

Свизев Григорий Альбертович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: grits1989@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; тел.: +79526036933; магистрант.

Svizev Grigory Albertovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: grits1989@mail.ru; 22, Chekhova street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79526036933; magister.

УДК 621.372

А.Е. Титов

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ НА БАЗЕ МОУ

Проектирование радиационно стойких инструментальных усилителей требует применение не только радиационно стойких технологий производства, но и эффективных схемотехнических решений, направленных на стабилизацию работы устройства в условиях радиационного воздействия – потока нейтронов, дозы радиации и температуры. В работе представлены результаты проектирования для техники аналогового базового матричного кристалла АБМК радиационно стойкого инструментального усилителя на базе структурно оптимизированных мультидифференциальных операционных усилителей и результаты его моделирования в среде PSpice.

Радиационно стойкий инструментальный усилитель; минимальный дрейф нуля; коэффициент ослабления синфазного сигнал; радиация; поток нейтронов.

A.E. Titov

RADIATION-RESISTANT TWO-CHANNEL INSTRUMENTATION AMPLIFIER ON THE BASE MOA

Design of radiation-resistant instrumentation amplifiers requires application not only radiation-resistant technologies, but also effective circuit decisions directed on stabilization of work of the device in the radiating influence conditions – neutron flux, radiation dose, temperature. In work results of designing of the radiation-resistant instrumentation amplifier on the base multidifferetial operational amplifiers for techniques analogue base matrix chip ABMC and results of modeling in the PSpice environment are presented.

Radiation-resistant instrumentation amplifier; the minimum zero drift; CMRR; radiation; neutron flux.

Создание радиационно-стойких аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов (АИ и АЦИ) смешанных систем в корпусе (СвК), ориентированных на взаимодействие с чувствительными элементами (сенсорами) мостового типа всегда предполагает применение инструментальных усилителей (ИУ) как с фиксированными, так и управляемыми параметрами, выполняющих функции подавления синфазного сигнала и усиление дифференциального напряжения. Эти устройства являются основой как для аналоговых портов, так и для целого класса сложн-функциональных блоков (СФ-блоков) СвК. Как с экономической, так и с технической точек зрения такие СФ-блоки в виде полупроводниковых кристаллов целесообразно ориентировать на технику соответствующих аналоговых базовых матричных кристаллов (АБМК), среди которых детальную апробацию на целом классе ИС прошел биполярно-полевой АБМК [1]. Оригинальная топология макрофраг-

ментов, универсальные конструкции активных элементов и контактных площадок, хорошие частотные и шумовые характеристики, используемых n-p-n- и p-JFET-транзисторов, позволяют реализовать на БМК широкий спектр аналоговых ИС. АБМК включает два идентичных канала, состоящих из двух макрофрагментов с фиксированным количеством расположенных на них элементов. Таким образом, номенклатура компонентов и структура макрофрагментов техники АБМК накладывает дополнительные ограничения на схемотехнику ИУ [2]. Но как показывает практика, использование лишь радиационно стойкой технологии не позволяет обеспечить бесперебойную работу устройства в условиях радиационного воздействия свыше 50 крад. Поэтому необходимо дальнейшее развитие схемотехнических решений, направленных на повышение качественных показателей устройства при воздействии дозы радиации, потока нейтронов, температуры.

Как правило, классическая структура инструментального усилителя включает в себя три операционных усилителя и семь прецизионных резисторов (рис. 1).

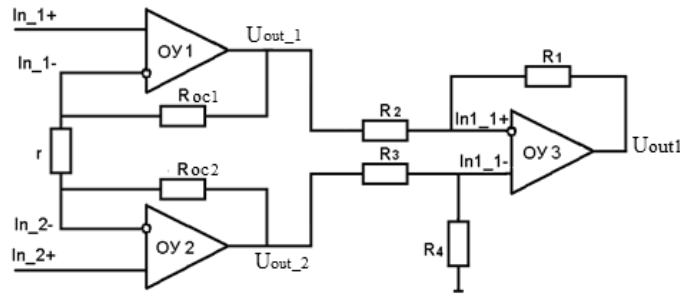


Рис. 1. Классический инструментальный усилитель

Коэффициент передачи синфазного сигнала $K_{сн}$ в таком инструментальном усилителе зависит от погрешности соотношений резистивных элементов в структуре сумматора [3]:

$$K_{сн} \approx \Theta_R . \quad (1)$$

Так в условиях радиационного воздействия изменение номиналов резистивных элементов для технологии АБМК составляет 1,5 %, что приведет к значительному (до 30 дБ) снижению коэффициента ослабления синфазного сигнала $K_{оссн}$:

$$K_{оссн} = \frac{K_{сн}}{K_d} . \quad (2)$$

Поэтому при построении радиационно стойкого ИУ необходимо исключить резистивные элементы из структуры сумматора. Также погрешность синфазных напряжений $U_{сн}$ на выходе операционных усилителей ОУ1 и ОУ2 зависит от погрешности отношения резисторов R_{oc1}, R_{oc2} и r (см. рис. 1). Максимальное напряжение на выходах ОУ1 и ОУ2 будет определяться из следующих соотношений:

$$U_{out_1} = U_{сн} - \frac{R_{oc1}}{r} U_{диф}, U_{out_2} = U_{сн} + \frac{R_{oc2}}{r} U_{диф} , \quad (3)$$

где $U_{сн}$ – синфазное напряжение на выходе ОУ1 или ОУ2, $U_{диф}$ – дифференциальное напряжение на входе ИУ.

В [3] показано, что даже при идеальных резистивных элементах и линейных ОУ значение коэффициента передачи синфазного напряжения непосредственно определяется $K_{оссн}$ операционных усилителей.

Таким, образом, создание дифференциального сумматора, обеспечивающего прецизионное преобразование выходных напряжений (3), решает основную задачу повышения качественных показателей радиационно стойких ИУ.

Решением указанных проблем является использование в структуре радиационно стойкого ИУ мультидифференциального операционного усилителя (МОУ) (рис. 2). В этом случае дифференциальный коэффициент усиления инструментального усилителя определится соотношением

$$K_d = 2\left(1 + 2\frac{R}{r}\right) \cdot \frac{R_{и1}}{R_{и2}}, \quad (4)$$

где $R_{и1}$, $R_{и2}$ – резисторы истоковых цепей p-JFet транзисторов во входных дифференциальных каскадах МОУ [4]. Причем при их равенстве достигается минимальные искажения сигналов во входных каскадах МОУ3.

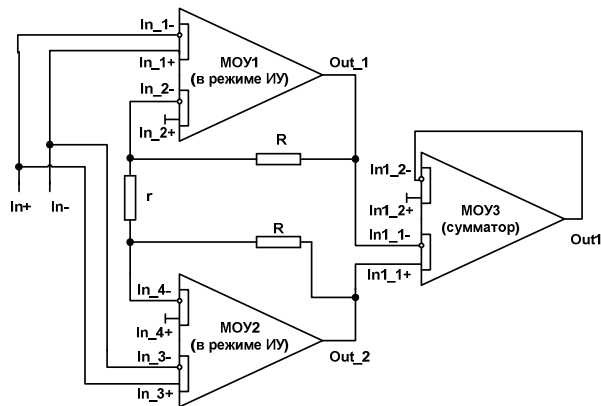


Рис. 2. Радиационно стойкий ИУ на МОУ

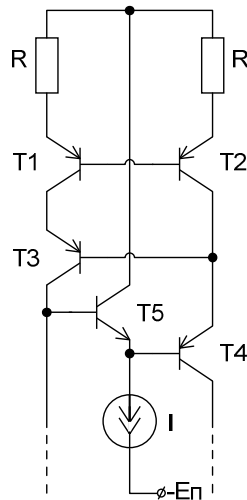


Рис. 3. Особенность реализации ДН в МОУ

Особенности представленной архитектуры заключаются в использовании в каждом канале идентичных мультидифференциальных операционных усилителей, что позволяет:

- 1) исключить передачу на первый и второй выходы каналов входных синфазных сигналов с погрешностью, обусловленной коэффициентом ослабления синфазного напряжения отдельных МОУ и, следовательно, заметно уменьшить требования к линейности их амплитудных характеристик и граничным напряжениям сумматора;
- 2) исключить из состава сумматора прецизионные резисторы и, как было показано ранее, повысить предельный коэффициент ослабления синфазного напряжения ИУ;
- 3) многократно ослабить зависимость дрейфа нуля ИУ от дифференциального коэффициента усиления и, следовательно, предельно повысить его численное значение.

Указанные свойства схемы такого двухканального ИУ позволяют также использовать его структурные степени свободы для упрощения схем отдельных МОУ и повышения радиационной стойкости интерфейса в целом.

Применение такой структуры позволяет исключить резистивные элементы из структуры сумматора [3]. Таким образом, при радиационном воздействии $K_{сн}$ ИУ не зависит от Θ_R в отличие от классической структуры

$$K_{сн} = \frac{R}{r} (K_{оссн_1} - K_{оссн_2}) K_{оссн_3}, \quad (5)$$

где $K_{оссн_i}$ – коэффициент ослабления синфазного сигнала i -го МОУ.

Применение в каждом канале инструментального усилителя МОУ1 и МОУ2 (см. рис. 2) вместо ОУ1 и ОУ2 (см. рис. 1) позволяет дополнительно ослабить синфазное напряжение $U_{сн}$ и упростить входные каскады сумматора МОУ3.

Необходимо отметить, что напряжение дрейфа нуля такого инструментального усилителя определяется следующим соотношением:

$$U_{др.ИУ} = U_{др.МОУ1} - U_{др.МОУ2} + U_{др.МОУ3}. \quad (6)$$

С учетом того, что все МОУ, выполняется на одном кристалле, а МОУ3 используется только в качестве сумматора сигналов ($K_{д.МОУ3}=1$), то $U_{др.ИУ} = E_{см.МОУ3}$, поэтому при радиационном воздействии напряжение дрейфа нуля ИУ будет зависеть только от ЭДС смещения МОУ3.

Учитывая вышесказанное, успешная реализация радиационно-стойкого ИУ связано с разработкой нового типа мультидифференциальных ОУ [5] и требует пересмотра некоторых традиционных схемотехнических решений. Известно, что для технологии радиационно-стойкого АБМК наибольшей радиационной стойкостью обладают полевые р-JFET-транзисторы и биполярные п-р-п-транзисторы, а наименьшей – боковые транзисторы р-п-р-типа [2]. При нейтронном облучении столкновения между нейтронами и атомами кремния приводят к появлению необратимых дефектов в кристаллическом решетке, уменьшающих время жизни неосновных носителей и их подвижность. В конечном счете, возникает деградация коэффициента усиления тока базы в схеме с общим эмиттером

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_0} + \frac{\tau \cdot F}{k}, \quad (7)$$

где β , β_0 – коэффициенты усиления тока базы после и до воздействия нейтронного излучения; τ – время пролета неосновных носителей через базу; F – плотность потока нейтронов; k – постоянная, зависящая от проводимости, удельного сопротивления полупроводниковых областей и уровня инжекции.

Таким образом, при построении мультидифференциальных операционных усилителей необходимо исключить возможность применения р–п–п-транзисторов в режимах задающих частях схемы. В разработанном радиационно стойком ИУ, реализация источников тока осуществлялась на п–р–п-транзисторах. Кроме того, были пересмотрены традиционные решения по проектированию динамических нагрузок (ДН). На рис. 3 показан вариант использования ДН на р–п–п-транзисторах с дополнительно введенным п–р–п-транзистором Т5 для стабилизации режимов работы при радиационном воздействии и компенсации изменения малосигнальных параметров р–п–п-транзисторов. В такой структуре дифференциальное сопротивление ДН, а также стабилизация режимов её работы при радиационном воздействии практически точно определяется параметрами работы п–р–п-транзисторов. Кроме указанных особенностей необходимо учитывать большое изменение тока, протекающего через полевые р–JFET-транзисторы при радиационном воздействии. Поэтому в структуре разработанного радиационно стойкого ИУ предусмотрена стабилизация этого тока в условиях воздействия радиации с помощью введенных дополнительных обратных связей. Кроме этого, увеличение тока способствует повышению линейности входных цепей МОУ при воздействии гаммы дестабилизирующих факторов (≥ 250 мкА).

Совокупность указанных особенностей позволила разработать набор мультидифференциальных ОУ для реализации радиационно стойкого ИУ (см. рис. 2). Дифференциальный коэффициент ИУ задается отношением резисторов в ОС и может варьироваться от 20 дБ до 60 дБ. Результаты моделирования разработанного радиационно стойкого инструментального усилителя ($K_d = 60$ дБ) в среде PSpice с учетом воздействия гаммы дестабилизирующих факторов – потока нейтронов F_n , дозы радиации D , а также изменение диапазона температур T представлены в табл. 1. Достоверность соответствующих моделей проверена на практике.

Таблица 1

Радиационно-стойкий ИУ

Воздействие \ Параметры	K_d , дБ	$f_{гр_д}$, кГц	$K_{сн}$, дБ	$f_{гр_сн}$, кГц	$U_{др}$, мкВ	v , В/мкс	t_p , мкс
Без воздействия	60	53	-140	1,5	-173	8 / 5,5	0,9 / 1,3
$F_n = 5e17$ н/м ²	60	47	-140	1,3	-44	7,7 / 5,4	0,9 / 1,4
$D = 100$ крад	60	51	-140	1,26	-108	8 / 5,6	0,9 / 1,4
$D = 500$ крад	60	47	-140	1,29	-3	7,8 / 5,4	0,9 / 1,5
$T = -40^\circ$ C	60	58	-140	1,49	-5	8,9 / 6,4	0,7 / 1,1
$T = +80^\circ$ C	60	44	-140	2,4	-287	7,4 / 5,1	1,1 / 1,5
$F_n = 5e17$ н/м ² , $D = 500$ крад, $T = -40^\circ$ C	60	52	-140	1,36	+163	8,3 / 5,8	0,8 / 1,3
$F_n = 5e17$ н/м ² , $D = 500$ крад, $T = +80^\circ$ C	60	41	-140	2,45	-115	7 / 4,9	1 / 1,5

Примечание: K_d – коэффициент усиления дифференциального сигнала, $f_{гр_д}$ – граничная частота K_d , $K_{сн}$ – коэффициент ослабления синфазного напряжения, $f_{гр_сн}$ –

граничная частота $K_{\text{сн}}$, $U_{\text{др}}$ – напряжение дрейфа нуля усилителя, v – скорость нарастания импульса по положительному и отрицательному фронтам, $t_{\text{п}}$ – длительность переходного процесса, $E_{\text{п}} = \pm 5 \text{ В}$ – напряжения питания, $I_{\text{п}}$ – токи потребления.

Необходимо отметить, что в разработанном ИУ дрейф нуля как при любом из отдельно вышеперечисленных воздействий, так и при их суммарном воздействии не превышает 300 мкВ. Следовательно, учитывая, что уравнение для максимально допустимого напряжения дрейфа нуля для n -разрядного аналого-цифрового преобразователя, используемого в АЦ-интерфейсе, имеет вид

$$U_{\text{др}} = \frac{E_0}{2^n}, \quad (8)$$

где E_0 – опорное напряжение. Тогда если $E_0 = 2,5 \text{ В}$, то разработанный ИУ можно использовать в микросхемотехнических схемах с 12-разрядным АЦП с предельной методической точностью.

Интеграция предложенных в данной работе схемотехнических решений в структуру разработанного радиационно стойкого инструментального усилителя позволила получить высокие качественные показатели этого устройства при воздействии гаммы дестабилизирующих факторов (см. табл. 1). Также необходимо отметить, что данный ИУ может бесперебойно работать и в более жестких условиях ($500 \text{ крад} \leq D \leq 1 \text{ Мрад}$) для чего необходимо дополнительно изменить режимы работы ряда активных элементов, при этом потребление тока увеличится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопенко Н.Н., Старченко Е.И., Крутччинский С.Г., Титов А.Е. и др. Каталог разработок Российско-Белорусского центра аналоговой микросхемотехники. – Шахты: Изд-во ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. – 479 с.
2. Дворников О.В., Чеховский В.А. Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // Chip News. – 1999. – № 2. – С. 21-23.
3. Титов А.Е. Двухканальные прецизионные инструментальные усилители для радиационно-стойких систем на кристалле // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 64-70.
4. Крутччинский С.Г., Титов А.Е., Цыбин М.С. Входные каскады дифференциальных и мультидифференциальных операционных усилителей с высоким ослаблением синфазного напряжения. МЭС // 2010. Сборник трудов / Под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 537-543.
5. Крутччинский С.Г., Титов А.Е. Структурный синтез инструментальных усилителей на базе мультидифференциальных усилителей (МОУ) // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 72-81.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Титов Алексей Евгеньевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: alehan_26rus@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371773; аспирант.

Titov Alexey Evgen'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: alehan_26rus@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; postgraduate student.