

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ АНАЛОГОВЫЕ МИКРОСХЕМЫ ДЛЯ ДАТЧИКОВ

Дворников О.В.¹, Дятлов В.Л.¹, Чеховский В.А.², Старченко Е.И.³

¹ Минский научно-исследовательский приборостроительный институт, г. Минск, Республика Беларусь

² Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий Белорусского государственного университета, г. Минск, Республика Беларусь

³ Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты, Российская Федерация

Рассмотрены проблемы создания специализированных аналоговых микросхем для применения в датчиках. Для обеспечения экономической эффективности при небольших объемах выпуска предложено изготовление радиационно-стойких микросхем осуществлять на базовых структурных кристаллах (БСК). Описан подход к проектированию микросхем, включающий: рекомендации по выбору номенклатуры и количества аналоговых компонентов БСК, типов применяемых активных и пассивных элементов; схемотехнические решения аналоговых компонентов с программируемыми параметрами и малой чувствительностью к воздействию проникающей радиации. (E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)

Ключевые слова: датчики, аналоговая интегральная микросхема, радиационная стойкость.

Введение

Для производства аппаратуры, содержащей датчики, обычно необходима широкая номенклатура аналоговых устройств, оптимизированных для работы с различными чувствительными элементами [1]. В ряде случаев, например в космической и военной промышленности, ядерной энергетике, аппаратура должна удовлетворять взаимоисключающим требованиям по уровню технических и экономических характеристик, в том числе обеспечивать высокую надежность, низкую стоимость при малых объемах изготавливаемой продукции, сохранение основных электрических параметров при воздействии проникающей радиации. Так, увеличение надежности часто достигается при замене большого количества радиоэлектронных изделий специализированными интегральными микросхемами (ИС) высокой степени интеграции, значительное повышение радиационной стойкости ИС возможно за счет применения специальных технологических маршрутов [2]. При этом стоимость разработки и серийного изготовления специализированных микросхем возрастает настолько, что их применение в аппаратуре становится экономически неприемлемым.

Проведенный нами анализ позволил установить, что реализация радиационно-стойких аналоговых устройств для датчиков целесооб-

разна на базовых матричных (БМК) и базовых структурных (БСК) кристаллах [3]. Проектирование микросхем на БМК подробно рассмотрено в ряде работ [4–6]. Специализацию (программирование) БМК осуществляют путем формирования межсоединений на ранее изготовленных полупроводниковых пластинах с размещенными активными и пассивными элементами. Межсоединения формируются на предприятии – изготовителе микросхем, а разработка осуществляется на уровне элементов, что увеличивает сроки создания специализированной микросхемы и не исключает вероятность ошибок, невыполнения требований технического задания по уровню параметров и радиационной стойкости.

В отличие от БМК структурные кристаллы содержат как набор полностью сформированных аналоговых компонентов (операционных усилителей (ОУ), компараторов напряжения и др.), так и активные и пассивные элементы, несоединенные между собой. Программирование происходит на предприятии – изготовителе микросхем путем соединения известных компонентов и элементов. Наличие сертифицированных, в том числе по стойкости к радиационному воздействию, аналоговых компонентов существенно снижает «риск» проектирования, а временные и материальные затраты на создание нового изделия меньше, чем при использовании БМК. Однако для применения структур-

ных микросхем необходимо предварительно разработать, изготовить и экспериментально апробировать необходимые аналоговые компоненты, которые должны быть максимально универсальными и позволять программировать выполняемые аналоговые функции и основные электрические параметры путем формирования различных межсоединений, ранее сформированных на пластине элементов и компонентов.

Целью настоящей статьи являлось рассмотрение разработанного подхода к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем, выполняющих предварительную обработку сигналов чувствительных элементов датчиков.

Подход к проектированию специализированных аналоговых микросхем

В зависимости от внутреннего импеданса и схемы включения для предварительной (аналоговой) обработки сигналов чувствительных элементов датчиков применяют зарядочувствительные (ЗЧУ), трансрезистивные (ТРУ), инвертирующие, инструментальные (ИУ) усилители с разным коэффициентом преобразования и полосою пропускания [3].

Нами ранее создана универсальная аналоговая микросхема [3], состоящая из ИУ, двух предусилителей на ОУ с головными $n-p-n$ биполярными транзисторами (БТ) и компенсацией входного тока, двух предусилителей на инвертирующих усилителях напряжения с «головными» полевыми транзисторами с $p-n$ переходом и каналом p -типа (p -ПТП). Экспериментальная апробация показала, что разработанная микросхема позволяет реализовать необходимые для датчиков аналоговые устройства с высоким уровнем параметров, но применение горизонтальных $p-n-p$ транзисторов ухудшает радиационную стойкость, номенклатура и количество выбранных аналоговых компонентов являются избыточными, а для питания мостовых схем необходим источник опорного напряжения (ИОН) с высокой нагрузочной способностью.

С учетом указанного, а также имеющегося опыта по проектированию радиационно-стойких ИС [7–9] был выработан подход к проектированию специализированных аналоговых микросхем для аппаратуры, содержащей датчики:

– реализация требуемых аналоговых функций и параметров целесообразна с использованием БСК, содержащего следующие компоненты и элементы: радиационно-стойкие ОУ, повторители напряжения

с входными p -ПТП и высокой нагрузочной способностью, источники опорного напряжения, наборы (магазины) резисторов и МОП-конденсаторов;

– во всех аналоговых компонентах необходимо применять только p -ПТП и $n-p-n$ транзисторы, использование горизонтальных $p-n-p$ БТ не допускается;

– количество необходимых компонентов зависит от требований, предъявляемых в конкретной аппаратуре, однако для БСК число ОУ должно быть не менее 5 (два для построения ЗЧУ или ТРУ, три – для ИУ), повторителей напряжения – 3, ИОН – 2;

– аналоговые компоненты должны допускать изменение формы амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик, а также нагрузочной способности путем подключения разных RC -элементов из расположенных на кристалле магазинов;

– необходимо обеспечить работоспособность последовательного соединения ОУ и повторителя напряжения для получения ОУ с высоким входным импедансом (повторитель расположен перед ОУ) и ОУ с увеличенной нагрузочной способностью (повторитель – после ОУ).

Особенности схемотехники и параметров аналоговых компонентов

Отказ от применения $p-n-p$ транзисторов значительно усложнил схемотехнический синтез, так как затруднил реализацию повторителей тока («токовых зеркал») и двухтактных усилительных каскадов, а также заставил принять особые меры для уменьшения влияния на основные характеристики аналоговых компонентов допустимого технологического разброса параметров ПТП.

Разработанные для базового матричного кристалла «АБМК_1_3» схемы ОУ, повторителя напряжения и ИОН показаны на рисунках 1–3. Реализация первых образцов аналоговых компонентов БСК на «АБМК_1_3» обусловлена экономическими соображениями. В дальнейшем все компоненты планируется перепроектировать для уменьшения занимаемой площади на кристалле и увеличения надежности и изготовить в виде заказной микросхемы БСК.

Электрические схемы на приведенных рисунках отражают специфику проектирования микросхем на «АБМК_1_3» [10]:

– необходимая величина сопротивления получена с помощью последовательно-парал-

лельного соединения резисторов, уомощнение транзисторов (увеличение допустимого рабочего тока) осуществляется за счет параллельного соедииение однотипных транзисторов;

– условные графические обозначения транзисторов включают наименование элементов «АБМК_1_3» (в качестве *n-p-n* транзисторов применяются элементы *GC1E* с минимальной площадью эмиттерного перехода, *2GC* – с удвоенной минимальной площадью эмиттерного перехода, *PAD2Q* – мощный БТ, в качестве малошумящего *p*-ПТП – элемент *PADJ*) [10];

– в обозначении резисторов отражено сопротивление, которое реализуется при определенном соединении расположенных на кристалле базовых резисторов фиксированной величины, равной 650 Ом, 1250 Ом, 5,8 кОм, 9,2 кОм. Так, резистор *R1_1* на рисунке 1 обозначен как *3R 258*. Это означает, что он образован тремя параллельно соединенными между собой резисторами с результирующим сопротивлением 258 Ом, то есть $3R\ 258 = 650 \parallel 650 \parallel 1250$;

– в некоторых местах для упрощения схемы приведено суммарное сопротивление цепочки резисторов. Например, $R3 = 108,6\text{ кОм}$ (рисунок 1) – сопротивление цепи из 4 последовательно соединенных резисторов $2R\ 15\text{ кОм}$ и 6 резисторов $R\ 8,1\text{ кОм}$.

Особенностями ОУ, показанного на рисунке 1, являются:

- отсутствие источника тока во входном дифференциальном каскаде (*Q3*, *Q7*);
- применение каскада с активной нагрузкой на *p*-ПТП (*Q12*, *Q14*);
- использование параллельного высококачественного канала (*Q1*, *R1*, *R2* и *C1*) и выходного каскада на *n-p-n* транзисторах (*Q15*, *Q17*) для увеличения полосы пропускания и скорости изменения выходного напряжения.

Многовариантное схемотехническое моделирование и параметрическая оптимизация позволили выбрать типы применяемых активных элементов «АБМК_1_3» (*GC1E*, *2GC*, *PADJ*) и режимы их работы, обеспечивающие незначительное изменение коэффициента усиления (менее 13 %) и напряжения смещения нуля (от минус 0,799 до 2,899 мВ) при разбросе напряжения отсечки *p*-ПТП от 1,5 до 2,4 В, что обычно допустимо при реализации аналоговых устройств на ОУ. Кроме того, результаты моделирования, приведенные в таблице 1, подтверждают высокую радиационную стойкость разработанного ОУ. Схемотехническое моделирование выполнялось в системе проектирования *OrCAD* с использованием моделей активных и пассивных элементов, отражающих изменение параметров при воздействии проникающей радиации [11].

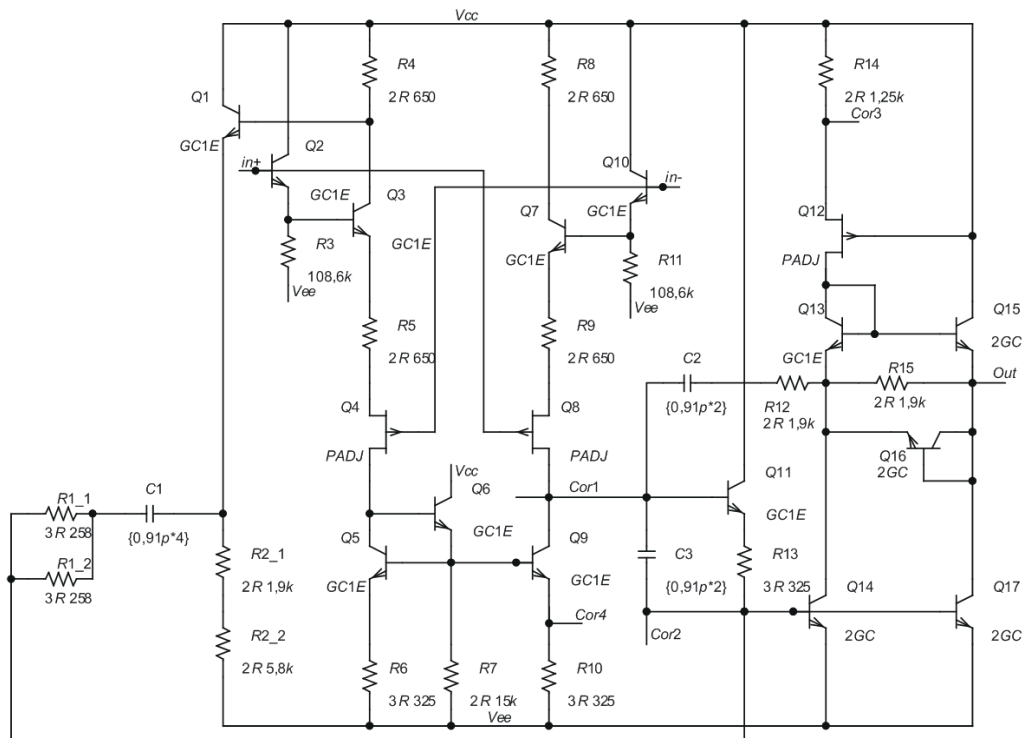


Рисунок 1 – Схема операционного усилителя

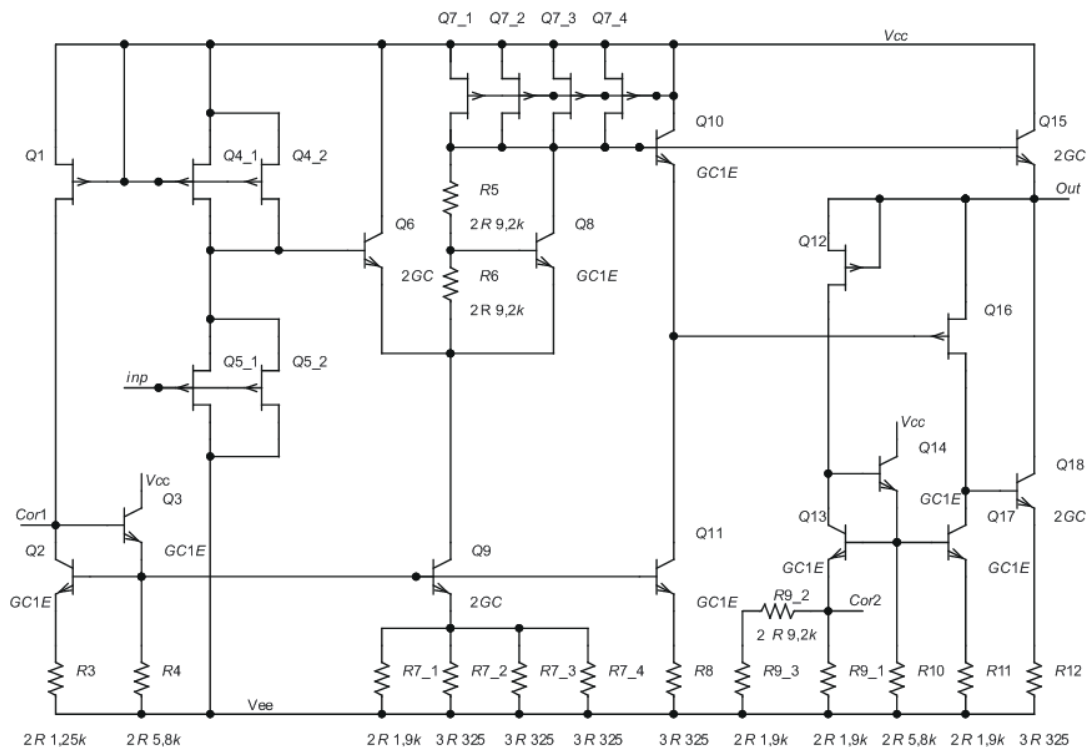


Рисунок 2 – Схема повторителя напряжения

Таблица 1 – Основные параметры операционного усилителя при сопротивлении нагрузки 2 кОм и напряжении питания, равном ±5,0 В

Параметр	Результаты моделирования	
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	5,3	
Допустимое выходное напряжение, В	от -4,7 до 3,3	
Полоса пропускания при единичном усилении, МГц	259,4	
Запас фазы при единичном усилении, градусов	51,5	
Скорость нарастания (спада) выходного напряжения, В/мкс:	252 (339)	
Среднеквадратическое значение шума, приведенное к входу, мкВ		
в полосе частот до 1 МГц	7,48	
в полосе частот до 10 МГц	24,22	
в полосе частот до 100 МГц	188,22	
Входной ток, мкА	в нормальных условиях	0,55
	при воздействии потока нейтронов 10^{14} см^{-2}	0,91
Напряжение смещения нуля, мВ	в нормальных условиях	-1,466
	при воздействии потока нейтронов 10^{14} см^{-2}	-1,235
Коэффициент усиления	в нормальных условиях	46480
	при воздействии потока нейтронов 10^{14} см^{-2}	28890

Схема ИОН со следящей обратной связью на БТ и ПТП (рисунок 3) предложена и подробно рассмотрена в [12]. Она характеризуется высокой нагрузочной способностью и слабой зависимостью выходного напряжения

от напряжения питания из-за существенно большего выходного малосигнального сопротивления *p*-ПТП по сравнению с горизонтальным *p-n-p* транзистором (для элементов «АБМК_1_3» в 6,7 раза) и стабилизации по-

тенциала стока $Q4$ и коллектора $Q6$. ИОН чувствителен к разбросу напряжения отсечки p -ПТП, однако различие выходного напряжения компенсируется при изменении сопротивления резистора $R5$ на рисунке 3 в диапазоне от 2,5 до 5,0 кОм.

В таблице 2 приведены результаты моделирования разработанного ИОН, которые подтверждают возможность достижения предельно малого изменения параметров правильным выбором сопротивления резисторов. В то же время очевидно, что существующий технологический разброс параметров делает необходи-

мым подстройку сопротивлений резисторов на полупроводниковой пластине или, что не всегда возможно, применение внешних подстроечных резисторов с температурным коэффициентом сопротивления, идентичным полупроводниковым резисторам.

Разработанный повторитель напряжения (рисунок 2) включает истоковый повторитель на p -ПТП ($Q5, Q4$), эмиттерный повторитель ($Q6, Q9$), каскад сдвига уровня ($Q8, R5, R6$) и двухтактный выходной каскад на n - p - n и p -ПТП. Основные результаты моделирования повторителя показаны в таблице 3.

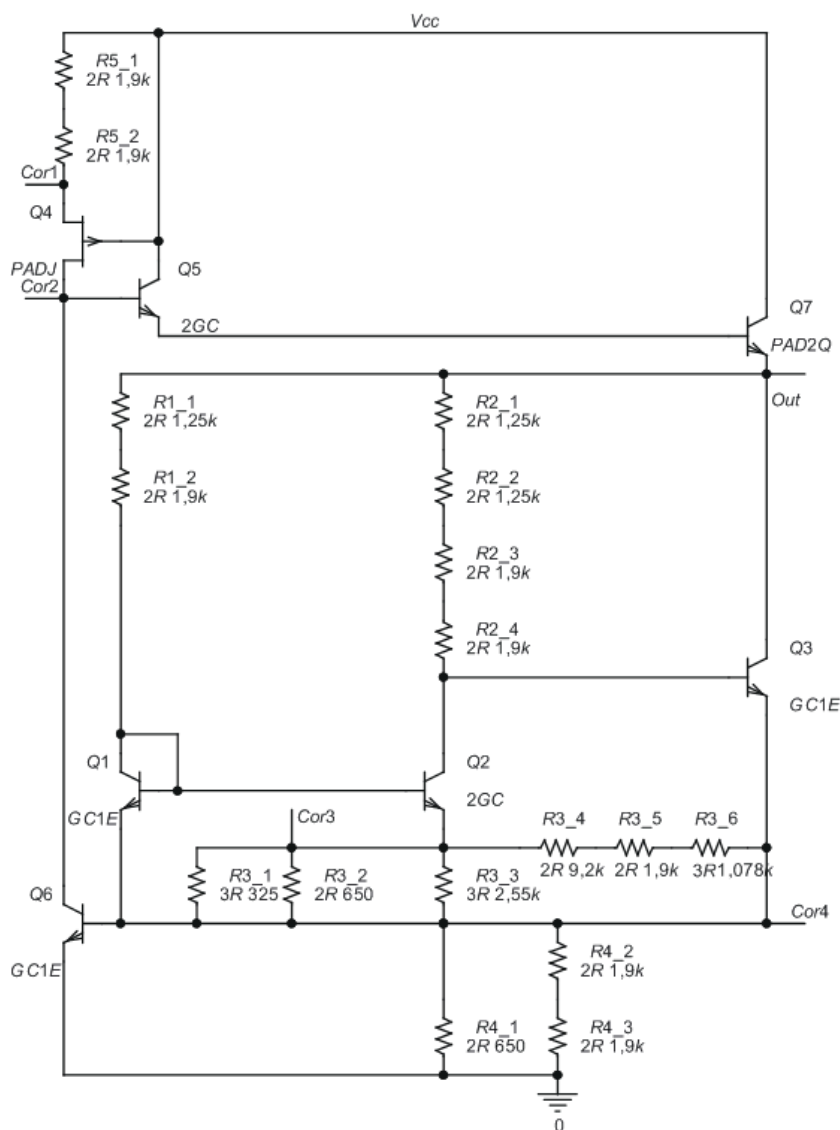


Рисунок 3 – Схема источника опорного напряжения

Средства измерений

Таблица 2 – Основные параметры источника опорного напряжения при напряжении питания, равном 8 В, и сопротивлении нагрузки 150 Ом

Наименование параметра	Результаты моделирования
Номинальное выходное напряжение при температуре, равной 27 °С, В	2,955
Разность выходных напряжений при температурах, равных минус 60 и 125 °С, мВ	0,318
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения в температурном диапазоне от минус 60 до 125°С, мВ	-3,559 +11,185
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при изменении напряжения питания в диапазоне $\pm 0,5$ В, мВ	$\pm 0,046$
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при допустимом разбросе параметров <i>n-p-n</i> транзисторов, мВ	-20,102 +31,173
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при допустимом разбросе сопротивлений резисторов, мВ	-19,517 +23,392
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при воздействии потока нейтронов 10^{13} см^{-2} (10^{14} см^{-2}), мВ	5,099 (47,586)
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при поглощенной дозе гамма облучения 500 кРад (1 Мрад), мВ	8,080 (25,264)
Среднеквадратическое значение выходного шума, мВ	1,277

Таблица 3 – Основные параметры повторителя напряжения при сопротивлении нагрузки 2 кОм и напряжении питания, равном $\pm 5,0$ В

Параметр	Результаты моделирования	
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	5,2	
Максимальное входное напряжение для коэффициента передачи более 0,9, В	$\pm 2,4$	
Максимальное входное напряжение для коэффициента передачи более 0,5, В	от минус 3,4 до 4,1	
Скорость нарастания (спада) выходного напряжения, В/мкс	358 (521)	
Среднеквадратическое значение выходного шума, мВ	0,258	
Максимальный входной ток в нормальных условиях, пА	1,000	
Напряжение смещения нуля, мВ	в нормальных условиях	-0,191
	при воздействии потока нейтронов 10^{14} см^{-2}	17,050
Коэффициент передачи	в нормальных условиях	0,950
	при воздействии потока нейтронов 10^{14} см^{-2}	0,945

Все разработанные аналоговые компоненты позволяют программировать основные параметры. Так, в операционном усилителе:

– резистор R_{COR3} , включенный между узлами $COR3$ и V_{CC} , позволяет увеличить коэффициент усиления ОУ при обработке отрицательной полуволны выходного напряжения (вытекающий ток из нагрузки) и низкоомной внешней нагрузке (рисунок 4) за счет увеличения тока потребления в режиме холостого хода;

– конденсатор C_{COR12} (между $COR1$ и $COR2$) изменяет форму выходного импульса (рисунок 5), АЧХ и ФЧХ;

– резистор R_{COR4} (между $COR4$ и V_{EE}/V_{CC}) регулирует напряжение смещения нуля (V_{OFF}). ОУ при схемотехническом моделировании был сбалансирован выбором сопротивления резистора $R10$ и его $V_{OFF} = -1,455$ мВ. Уменьшение сопротивления $R10$ за счет параллельного включения R_{COR4} позволяет плавно увеличить V_{OFF} до 21 мВ. Если из-за разброса параметров

элементов напряжение смещения нуля ОУ имеет положительное значение, то для его минимизации целесообразно подсоединить большое сопротивление (около 300 кОм) между узлами $COR4$ и V_{CC} и, таким образом, сдвинуть величину V_{OFF} в отрицательную область значений, а затем, подсоединяя R_{COR4} между $COR4$ и V_{EE} , обеспечить $V_{OFF} \approx 0$.

Для источника опорного напряжения:

– резистор R_{COR34} (между $COR3$ и $COR4$) изменяет разность выходных напряжений при крайних рабочих температурах;

– резистор R_{COR1} (между $COR1$ и «землей»/ V_{CC}) позволяет минимизировать зависи-

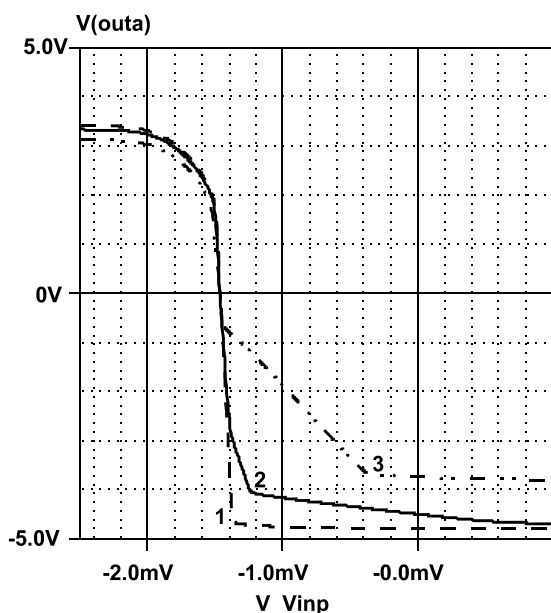
мость выходного напряжения от напряжения питания V_{CC} ;

– конденсатор между $COR2$ и «землей» (любым источником постоянного напряжения) уменьшает уровень выходных шумов.

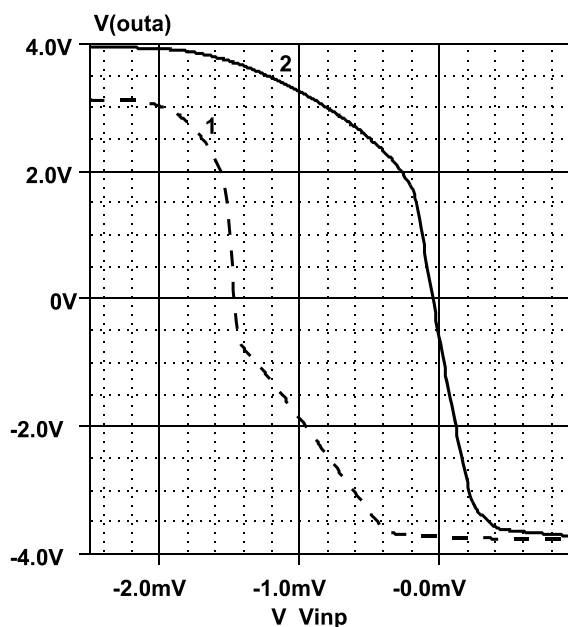
Для повторителя напряжения:

– резистор R_{COR1} (между $COR1$ и V_{CC}) позволяет увеличить скорость спада выходного напряжения (рисунок 6). Так, для внешней нагрузки, равной 500 Ом, скорость спада выходного напряжения растет от 243 В/мкс до 573 В/мкс;

– резистор R_{COR2} (между $COR2$ и V_{EE}/V_{CC}) изменяет напряжение смещения нуля от минус 63 до 69,5 мВ.



а



б

Рисунок 4 – Зависимость выходного напряжения от входного для операционного усилителя с разомкнутой цепью обратной связи: а – при различном сопротивлении нагрузки (кривая 1 соответствует сопротивлению нагрузки 10 кОм, 2 – 2 кОм, 3 – 500 Ом); б – при сопротивлении нагрузки 500 Ом и различных номиналах корректирующих резисторов R_{COR3} (кривая 1 – без R_{COR3} , 2 – $R_{COR3} = 100$ Ом)

Схематехническое моделирование также подтвердило работоспособность последовательного соединения ОУ и повторителя напряжения. Когда выход повторителя соединен с входом ОУ, то полученное соединение эквивалентно ОУ с высоким входным импедансом, частотой единичного усиления,

равной 60 МГц, и запасом фазы на частоте единичного усиления около 61°. Соединение выхода ОУ с входом повторителя напряжения позволяет увеличить нагрузочную способность и уменьшить отрицательный выброс на фронте спада выходного напряжения (рисунок 7).

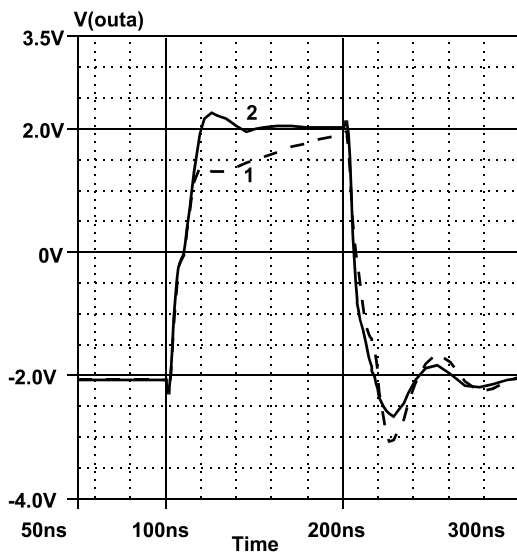
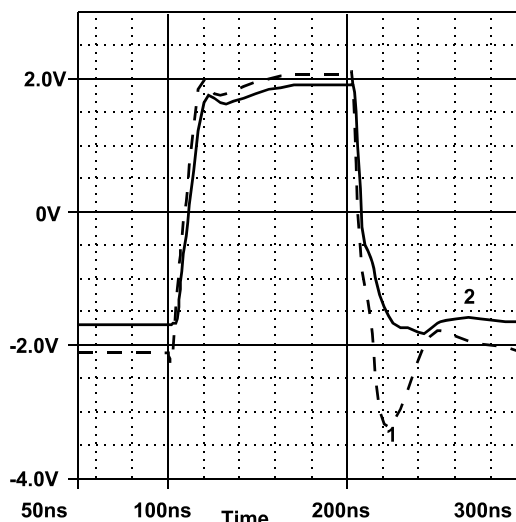


Рисунок 5 – Выходной сигнал операционного усилителя, включенного в режиме неинвертирующего повторителя напряжения, при сопротивлении внешней нагрузки 500 Ом и различных емкостях корректирующих конденсаторов C_{COR12} . Кривая 1 – без C_{COR12} , 2 – $C_{COR12} = 1$ пФ



а

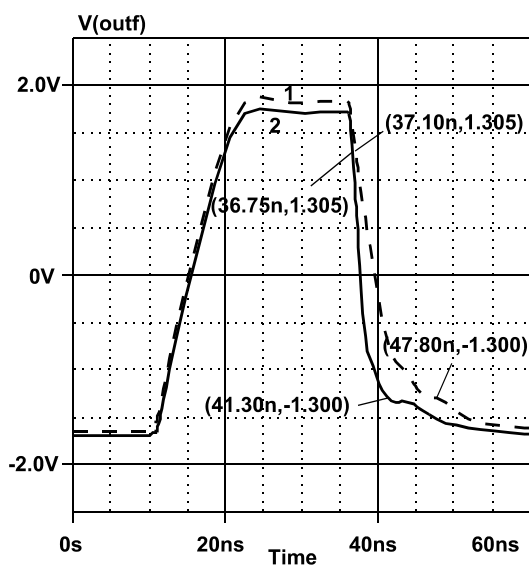
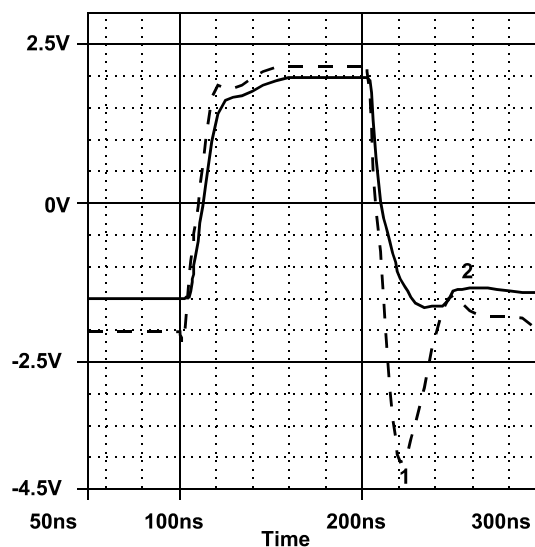


Рисунок 6 – Выходной сигнал повторителя напряжения при сопротивлении внешней нагрузки 500 Ом и различных номиналах корректирующих резисторов R_{COR1} . Кривая 1 – без R_{COR1} , 2 – $R_{COR1} = 50$ кОм



б

Рисунок 7 – Выходной сигнал операционного усилителя, включенного в режиме неинвертирующего повторителя напряжения (кривая 1), и повторителя напряжения, соединенного с выходом операционного усилителя, (кривая 2) при сопротивлении нагрузки 500 Ом: а – в нормальных условиях, б – после воздействия потока нейтронов 10^{14} см^{-2}

Заключение

Сформулирован новый подход к созданию радиационно-стойких аналоговых микросхем для датчиков, заключающийся в изготовлении микросхем на базовом структурном кристалле, содержащем полностью сформированные аналоговые компоненты определенной номенклатуры и количества, а также магазины резисторов и МОП-конденсаторов, причем получение требуемых аналоговых функций и параметров осуществляется путем различного соединения аналоговых компонентов и подключения *RS*-элементов из расположенных на кристалле магазинов. Использование в базовом структурном кристалле аналоговых компонентов, испытанных на стойкость к радиационному воздействию, существенно уменьшает время проектирования и сертификации радиационно-стойких аналоговых микросхем.

Для реализации подхода разработаны новые схемы операционного усилителя и источника опорного напряжения и модифицирован повторитель напряжения с высоким входным импедансом. Все аналоговые компоненты синтезированы только на *n-p-n* транзисторах и полевых транзисторах с *p-n* переходом, что значительно уменьшает изменение их параметров при радиационном облучении. Другой особенностью разработанных компонентов является возможность программирования полосы пропускания, скорости нарастания выходного напряжения, нагрузочной способности для оптимизации отношения быстродействие / потребляемая мощность.

Список использованных источников

1. Мокров, Е. Состояние, проблемы и пути развития датчикоостроения на 2006–2015 гг. / Е. Мокров // Электронные компоненты. – 2007. – № 3. – С. 64–71.
2. Стещенко, В. Разработка и производство специализированной ЭКБ для космических применений: текущее состояние и перспективы развития. Часть 1 / В. Стещенко // Компоненты и технологии. – 2010. – № 11. – С. 87–92.
3. Дворников, О. Универсальная аналоговая микросхема для датчиков / О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов // Современная электроника. – 2011. – № 3. – С. 56–65.
4. Автоматизированное проектирование СБИС на базовых кристаллах / А.И. Петренко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1989. – 160 с.
5. Быстродействующие матричные БИС и СБИС. Теория и проектирование / Б.Н. Файзулаев [и др.]. – М. : Радио и связь, 1989. – 304 с.
6. Импортозамещающая технология ПЛИС – БМК. Часть I. Разработка радиоэлектронной аппаратуры двойного применения / В. Евстигнеев [и др.]. // Компоненты и технологии. – 2004. – № 7. – С. 80–86.
7. Старченко, Е.И. Особенности схемотехники операционных усилителей, стойких к воздействию потока нейтронов / Е.И. Старченко // Микропроцессорные аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения : материалы III Международ. научно-практической конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. – С. 19–23.
8. Импортозамещающие практические разработки и проекты ИС на базе радиационностойкого АБМК / О.В. Дворников [и др.]. // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006. Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М. : ИППМ РАН, 2006. – С. 200–205.
9. Дворников, О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 2. Базовые схемотехнические решения АБМК 1-3 / О.В. Дворников // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 283–288.
10. Абрамов, И.И. Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем / И.И. Абрамов, О.В. Дворников. – Минск : Акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2006. – 286 с.
11. Дворников, О.В. Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах / О.В. Дворников, В.Н. Гришков // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М. : ИППМ РАН, 2010. – С. 301–306.
12. Старченко, Е.И. Стабилизаторы напряжения с компенсационно-параметрическими каналами: монография / Е.И. Старченко. – Шахты: ЮРГУЭС, 2009. – 108 с.

Dvornikov O.V., Diatlov V.L., Tchekhovski V.A., Starchenko E.I.

Radiation hardened analog IC for sensor

Problems of specialized analog integrated circuit design for sensor equipments are considered. It is offered to produce of radiation hardened analog IC on structured chips for economic efficiency at small production volume. The approach to analog IC design is described, including recommendations for choice of: types and quantities of structured chip analogue components; active and passive components; schematic decisions of analogue components with programmed parameters and small sensitivity to radiation. (E-mail: oleg_dvornikov@tut.by)

Key Words: sensors, analog IC, radiation hardened IC.

Поступила в редакцию 15.09.2011.