

порядка. Из анализа формул (2) и (6) следует, что на единицу порядка ФНЧ или ФВЧ для данного метода приходится 1 синус или косинус, 8 сложений, 12 умножений и 0,5 делений. Для фильтра порядка  $n$  эти значения умножаются на  $n$ .

**Заключение.** Таким образом, данная методика позволяет достаточно просто синтезировать управляемые цифровые фильтры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры: расчет и реализация. – М.: Мир, 1982. – 452 с.
2. Турулин И.И. Управляемые цифровые фильтры. Технолог. ин-тут. Южн. федерал. ун-та, Таганрог, 2009. – 260 с. – Библиогр. 22 назв. – Рус. Деп. в ВИНТИ 18.06.09. № 383-B2009.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Н. Долгов.

**Турулин Игорь Ильич**

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: turulin59@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371638.

Кафедра автоматизированных систем научных исследований и экспериментов; профессор.

**Булгакова Юлия Ивановна**

E-mail: sunshine\_yu@mail.ru.

Тел.: 88634673641.

Аспирантка.

**Turulin Igor' P'ich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: turulin59@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371638.

The Department of Automated Research Systems; Professor.

**Bulgakova Uyliya Ivanovna**

E-mail: sunshine\_yu@mail.ru.

Phone: +78634673641.

Postgraduate Student.

УДК 621.372

**А.Е. Титов**

### **ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С МИНИМАЛЬНЫМ ДРЕЙФОМ НУЛЯ**

*Рассматриваются результаты проектирования структурно оптимальной принципиальной схемы двухканального инструментального усилителя. Показано, что использование мультидифференциальных операционных усилителей позволяет минимизировать дрейф нуля инструментального усилителя и влияние резистивных элементов на коэффициент ослабления синфазного сигнала при заданном дифференциальном коэффициенте усиления. Приводятся результаты моделирования принципиальной схемы в среде PSpice, реализованной на базе компонентов радиационно стойкого АБМК.*

*Инструментальный усилитель; минимальный дрейф нуля; коэффициент ослабления синфазного сигнала.*

А.Е. Titov

## TWO-CHANNEL INSTRUMENTATION AMPLIFIER WITH MINIMUM DRIFT OF ZERO

*Results of designing of structurally optimum circuit of the two-channel instrumentation amplifier are considered. It is shown that use of multidifferential operational amplifiers allows to minimize drift of zero of the instrumentation amplifier and influence of resistive elements on common-mode rejection ratio at the set differential gain coefficient. Results of modeling of the circuit in the environment of PSpice, realized on the basis of components immune to radiation ABMC are resulted.*

*The instrumentation amplifier; the minimum drift of zero; common-mode rejection ratio.*

**Введение.** Создание смешанных систем на кристалле (СнК) связано в первую очередь с построением аналоговых интерфейсов, обеспечивающих связь системы с первичными преобразователями (чувствительными элементами). Такие интерфейсы должны обеспечивать прецизионное выделение дифференциальных сигналов этих преобразователей, их масштабирование и ограничение спектра. Достаточно большой динамический диапазон измеряемых величин и относительно высокая точность преобразования предопределили использование в таких интерфейсах прецизионных операционных усилителей (ОУ) и резисторов, которые в конечном итоге и определяют предельный коэффициент ослабления синфазного напряжения (Ксн) и дрейф нуля инструментального усилителя (ИУ). Для обеспечения этого коэффициента на уровне – 60 дБ и дрейфа нуля не хуже 100 мкВ необходимо использовать технологическую “подгонку” этих резисторов [1]. Поэтому поиск альтернативных вариантов решения этой задачи приобретает важное практическое значение.

**Анализ классической структуры инструментального усилителя.** Для аналого-цифровых интерфейсов с высокорядными АЦП, кроме высокого коэффициента ослабления синфазного сигнала, необходимо, чтобы инструментальный усилитель также обладал низким напряжением дрейфа нуля, но классическая реализация ИУ характеризуется существенным дрейфом нуля на выходе. Структурно минимизировать дрейф нуля ИУ можно, используя схему инструментального усилителя с двухканальным сумматором (рис. 1).

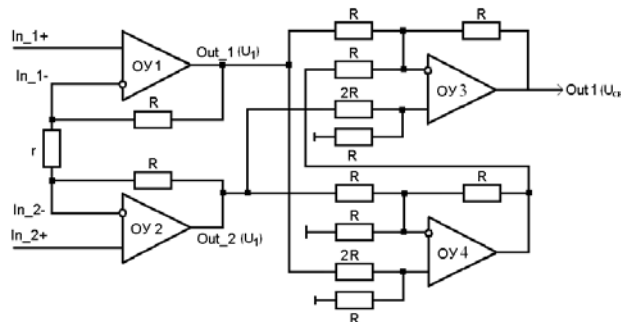


Рис. 1. Низкодрейфовый инструментальный усилитель

Анализ схемы усилителя приводит к следующим результатам:

$$K_{\text{сн}} = \frac{K_{\text{сн}}}{\mu} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta r}{r}, \quad (1)$$

$$K_d = -2\left(1 + 2\frac{R}{r}\right), \quad f_{гр} = \frac{f_1}{K_d}, \quad (2)$$

$$U_{др} = U_{дрОУ3} + U_{дрОУ2} - U_{дрОУ1} - (U_{дрОУ4} + U_{дрОУ1} - U_{дрОУ2}), \quad (3)$$

где  $K_{cc}$  – коэффициент передачи синфазного сигнала ОУ3,  $\mu$  – статический коэффициент усиления ОУ3,  $\frac{\Delta R}{R}$  и  $\frac{\Delta r}{r}$  – относительная погрешность сопротивления резисторов,  $f_{гр}$  и  $f_1$  – граничная частота инструментального усилителя и частота единичного усиления ОУ1 и ОУ2,  $U_{дри}$  – величина дрейфа нуля  $i$ -го усилителя.

Таким образом, как видно из уравнения (3), при идентичности ОУ дрейф нуля схемы параметрически минимизируется. Действительно, при  $K_d \gg 1$  и точной реализации резистивных элементов:

$$U_{др} = \frac{K_d}{2}(E_{см2} - E_{см1} + (\alpha_{см2} - \alpha_{см1})\Delta t) + 3(E_{см3} - E_{см4} + (\alpha_{см3} - \alpha_{см4})\Delta t), \quad (4)$$

где  $E_{см2}$  – ЭДС смещения  $i$ -го операционного усилителя,  $\alpha_{смi}$  – коэффициент температурного дрейфа  $i$ -го усилителя,  $\Delta t$  – приращение температуры.

Поэтому предельно низкий дрейф нуля инструментального усилителя обеспечивается за счет идентичности пар ОУ и точной реализации резистивных элементов в сумматорах ИУ, именно поэтому для обеспечения минимального значения дрейфа нуля усилителя необходимо использовать дорогостоящую функциональную настройку резистивных элементов в схеме.

В данной работе представлен альтернативный вариант инструментального усилителя, при проектировании которого с помощью эффективных схемотехнических решений, основанных на введении дополнительных обратных связей [2], создан относительно новый класс активных элементов – мультидифференциальных ОУ (МОУ) [3], что и позволяет исключить резистивные элементы из сумматоров ИУ.

**Реализация двухканального инструментального усилителя.** Если в структуре низкодрейфового классического инструментального усилителя сумматор реализовывать на базе двух симметрично работающих МОУ, как это показано на рис. 2, то такая схема будет характеризоваться низким значением дрейфа нуля, практически не зависящим от изменения резистивных элементов схемы. Это утверждение подтверждается следующим выражением:

$$U_{др} = U_{дрOut2} - U_{дрOut1}, \quad (5)$$

где

$$U_{дрOut1} = U_{дрМОУ1} - U_{дрОУ1} + U_{дрОУ2}, \quad (6)$$

$$U_{дрOut2} = U_{дрМОУ2} - U_{дрОУ2} + U_{дрОУ1}, \quad (7)$$

тогда

$$U_{др} = U_{дрМОУ2} - U_{дрМОУ1}. \quad (8)$$

Таким образом, как видно из уравнения (8), при идентичности активных элементов дрейф нуля схемы параметрически минимизируется. Действительно,

$$U_{др} = E_{смМОУ2} - E_{смМОУ1} + (\alpha_{E_{смМОУ2}} - \alpha_{E_{смМОУ1}}). \quad (9)$$

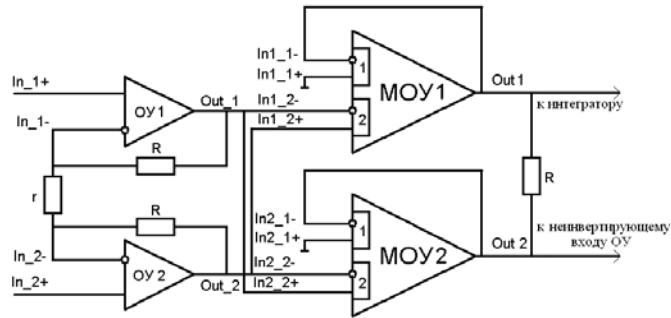


Рис. 2. Инструментальный усилитель с минимальным дрейфом нуля

Поэтому предельно низкий дрейф нуля двухканального инструментального усилителя обеспечится за счет идентичности МОУ и не зависит от соотношения резистивных элементов в схеме.

Такой ИУ обладает высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала, который, как будет показано ниже, слабо зависит от резистивных элементов схемы, при реализации необходимого дифференциального коэффициента усиления.

Если ОУ и МОУ реализовать на компонентах радиационно-стойкого аналогового базового матричного кристалла АБМК [4], то анализируемый ИУ будет характеризоваться высокой радиационной стойкостью при сохранении относительно высоких качественных показателей.

Область применения инструментального усилителя ограничивается необходимостью использования его с устройствами, имеющими так называемую виртуальную “землю”. К ним относятся устройство выборки хранения (УВХ) и интегратор, входящий в состав АЦП.

Результаты моделирования схемы, реализованной на АБМК, в среде PSpice представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры двухканального инструментального усилителя**

| Параметр | $K_{сн}$ | $f_{гр\_сн}$ | $U_{гр\_сн}$ | $U_{гр\_д}$ | $K_{д}$ | $f_{гр\_д}$ | $U_{др}$    |
|----------|----------|--------------|--------------|-------------|---------|-------------|-------------|
| Схема    | дБ       | МГц          | В            | мВ          | дБ      | МГц         | мкВ         |
| рис. 2   | -234     | 1,88         | -4,9<br>5    | -50<br>450  | 15,43   | 1,88        | $\geq 10^2$ |

Примечание:  $K_{сн}$  – коэффициент ослабления синфазного сигнала,  $f_{гр\_сн}$  – граничная частота коэффициента ослабления синфазного сигнала,  $U_{гр\_сн}$  и  $U_{гр\_д}$  – граничные напряжения при подаче синфазного и дифференциального сигнала соответственно,  $K_{д}$  – дифференциальный коэффициент усиления,  $f_{гр\_д}$  – граничная частота дифференциального коэффициента усиления,  $U_{др}$  – дрейф нуля инструментального усилителя, шина питания  $\pm 5$  В, потребляемый ток 10 мА.

Двухканальный инструментальный усилитель, как следует из табл. 1, обладает высоким коэффициентом ослабления синфазного сигнала и низким значением дрейфа нуля. Важным параметром ИУ является стабильность его дифференциального коэффициента усиления. Эта погрешность обусловлена изменением сопро-

тивлений резисторов схемы и основных параметров ОУ. Действительно, для дифференциального коэффициента усиления справедливо соотношение

$$K_d = \frac{K_{ди}}{1 + (\frac{1}{\mu} + \frac{p}{\Pi})K_{ди}}, K_{ди} = 2(1 + 2\frac{R}{r}), \quad (10)$$

где  $K_{ди}$  – идеальный дифференциальный коэффициент передачи инструментального усилителя,  $\Pi = 2\pi f_1$  – площадь усиления ОУ.

Тогда чувствительность дифференциального коэффициента передачи к параметрам ОУ определится следующими соотношениями:

$$S_{f_1}^{K_d} = K_d \frac{\Delta f}{f_1}, S_{\mu}^{K_d} = -\frac{K_{ди}}{\mu}, \quad (12)$$

где  $\Delta f$  – диапазон рабочих частот ИУ, а чувствительность дифференциального коэффициента усиления к изменению пассивных элементов схемы равна

$$S_{R^k}^{K_d} = S_{R^{ди}}^{K_{ди}} = -S_r^{K_{ди}} = -S_r^{K_{ди}} \approx 1. \quad (13)$$

Таким образом, максимальное значение реализуемого дифференциального коэффициента передачи определяется относительными погрешностями изменения резистивных элементов схемы ( $\Theta_R$ ) и относительными погрешностями параметров усилителя ( $\Theta_{f_1}, \Theta_{\mu}$ ). Введем  $\delta = K_{ди}/\mu \leq 0,1$ , тогда максимальное значение дифференциального коэффициента усиления  $K_{dmax} \leq \delta\mu$ ,  $K_{dmax} \leq \delta\Delta f/f_1$  определяется равенством вкладов пассивных и активных элементов. Так, для технологии АБМК можно считать, что  $\Theta_{\mu} \approx \Theta_{f_1} \approx 10 \cdot \Theta_R$ , поэтому  $\delta \leq 0,1$ . Результаты моделирования рассмотренной схемы приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Дифференциальный коэффициент усиления двухканального ИУ**

| г, Ом | Кд  | Кди | $\delta, \%$ | Uгр+, мВ | Uгр-, мВ | Uдр, мкВ    | Ксн, дБ | fгр, кГц |
|-------|-----|-----|--------------|----------|----------|-------------|---------|----------|
| 80    | 450 | 500 | 10           | +50      | -50      | $\geq 10^2$ | -199    | 227      |
| 134   | 228 | 300 | 7,3          | +50      | -50      | $\geq 10^2$ | -205    | 390      |
| 408   | 97  | 100 | 3,5          | +50      | -50      | $\geq 10^2$ | -205    | 1400     |
| 833   | 49  | 50  | 2,4          | +50      | -100     | $\geq 10^2$ | -205    | 3000     |

Исследование влияния радиационного воздействия на качественные показатели инструментального усилителя с указанными в табл. 1 параметрами проводилось с помощью метода Monte Carlo в среде PSpice (табл. 3 и рис. 3).

Таблица 3

**Изменение параметров двухканального ИУ в условиях радиационного воздействия**

| Параметр | $K_{сн}$ | $f_{гр\_сн}$ | $U_{гр\_сн}$ | $U_{гр\_д}$ | $K_d$ | $f_{гр\_д}$ | $f_{фчх}$ |
|----------|----------|--------------|--------------|-------------|-------|-------------|-----------|
|          | дБ       | Гц           | В            | мВ          | дБ    | МГц         | МГц       |
| Схема    | -133     | 40           | -1,3         | -50         | 15,9  | 2           | 2         |
| рис. 2   | -170     | 40           | 5            | 450         | 14,5  | 2           | 2         |

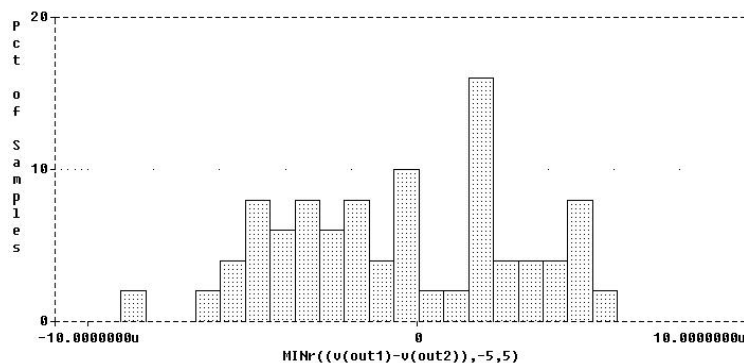


Рис. 3. Дрейф нуля инструментального усилителя при изменении сопротивлений резисторов схемы

Таким образом, как видно из приведенных выше результатов, разработанный двухканальный инструментальный усилитель обладает высокими качественными показателями, включая дифференциальный коэффициент передачи и низкий дрейф нуля ( $\leq \pm 9$  мкВ), которые практически не зависят от изменения сопротивлений резистивных элементов схемы.

Как показал детальный анализ, указанное в табл. 3 изменение параметров инструментального усилителя связано с погрешностью сопротивлений резисторов во входных дифференциальных каскадах МОУ и ОУ, поэтому дальнейшее совершенствование схемы ИУ возможно путем изменения способов задания режимов работы в каскадах ОУ и МОУ и созданием специальных источников тока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титов А.Е.* Двухканальные прецизионные инструментальные усилители для радиационно-стойких систем на кристалле // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 1 (102). – С. 64-70.
2. *Крутчинский С.Г., Нефедова А.В.* Структурная оптимизация дифференциальных каскадов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 7 (84). – С. 41-48.
3. *Крутчинский С.Г., Старченко Е.И.* Мультидифференциальные операционные усилители и прецизионная микросхемотехника // Сборник трудов МНПС “Проблемы современной аналоговой микросистемотехники”. – 2003. – С. 125-137.
4. *Дворников О.В., Чеховский В.А.* Аналоговый биполярно-полевой БМК с расширенными функциональными возможностями // Chip News. – 1999. – № 2. – С. 21–24.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчинский.

#### **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, Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371773.

Кафедра систем автоматического управления; 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, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371773.

Department of Automatic Control Systems; Postgraduate Student.