

УДК 621.372

А.Е. Титов

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С МИНИМАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ДРЕЙФА НУЛЯ**

Рассмотрено проектирование симметричных операционных усилителей и мультидифференциальных операционных усилителей, а также измерительных средств на их основе. Доказано, что симметричность таких усилителей позволяет обеспечить прецизионность конечных устройств и повысить эффективность использования источников питания схемы. Показано, что использование симметричных входных, промежуточных и выходных каскадов не требует применения дополнительных цепей стабилизации режимов работы устройства, в том числе при воздействии различных дестабилизирующих факторов и позволяет уменьшить напряжение смещения на выходах этих каскадов и, следовательно, увеличить линейный рабочий диапазон в указанных узлах схемы и повысить достижимые качественные показатели проектируемых усилителей и измерительных устройств на их основе. Приведены результаты проектирования схем в среде PSpice и результаты их моделирования, в том числе под воздействием гаммы дестабилизирующих факторов – ионизирующего излучения (доза поглощенной радиации, высокоэнергетический поток нейтронов) и температуры.

Симметричный операционный усилитель; минимальный дрейф нуля; коэффициент ослабления синфазного сигнала; мультидифференциальный ОУ.

А.Е. Titov

**DESIGN OF SYMMETRICAL AMPLIFIERS WITH MINIMUM INPUT
OFFSET VOLTAGE**

Design of symmetrical operational amplifiers and indirect current feedback instrumentation amplifiers and measuring devices are shown. Proved that amplifiers symmetry allows providing accuracy of devices and increasing efficiency of power supplies. Shown that using of symmetrical input, intermediate and output stages doesn't require additional circuits of stabilization operating modes of devices under influence destabilizing factors and allows reducing the offset voltage on the outputs of these stages, and therefore, increasing the linear operating range specified circuit nodes and improve parameters of amplifiers. Results of circuits design in PSpice environment and modeling results, including results of modeling scheme under influence of destabilizing factors are given.

Symmetrical operational amplifier; the minimum input offset voltage; CMRR; indirect current feedback instrumentation amplifier.

Введение. При построении аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов, осуществляющих передачу и преобразование сигналов от чувствительных элементов (сенсоров), используются операционные усилители (ОУ) и мультидифференциальные операционные усилители (МОУ) [1], а также построенные на их основе инструментальные усилители. Как правило, основными требованиями при проектировании таких устройств является минимизация коэффициента передачи синфазного напряжения $K_{сн}$ и напряжения дрейфа нуля инструментального усилителя $U_{др}$ при требуемом коэффициенте усиления дифференциального сигнала $K_{д}$. Как показывает практика, использование несимметричных дифференциальных каскадов (ДК) при построении усилителей требует введения дополнительных цепей стабилизации режимов работы [2], что в конечном итоге приводит к неэффективному использованию источников питания или к невозможности реализации

прецизионных усилителей при заданном техническим заданием напряжении шины питания. Необходимость применения указанных цепей в первую очередь обусловлена увеличением ЭДС смещения и коэффициента передачи синфазного напряжения на выходах несимметричных дифференциальных каскадов и, следовательно, уменьшением коэффициента ослабления синфазного сигнала

$$K_{оссч}^{-1} = \frac{K_{сн_i}}{K_{д_i}}, \quad (1)$$

где i – номер выхода каскада.

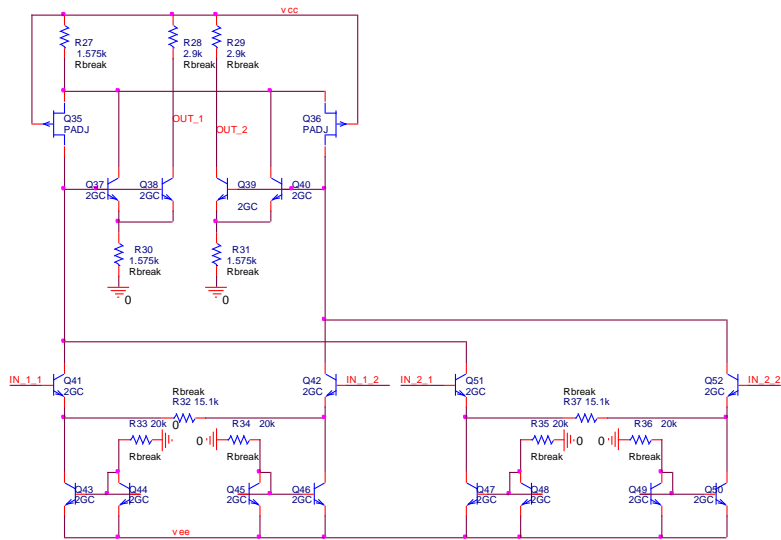
Постановка задачи. Создание операционных усилителей и мультидифференциальных ОУ связано с реализацией одного входного дифференциального каскада и двух симметрично работающих входных дифференциальных каскадов соответственно, а также промежуточного и выходного каскадов (рис. 1, 3). Условные обозначения этих усилителей представлены на рис. 2.

Построение прецизионных инструментальных усилителей на основе операционных усилителей предполагает, что такие ОУ обладают высокими качественными показателями, в первую очередь высоким коэффициентом подавления синфазного напряжения и статическим коэффициентом усиления, при разомкнутой цепи обратной связи, а также низким напряжением дрейфа нуля усилителя [1]. Возможность параметрической оптимизации конечных инструментальных устройств и СФ-блоков, при их построении на основе мультидифференциальных ОУ, определяется также симметричностью входных дифференциальных каскадов [3]. Применение дополнительных схмотехнических решений, направленных на увеличение качественных показателей, в таких структурах требует особого внимания, так как некоторые из них оказываются неэффективными именно в симметричных каскадах [4].

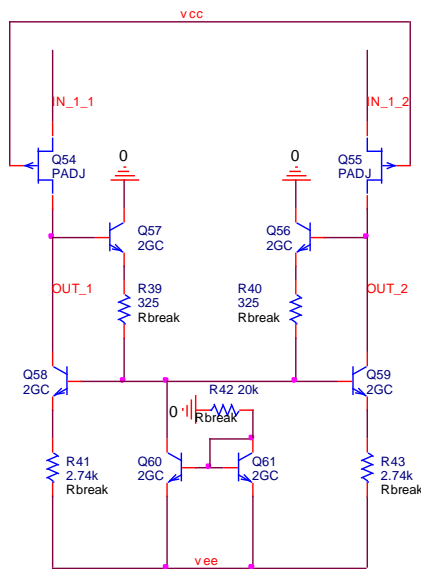
Так, предложенные в [4] дополнительные компенсирующие выходное синфазное напряжение цепи обратных связей не предполагают относительно высокой идентичности входных активных элементов. Структуры симметричных входного и промежуточного дифференциальных каскадов, основанные на применении таких контуров обратных связей, показаны на рис. 1.

Предложенные в [4] решения позволяют проектировать симметричные дифференциальные каскады для прецизионных измерительных устройств в рамках технологии с ограниченным компонентным базисом, например, радиационно-стойкой технологии биполярно-полевого аналогового базового матричного кристалла АБМК [5, 6]. При этом ограничения, накладываемые АБМК, влияют на выбор структуры построения как входных и промежуточных симметричных каскадов (рис. 1), так и выходного несимметричного каскада рис. 3. При этом в данном случае структурная несимметричность выходного каскада не мешает организации идентичных коэффициентов передачи по каждому из входов. Однако указанная особенность влияет на идентичность коэффициентов передачи синфазного напряжения промежуточного каскада, что подтверждается результатами моделирования этих каскадов в среде PSpice (табл. 1).

Разработанные дифференциальные каскады [4] (рис. 1, 3) с практически идентичными коэффициентами передачи в рамках каждого отдельного каскада позволяют создавать инструментальные усилители [7] с высокими качественными показателями (табл. 2).



а



б

Рис. 1. Симметричные дифференциальные каскады МОУ: а – входной ДК; б – промежуточный ДК

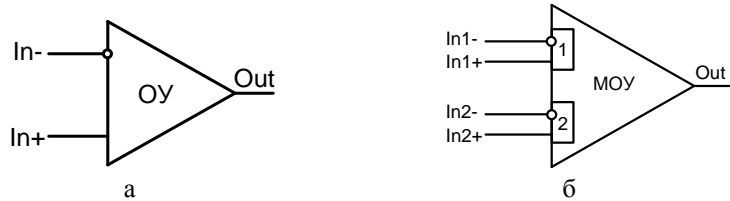


Рис. 2. Условные обозначения усилителей: а – операционный усилитель; б – мультидифференциальный

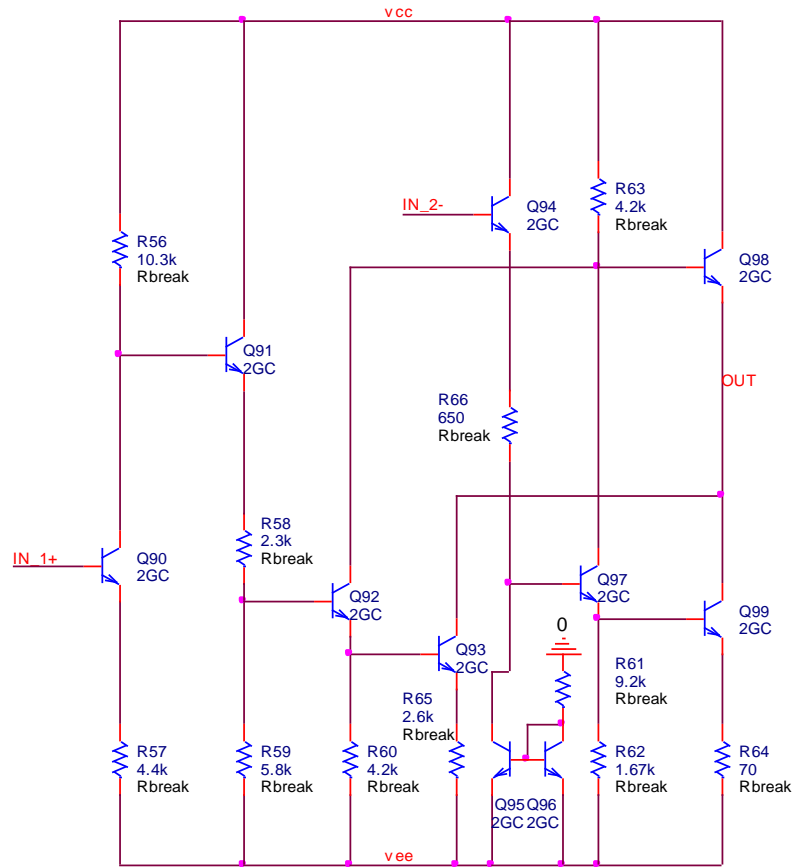


Рис. 3. Выходной каскад мультидифференциального ОУ

Таблица 1

Результаты моделирования дифференциальных каскадов

Рисунок	Вход	Выход	K_{∂} , дБ	$f_{гр\partial}$, кГц	Вход	$K_{сн}$, дБ	$f_{гр\сн}$, МГц
1,а	IN_1_1	OUT_1	10,956	785	IN_1_1	-48,7	2,28
	IN_2_1	OUT_2	10,902	785	IN_1_2	-48,8	2,28
	IN_1_2	OUT_1	10,902	785	IN_2_1	-48,7	2,28
	IN_2_2	OUT_2	10,956	785	IN_2_2	-48,8	2,28
1,б	IN_1_1	OUT_1	30,753	1 950	IN_1_1	14	-
		OUT_2	29,409	1 920			
	IN_1_2	OUT_1	29,409	1 920	IN_1_2	8	-
		OUT_2	30,753	1 950			
3	IN_1+	OUT	8,21	93 000	IN_1+	-46,4	0,3
	IN_2-		7,29	109 000	IN_2-		

Примечание: $f_{гр\partial}$ – граничная частота K_{∂} , $f_{гр\сн}$ – граничная частота $K_{сн}$.

Таблица 2

Результаты моделирования инструментального усилителя

Воздействие \ Параметры	K_{ϕ} , дБ	$f_{гр. \phi}$, кГц	$K_{сн}$, дБ	$f_{гр. сн}$, МГц	$U_{др}$, мкВ
Без воздействия	20,002	1,540	-145	26	6,4
$T = -40^{\circ}\text{C}$	20,007	1,624	-129	81	9,4
$T = +85^{\circ}\text{C}$	19,998	1,463	-153	11	5,4
$T = -40^{\circ}\text{C}$, $D = 1$ Мрад, $F_n = 5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см ²	20,006	1,652	-111	147	26,9
$T = +85^{\circ}\text{C}$, $D = 1$ Мрад, $F_n = 5 \cdot 10^{13}$ нейтрон/см ²	20,001	1,515	-135	40	13,0

Примечание: $U_{др}$ – напряжение дрейфа нуля ИУ.

Как видно, предложенная структура инструментального усилителя обладает высокими метрологическими свойствами в условиях воздействия температуры T и ионизирующего излучения (поток нейтронов F_n , доза радиация D). Таким образом, использование свойства симметричности каскадов позволяет увеличить максимально достижимые качественные показатели конечного устройства.

Симметричность структуры усилителя. Приведенные результаты проектирования и моделирования справедливы для инструментального усилителя, проектируемого на основе симметричных дифференциальных каскадов, его сигнальный граф приведен на рис. 4.

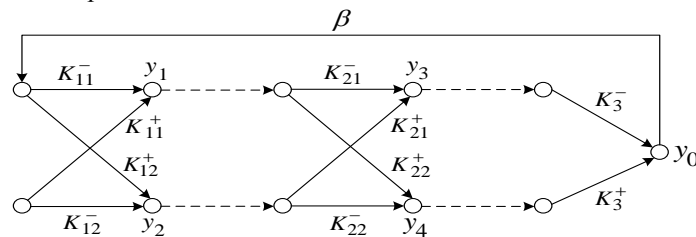


Рис. 4. Сигнальный граф симметричного МОУ

Система уравнений, описывающих сигнальный граф симметричного мультидифференциального ОУ, имеет вид

$$\begin{cases} y_0 = y_3 \cdot K_3^- + y_4 \cdot K_3^+, & y_1 = \beta \cdot y_0 \cdot K_{11}^- + E_1, & y_2 = \beta \cdot y_0 \cdot K_{12}^+ + E_2, \\ y_3 = y_1 \cdot K_{21}^- + y_2 \cdot K_{21}^+ + E_3, & y_4 = y_1 \cdot K_{22}^+ + y_2 \cdot K_{22}^- + E_4, \end{cases} \quad (2)$$

где y_i – общее значение напряжения смещения на i -м выходе каскадов; E_i – значение ЭДС смещения каскада на его i -м выходе; β – глубина общей обратной связи; K_{ij}^+ и K_{ij}^- – положительный и отрицательный дифференциальные коэффициенты передачи i -го каскада j -го канала соответственно.

Рассмотрим несколько вариантов организации структуры дифференциальных каскадов, входящих в состав операционных и мультидифференциальных операционных усилителей. Вначале анализируем случай, когда соблюдается симметричность всех дифференциальных каскадов. С учетом симметричности ДК и при условии, что $K_{ij} = K_{ij}^+ = -K_{ij}^-$, напряжение дрейфа нуля на выходе усилителя определяется соотношением

$$y_0 = \frac{E_1 - E_2}{\beta(K_{11} + K_{12})} + \frac{E_4 - E_3}{\beta(K_{11} + K_{12})(K_{21} + K_{22})}. \quad (3)$$

Как видно из соотношения (3), в обоих слагаемых происходит вычитание ЭДС смещения на выходах дифференциальных каскадов, при этом дальнейшее уменьшение дрейфа нуля конечного устройства может потребовать увеличения дифференциальных коэффициентов передачи во входном каскаде. Для решения общей задачи определим напряжение смещения на выходах каскадов:

$$y_1 = \frac{E_1 \cdot K_{12} + E_2 \cdot K_{11}}{K_{11} + K_{12}} + \frac{K_{11} \cdot (E_4 - E_3)}{(K_{11} + K_{12})(K_{21} + K_{22})}, \quad (4)$$

$$y_2 = \frac{E_1 \cdot K_{12} + E_2 \cdot K_{11}}{K_{11} + K_{12}} + \frac{K_{12} \cdot (E_4 - E_3)}{(K_{11} + K_{12})(K_{21} + K_{22})}, \quad (5)$$

$$y_3 = \frac{E_3 \cdot K_{22} + E_4 \cdot K_{21}}{K_{21} + K_{22}}, \quad (6)$$

$$y_4 = \frac{E_3 \cdot K_{22} + E_4 \cdot K_{21}}{K_{21} + K_{22}}. \quad (7)$$

Рассмотрим вариант, когда выходной каскад несимметричный ($K_3^- = 0 \vee K_3^+ = 0$). В этом случае напряжения смещения на выходах каскадов определяются следующим образом:

$$y_0 = \frac{E_1 - E_2}{\beta(K_{11} + K_{12})} + \frac{E_4}{\beta \cdot K_{22} (K_{11} + K_{12})}, \quad (8)$$

$$y_1 = \frac{E_1 \cdot K_{12} + E_2 \cdot K_{11}}{K_{11} + K_{12}} - \frac{K_{11} \cdot E_4}{K_{22} (K_{11} + K_{12})}, \quad (9)$$

$$y_2 = \frac{E_1 \cdot K_{12} + E_2 \cdot K_{11}}{K_{11} + K_{12}} + \frac{K_{12} \cdot E_4}{K_{22} (K_{11} + K_{12})}, \quad (10)$$

$$y_3 = \frac{E_3 \cdot K_{22} + E_4 \cdot K_{21}}{K_{22}}, \quad (11)$$

$$y_4 = 0. \quad (12)$$

Как видно из приведенных соотношений, несимметричность выходного каскада приводит к увеличению напряжения ЭДС смещения на выходах всех дифференциальных каскадов. Так, во вторых слагаемых y_1 , y_2 , y_0 отсутствует вычитание ЭДС смещений, а также происходит уменьшение делителя в 2 раза по сравнению с симметричной структурой. Кроме того, как это видно из (6)–(7) и (11) на одном из выходов второго каскада наблюдается увеличение ЭДС смещения в 2 раза. Это приводит к значительному уменьшению линейного рабочего диапазона на выходах каскадов. Используя соотношения (8)–(12), рассмотрим вариант, когда несимметричен второй каскад усилителя, т.е. $K_3^- = 0$ ($K_3^+ = 0$), $K_{22} \gg K_{21}$. Как видно из соотношений, напряжение смещения в рассматриваемых узлах усилителя будет идентичным варианту, когда несимметричным является выходной каскад. Исключение составляет ЭДС смещения на выходе второго каскада ($y_3 \vee y_4$), величина которого становится сопоставимой с вариантом полностью симметричного устройства. Тогда, даже в наилучшем случае напряжение смещения на выходе несимметричного усилителя будет составлять

значительную величину и потребует дорогостоящей прецизионной подстройки. Именно поэтому обеспечение симметричности отдельных каскадов в ОУ и МОУ играет первостепенную роль при построении прецизионных измерительных устройств.

Таким образом, использование симметричной структуры усилителя позволяет минимизировать напряжения смещения как на выходах отдельных каскадов, так и всего устройства в целом. Кроме того, дальнейшее уменьшение напряжения смещения на выходах рассматриваемых каскадов и общем выходе усилителя связано с увеличением коэффициентов усиления во входных дифференциальных каскадах усилителя, при этом конечное значение этого коэффициента определится реализацией необходимого коэффициента передачи синфазного сигнала.

Кроме того, при построении радиационно-стойких инструментальных устройств и усилителей доминирующим фактором является воздействие радиационного ионизирующего излучения (доза поглощенной радиации и высокоэнергетический поток нейтронов) и температуры, что приводит к значительному ухудшению основных малосигнальных дифференциальных параметров транзисторов (выходная проводимость, коэффициент усиления тока базы, входное сопротивление, глубина обратной связи по напряжению). При этом для несимметричных структур усилителей для стабилизации режимов работы в указанных условиях требуется организация дополнительных цепей стабилизации, что приводит к неэффективному использованию источников питания. Поэтому использование симметричной структуры построения специализированных микросхем усилителей и инструментальных средств на их основе позволяет не только придать конечным устройствам прецизионные свойства, но и увеличить эффективность использования шины питания.

При проектировании симметричных прецизионных инструментальных устройств также необходимо оценить вклад коэффициента передачи синфазного сигнала в итоговое напряжение дрейфа нуля схемы. С учетом того, что коэффициент передачи синфазного сигнала на выходе i -го каскада j -го канала $K_{сн_{ij}} = K_{ij}^+ + K_{ij}^-$, определим вклад $K_{сн}$ в напряжение дрейфа нуля на выходе проектируемого прецизионного симметричного усилителя:

$$y_0 = \frac{E_1 - E_2}{\beta(K_{11} + K_{12})} + \frac{E_4 - E_3}{\beta(K_{11} + K_{12})(K_{21} + K_{22})} + \frac{E_2(K_{оссн_3} K_{21} + K_{оссн_{22}} K_{22}) - E_1(K_{оссн_3} K_{21} + K_{оссн_{21}} K_{21})}{\beta(K_{11} + K_{12})(K_{21} + K_{22})}. \quad (13)$$

Как видно из (13), в числителе добавочного члена, определяющего вклад $K_{сн}$ в итоговое напряжение дрейфа нуля устройства, происходит вычитание двух слагаемых, содержащих суммы произведений $K_{оссн}^{-1}$ и K_{∂} . Таким образом, для симметричной структуры построения операционных и мультидифференциальных операционных усилителей погрешность, вносимая коэффициентом передачи синфазного напряжения в напряжение дрейфа нуля, оказывается незначительной и не изменяет прецизионных свойств конечного устройства.

Заключение. Построение симметричных ОУ и МОУ и организация идентичных дифференциальных коэффициентов передачи в рамках отдельного каскада для специализированных технологий с ограниченным компонентным базисом позволяют повысить качественные показатели конечного устройства, уменьшить напряжение дрейфа нуля схемы и минимизировать вклад коэффициента передачи синфазного сигнала в этот параметр, а также повысить эффективность использо-

вания источников питания, за счет отсутствия необходимости введения дополнительных цепей стабилизации режимов при воздействии различных дестабилизирующих факторов, в отличие от несимметричных структур их построения. Теоретические выводы в настоящей работе подтверждаются результатами моделирования инструментального усилителя, спроектированного на базе симметричных мультидифференциальных ОУ, представленных в табл. 2. Напряжение дрейфа нуля этого усилителя даже в условиях жесткого одновременного воздействия ионизирующего излучения и температуры не превышает 30 мкВ. Таким образом, при построении прецизионных усилителей, функционирующих в условиях воздействия различных дестабилизирующих факторов, стабилизация работы, повышение их метрологических свойств и эффективности использования шины питания требуют проектирования симметричной структуры построения отдельных каскадов этих устройств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крутчинский С.Г., Титов А.Е.* Структурный синтез инструментальных усилителей на базе МОУ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 5 (94). – С. 72-81.
2. *Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С.* Способ повышения стабильности нуля аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом в условиях температурных и радиационных воздействий // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2010: Сборник трудов / Под общ. ред. академика А.Л. Стемповского. – М.: ИПМ РАН, 2010. – С. 295-300.
3. *Крутчинский С.Г., Титов А.Е.* Входные каскады дифференциальных и мультидифференциальных операционных усилителей с высоким ослаблением синфазного напряжения // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: Материалы X Международного научно-практического семинара, 1–2 окт. 2013 г. – Шахты: ИСОиП ФГБОУ ВПО «ДГТУ», 2013. – Ч. 1. – С. 364-370.
4. *Krutchinsky S.G., Titov A.E. and Svizev G.A.* Improvement of Common-Mode Rejection Ratio in Symmetrical Differential Stages with Dynamic Load // Proceedings of IEEE EWDTs'2013, – Rostov-on-Don, Russia, 2013. – P. 247-250.
5. *Дворников О.В., Чеховский В.А.* Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // Chip News. – 1999. – № 2. – С. 21-23.
6. *Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б.* Влияние гамма-излучения на элементы аналоговых интегральных схем // Доклады БГУИР. – 2012. – № 3 (65). – С. 56-62.
7. *Крутчинский С.Г., Титов А.Е.* Радиационно-стойкие инструментальные усилители на базе компонентов АБМК_1_4 // Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: материалы X Международного научно-практического семинара, 1–2 окт. 2013 г. – Шахты: ИСОиП ФГБОУ ВПО «ДГТУ», 2014. – Ч. 2. (в печати).

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

Титов Алексей Евгеньевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: alex.evgeny.titov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления.

Titov Alexey Evgen'evich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: alex.evgeny.titov@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems.