтер Х. Справочник инженера схемотехника. – М.: Техносфера, 2008. – 607 с.
3. Белоус А., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника: в 2 т. – М.: Техносфера, 2015. – 472 с.
4. Исследование радиационно-стойкой элементной базы КМОП СБИС на КНИ подложках / А.И. Демченко, В.С. Сякерский, С.В. Шведов и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы XIX Междунар. Крымской конф. (Севастополь, 14–18 сентября 2009 г.). – Севастополь: Вебер, 2009. – Т. 2. – С. 728 – 729.
5. Титов А.И., Шелепин Н.А., Селецкий А.В. Исследование и разработка структур экстракции параметров моделей схемотехнического учета дозовых радиационных эффектов субмикронных СБИС // VI Всероссийская науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2014»: сб. науч. тр. Часть III / Под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. – С. 149 – 154.
6. Стемпковский А.Л., Михеев Р.С., Адамов Ю.Ф. КМОП-дифференциальный усилитель с повышенным коэффициентом усиления // Патент РФ № 132651. 2012.
7. Кобзев Ю.М., Эннс В.И. Проектирование аналоговых КМОП-микросхем: краткий справочник разработчика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2005. – 456 с.
8. Попо Р. Проектирование и изготовление радиационностойкой электронной техники. – Lambert Academic Publishing, 2012. – 436 с.
9. Дворников О.В. Комплексный подход к проектированию радиационностойких аналоговых микросхем: презентация // Всероссийская науч.-техн. конф. «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем» (МЭС–2010): сб. тр. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С.301–307.

Статья поступила
11 декабря 2015 г.

Адамов Денис Юрьевич – кандидат технических наук, директор ООО «Юник Ай Сиз» (г. Москва). *Область научных интересов:* перспективные системы специального назначения.

Адамов Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИППМ РАН. *Область научных интересов:* схемотехника и конструирование интегральных микросхем. **E-mail:** adamov@ippm.ru

Балака Екатерина Станиславовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИППИМ РАН. *Область научных интересов:* схемотехника и проектирование цифровых схем, высокопроизводительные вычислительные системы, сбоеустойчивые вычисления.



Издательско-полиграфический комплекс
Национального исследовательского университета «МИЭТ»
информирует



Вышло в свет учебное пособие

Джиган В.И.

**Адаптивные алгоритмы и устройства радиотехнических систем:
учеб. пособие. - М.: МИЭТ, 2016. - 104 с.: ил.**



ISBN 978-5-7256-0834-2

Рассматриваются классификация и структуры адаптивных фильтров, теоретические основы адаптивной фильтрации сигналов, вычислительные процедуры и свойства основных разновидностей адаптивных алгоритмов: Ньютона, наискорейшего спуска, по критерию наименьшего квадрата и рекурсивному критерию наименьших квадратов. Приводятся примеры применения адаптивных фильтров в радиотехнических системах.

Для аспирантов и магистрантов факультета МП и ТК НИУ МИЭТ, изучающих дисциплины «Адаптивные алгоритмы и устройства радиотехнических систем» и «Адаптивная обработка сигналов в радиотехнических системах».