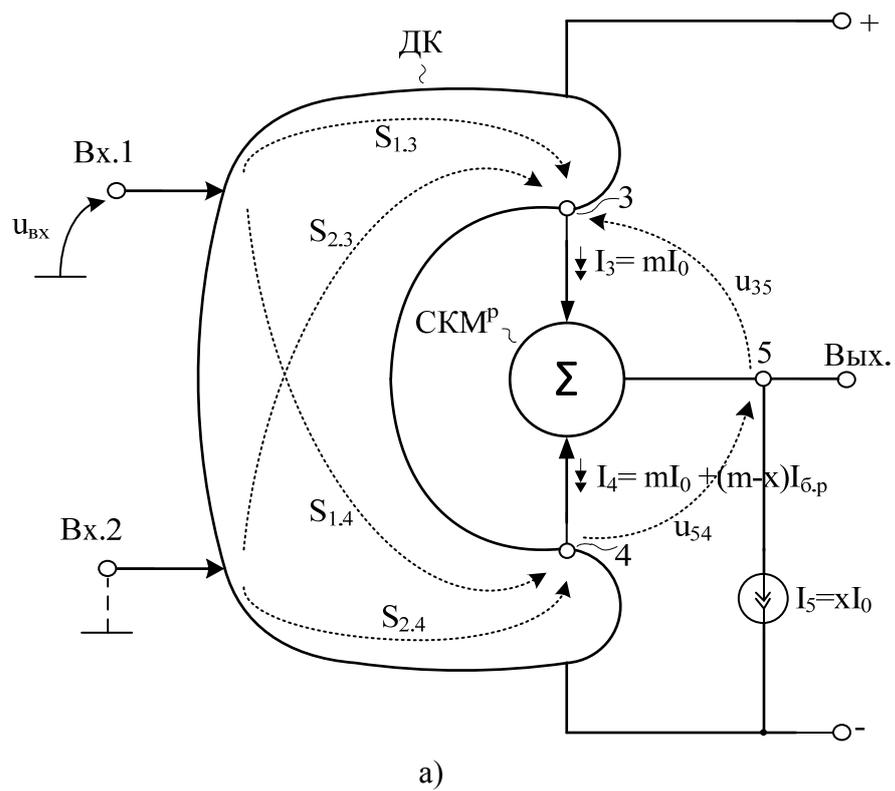


# **Метод компенсации напряжением смещения нуля операционных усилителей с классическими входными каскадами на основе токовых зеркал**

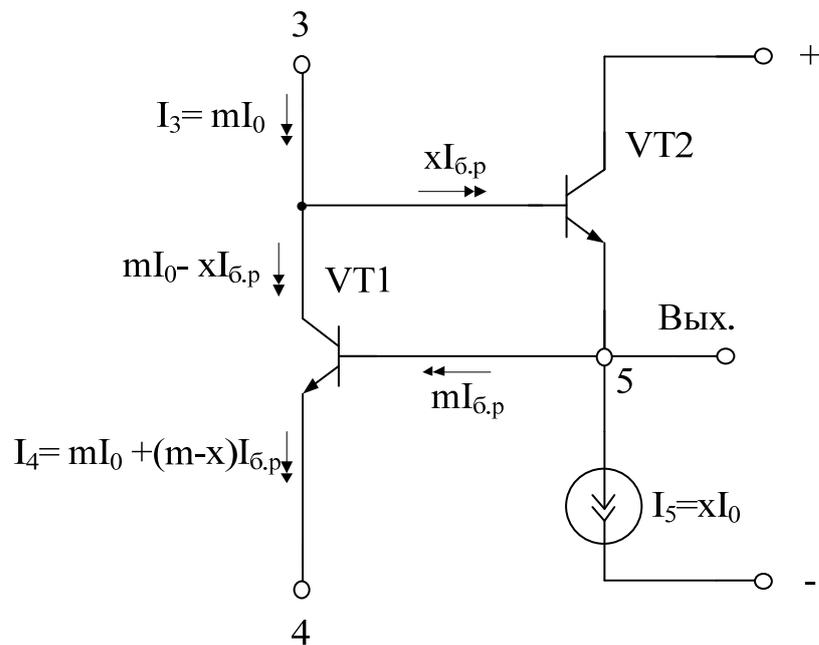
**Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков**

Рассмотренные в [1] методы минимизации напряжения смещения нуля ( $U_{см}$ ) аналоговых микросхем (АМ) с высокоимпедансным узлом базируются, как правило, на вмешательстве разработчика в структуру входного каскада АМ, либо связаны со специальным построением буферного усилителя. Однако в ряде практических задач нецелесообразно вносить какие-либо корректировки в исходную структуру входного дифференциального каскада (ДК) с целью обеспечения необходимых значений коэффициентов слабой токовой асимметрии функциональных узлов ОУ, а существующий набор буферных усилителей не всегда позволяет обеспечить взаимную компенсацию всех токовых составляющих в высокоимпедансном узле [1-5].

Если выходящие токи  $I_3$ ,  $I_4$  узлов 3 и 4 обобщенной схемы ДК рис. 1а на основе классических токовых зеркал при нулевом входном дифференциальном сигнале не одинаковы [6, 7] и их невозможно сделать идентичными из-за запрета на корректировку исходной структуры ДК, то для минимизации  $U_{см}$  в диапазоне температурных и радиационных воздействий [8] можно потребовать введения между узлами 3 и 4 специального корректирующего многополюсника (СКМ), который обеспечит согласование слабой токовой асимметрии ДК по выходам 3, 4 и кроме этого будет выполнять свойства буферного каскада с малым выходным сопротивлением. Функции такого СКМ реализуются в предлагаемой ниже схеме, показанной на рис. 1б.



а)



б)

Рис. 1. – Метод СКМ-р компенсации слабой токовой асимметрии вида  $(m-x)I_{6,p}$  по выходам 3 и 4 ДК (а), и устройство для его осуществления (б).

Действительно в общем случае выходные токи узлов 3 и 4 ДК (рис.1 а) могут быть не одинаковы. Для корректирующего многополюсника СКМ-р типа на n-p-n транзисторах рис. 1б допустимая асимметрия токов  $I_3$  и  $I_4$  ДК рис. 1а может достигать значений  $(m-x)I_{б,р}$ :

$$\begin{cases} I_3 = mI_0 \\ I_4 = mI_0 + (m-x)I_{б,р} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $m$ - коэффициент пропорциональности ( $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), характеризующий статические токи выходов 3 и 4 ДК при коэффициенте усиления токов базы всех n-p-n транзисторов  $\beta_p = \infty$ ,

$x$  – коэффициент пропорциональности устанавливающий численные значения тока двухполюсника  $I_5$  ( $x = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), кратные току  $I_0$ .

В формуле (1), под  $I_0$  понимается некоторый квант тока, например 1мА или 100мкА, к которому «привязывается» статический режим всех транзисторов схемы. Для наиболее часто встречающихся вариантов построения аналоговых микросхем в формуле (1), следует положить  $m=1$ . В этом случае допустимая асимметрия токов  $I_3$  и  $I_4$  в схеме рис. 1а определяется уравнением:

$$\Delta I_{43} = I_4 - I_3 = (1-x) I_{б,р}. \quad (2)$$

За счет изменения параметра « $x$ », характеризующего источник опорного тока  $I_5$ , можно скомпенсировать влияние на  $U_{см}$  неидентичности токов  $I_3$  и  $I_4$  вида  $(1-x)I_{б,р}$  в соответствии с таблицей № 1.

Таблица № 1.

Влияние параметра «х» СКМ<sup>Р</sup> - р-типа на компенсацию асимметрии токов I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> вида (1 - х)I<sub>б.р</sub> в обобщенном дифференциальном каскаде с классическими токовыми зеркалами при m=1.

Параметр «х» источника опорного тока I <sub>5</sub> =xI <sub>0</sub>	Допустимые значения токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>	Компенсированная асимметрия токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>
x=1	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}=0$
x=2	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - I_{б.р} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= -I_{б.р}$
x=3	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 2I_{б.р} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= -2I_{б.р}$
x=4	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 3I_{б.р} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= -3I_{б.р}$
x=5	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 4I_{б.р} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= -4I_{б.р}$

Если в формуле (1) принять m=2 то в этом случае СКМ<sup>Р</sup> - р-типа компенсирует как положительную, так и отрицательную разницу между токами I<sub>3</sub> и I<sub>4</sub> (табл. № 2).

Таблица № 2.

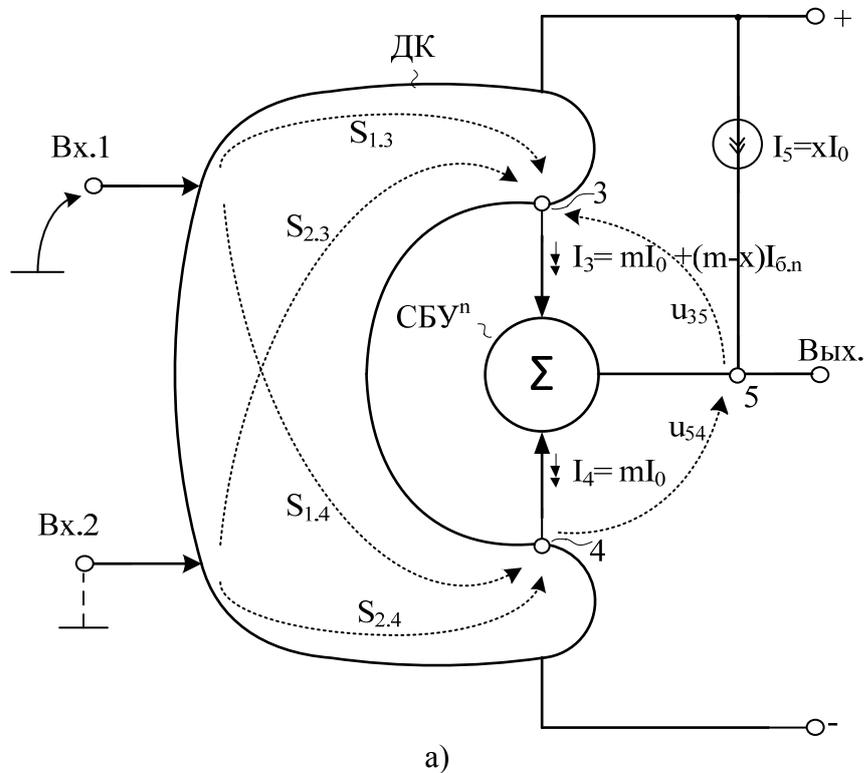
Влияние параметра «х» СКМ<sup>Р</sup> - р-типа на компенсацию асимметрии токов I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> вида (2 - х)I<sub>б.р</sub> в обобщенном дифференциальном каскаде при m=2.

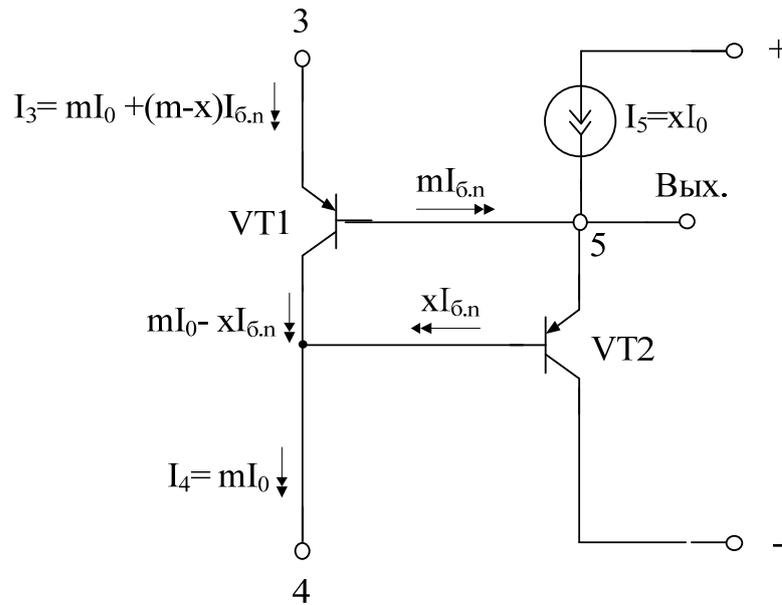
Параметр «х» источника опорного тока I <sub>5</sub> =xI <sub>0</sub>	Допустимые значения токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>	Компенсированная асимметрия токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>
1	2	3
x=1	$\begin{cases} I_3 = 2I_0 \\ I_4 = 2I_0 + I_{б.р} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= +I_{б.р}$
x=2	$\begin{cases} I_3 = 2I_0 \\ I_4 = 2I_0 \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}= 0$

1	2	3
$x=3$	$\begin{cases} I_3 = 2I_0 \\ I_4 = 2I_0 - I_{6,p} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -I_{6,p}$
$x=4$	$\begin{cases} I_3 = 2I_0 \\ I_4 = 2I_0 - 2I_{6,p} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -2I_{6,p}$
$x=5$	$\begin{cases} I_3 = 2I_0 \\ I_4 = 2I_0 - 3I_{6,p} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -3I_{6,p}$

Таким образом, за счет выбора параметра «х» в СКМ<sup>р</sup> р-типа можно уменьшить влияния на  $U_{см}$  разницы между выходными токами ДК  $I_3, I_4$ , достигающую значений  $(m-x)I_{6,p}$  (табл. №1, 2). В этом случае подсьема СКМ<sup>р</sup> р-типа согласует токовые асимметрии по выходам 3 и 4 ДК, структура которого по условиям технического задания не может изменяться для получения равенства  $I_3 = I_4$ .

Аналогично с помощью СКМ<sup>п</sup> п-типа при  $m=1$  можно согласовать асимметрию выходных токов  $I_3$  и  $I_4$ , достигающую значений  $(1-x)I_{6,n}$  (рис. 2а). Функции такого СКМ реализует в схеме, показанная на рис. 2б.





б)

Рис. 2. – Метод СКМ - n компенсации слабой токовой асимметрии вида  $(m-x)I_{6.n}$  по выходам 3 и 4 ДК (а) и устройство для его осуществления (б).

В общем случае для СКМ – n типа на p-n-p транзисторах допустимая асимметрия токов  $I_3$  и  $I_4$  ДК рис. 2а может достигать значений  $(m-x)I_{6.n}$ ,

$$\begin{cases} I_3 = mI_0 \\ I_4 = mI_0 + (m-x)I_{6.n} \end{cases} \quad (3)$$

где  $m$ - коэффициент пропорциональности ( $m = 1, 2, 3, 4, \dots$ ), характеризующий статические токи выходов 3 и 4 при  $\beta_n = \infty$ ,

$x$  – коэффициент пропорциональности устанавливающий численные значения тока двухполюсника  $I_5$  ( $x = 1, 2, 3, 4, \dots$ )

Если  $m=1$  то допустимая асимметрия токов  $I_3$  и  $I_4$  определяется уравнением:

$$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 + (1-x)I_{6.n} \end{cases} \quad (4)$$

За счет изменения параметра « $x$ », характеризующего источник опорного тока  $I_5$ , можно уменьшить  $U_{см}$  при неидентичностях токовых  $I_3$  и  $I_4$  в соответствии с таблицами № 3.

Влияние параметра «х» СКМ<sup>n</sup> - n-типа на компенсацию асимметрии токов I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub> вида (1 - x)I<sub>б.н</sub> в обобщенном дифференциальном каскаде при m=1.

Параметр «х» источника опорного тока I <sub>5</sub> =xI <sub>0</sub>	Допустимые значения токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>	Компенсируемая асимметрия токов I <sub>3</sub> , I <sub>4</sub>
x=1	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 \end{cases}$	$\Delta I_{3,4}=0$
x=2	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - I_{б.н} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -I_{б.н}$
x=3	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 2I_{б.н} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -2I_{б.н}$
x=4	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 3I_{б.н} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -3I_{б.н}$
x=5	$\begin{cases} I_3 = I_0 \\ I_4 = I_0 - 4I_{б.н} \end{cases}$	$\Delta I_{3,4} = -4I_{б.н}$

Таким образом, рассмотренный схемотехнический приём рекомендуется использовать в том случае, когда структура входного каскада ОУ [9, 10, 11] не подлежит модернизации для изменения её коэффициентов слабой токовой асимметрии. При этом введение СКМ<sup>p</sup> или СКМ<sup>n</sup> типов позволяет по другому, в отличии от [11], решить задачу минимизации U<sub>см</sub> при I<sub>3</sub> ≠ I<sub>4</sub>.

Статья подготовлена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ на НИР № 8.3383.2011 (ЮРГУЭС-02.12.ГЗ) «Теоретические основы проектирования нового поколения СФ-блоков систем связи, телекоммуникаций и технической диагностики на основе радиационно-стойких технологий (SiGe, АБМК\_1\_3/4 и др.)», выполняемой в 20122014гг.

### Литература

1. Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. Способ повышения стабильности нуля аналоговых микросхем с высокоимпедансным узлом в условиях температурных и радиационных воздействий [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем- 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 295-300

2. Пат. 2390918 Российская Федерация, МПК8 H03F 3/45, H03F 3/34. Прецизионный операционный усилитель [Текст] // Прокопенко Н.Н., Глушанин С.В., Будяков П.С.: заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса». – № 2009102889/09; заявл. 29.01.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 10с.: ил. (157)
3. Пат. 2390916 Российская Федерация, МПК8 H03F 3/45, H03F 1/34. Прецизионный операционный усилитель [Текст] // Прокопенко Н.Н., Будяков П.С., Глушанин С.В.: заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса». – № 2009103501/09; заявл. 02.02.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. – 10с.: ил. (160)
4. В.Г. Манжула, И.Б. Пугачев, Н.Н. Прокопенко Вариативный синтез схемы операционного усилителя с пониженным напряжением смещения [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1037> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. С.Г. Крутчинский, А.С. Исанин, Н.Н. Прокопенко, В.Г. Манжула Радиационно-стойкий измерительный усилитель на базе мультидифференциальных входных каскадов [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1045> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, Д.Н. Конев Архитектура аналоговых микросхем с повышенной стабильностью нулевого уровня в условиях температурных и радиационных воздействий [Текст] // Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – М.: ФГУП «НПП «Пульсар», 2009. – С. 29-31.
7. Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков, П.С. Будяков Компенсация напряжения смещения нуля операционных усилителей с несимметричным включением активной нагрузки [Текст] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, Телекоммуникации. Управление. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 3 (101). – С.196-200
8. Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, А.И. Серебряков Автономные параметры транзисторов базового матричного кристалла АБМК\_1\_3 в условиях радиационных и температурных воздействий [Текст] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2012. Сборник трудов /под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2012. – С. 294-297

9. N. N. Prokopenko, A. I. Serebryakov, D. N. Konev The BiFET-Technology Voltage Analog Multipliers Based on the Radiation Resistant ABMC «Integral» // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON–2009). Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter&Student Branch. Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – P.P. 244-248.

10. Close, J., "High speed op amps: Performance, process and topologies," Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), 2012 IEEE , vol., no., pp.1,8, Sept. 30 2012-Oct. 3 2012 doi: 10.1109/BCTM.2012.6352648

11. Н.Н. Прокопенко, А.И. Серебряков Архитектура и схемотехника операционных усилителей. Методы снижения напряжения смещения нуля в условиях температурных и радиационных воздействий: монография [Электронный ресурс] // Изд-во: LAMBERT Academic Publishing. – 2013. 127с .– Режим доступа: <http://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/es/book/978-3-659-34664-4/Архитектура-и-схемотехника-операционных-усилителей> . – Яз. рус.