

## Архитектурные и схемотехнические методы улучшения радиационно-чувствительных характеристик операционного усилителя класса LM124 для использования в космической аппаратуре

*А.А. Лебедев, В.А. Комлева, Н.М. Яковлева*

*В настоящей работе рассматриваются схемотехнические методы улучшения точностных и SET характеристик операционного усилителя класса LM124 путём параллельного соединения двух входных дифференциальных каскадов и подачи на их входы двухпетлевой отрицательной обратной связи.*

**Ключевые слова:** дифференциальный каскад, операционный усилитель, отрицательная обратная связь, коэффициент ослабления синфазного сигнала.

## Architectural and circuit design techniques improving radiation-sensitive characteristics of the LM124 operational amplifier class used in space equipment

*A.A. Lebedev, V.A. Komleva, N.M. Yakovleva*

*The circuit design methods improving the accuracy and SET characteristics of the LM124 class operational amplifier by parallel connection of two differential input stages and feeding on their inputs the double-loop negative feedback are considered in this paper.*

**Keywords:** differential stage, operational amplifier, negative feedback, common-mode rejection ratio.

Промышленные интегральные схемы (ИС) операционных усилителей (ОУ) LM124 широко используются в электронных системах космического назначения, так как имеют хорошие точностные характеристики (низкие входные токи (~35 нА), высокий коэффициент усиления (~100 дБ) и низкое потребление тока (менее 500 мкА)). Его основным достоинством является большой входной динамический диапазон ( $\pm E_n$ ) и возможность работы как от однополярного (0÷30 В), так и двухполярного ( $\pm 15$  В) источников питания. К недостаткам ОУ LM124 следует отнести: небольшой запас по фазе ( $36^\circ$ ), что приводит к колебаниям прямоугольного сигнала на выходе ОУ в режиме повторителя; невысокий коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС) (85÷90 дБ) и уязвимость к действию тяжелой заряженной частицы (ТЗЧ) (SET – single event transient - 5÷10 мкс) [1, 2, 3].

Большинство зарубежных и отечественных работ посвящены исследованию эффекта низкой интенсивности дозы (ELDRS – Enhanced Low Dose-Rate Sensitivity), который проявляется в условиях космического пространства. Этот эффект приводит к деградации

характеристик биполярных ОУ, в частности, к возрастанию входных токов и напряжения смещения нуля, что связано с падением коэффициента передачи базового тока биполярного транзистора [2].

$$\beta = I_k / I_b, \quad (1)$$

где  $I_k$  – ток коллектора,  $I_b$  – ток базы. Причиной уменьшения коэффициента  $\beta$  является встраивание поверхностных состояний  $N_t$  на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> в области базы. Из этого следует, что деградация  $\beta$  будет зависеть от конфигурации транзистора и его топологии. В частности, в [2] показано, что наименьшая деградация характерна для вертикальных биполярных pnp-транзисторов [4-6], а наибольшая – для боковых (lateral). Отмечено, что при 500 крад (Si), для вертикальных биполярных транзисторов, максимальное значение  $\beta$  в зависимости от напряжения база-эмиттер  $U_{бэ}$  составляет около 70 % от значения до облучения и 40 % – для боковых транзисторов [2]. При подключении источника входного сигнала с внутренним сопротивлением  $R_r$  за счёт увеличения входного тока

происходит сдвиг выходного напряжения и в конечном итоге – нарушение работы ОУ. Поэтому, для уменьшения эффекта ELDRS, ОУ изготавливается с очень низкими входными токами с тем, чтобы уменьшить сдвиг выходного напряжения [1, 2]. В общем случае напряжение смещения нуля по постоянному току можно выразить следующим соотношением:

$$U_{\text{вых}} = (I_{\text{см}} \Delta R_e + I_p R_e + U_{\text{см}}) K_{\text{дд}}, \quad (2)$$

где ток смещения  $I_{\text{см}}$  – это полусумма входных базовых токов, а  $I_p$  – их разность,  $U_{\text{см}}$  – разность напряжений эмиттер-база входных транзисторов со связанными эмиттерами,  $K_{\text{дд}}$  – коэффициент усиления для дифференциального сигнала. Из приведённой формулы (2) следует необходимость уменьшения входных токов для снижения напряжения сдвига на выходе.

Напряжение сдвига на выходе по переменному току можно описать следующим упрощённым соотношением:

$$\Delta U_{\text{вых}} = K_{\text{дд}} \left( \Delta U_{\text{вх.д}} + \frac{\Delta U_{\text{вх.сф}}}{K_{\text{дс}}} \right), \quad (3)$$

где  $\Delta U_{\text{вх.д}}$ ,  $\Delta U_{\text{вх.сф}}$  – дифференциальная и синфазная составляющие входного сигнала,  $K_{\text{дс}}$  – коэффициент передачи (преобразования) входного синфазного сигнала в дифференциальный.

Качество дифференциального каскада оценивается коэффициентом ослабления (подавления) синфазного сигнала КОСС:

$$\frac{1}{\text{КОСС}} = \Delta \mu = \mu_{\text{ср}} \frac{\Delta \mu}{\mu_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где  $\mu_{\text{ср}} \frac{1}{W} \left( \frac{dW}{dU_{\text{кб}}} \right) = 5 \times 10^{-4}$ ,

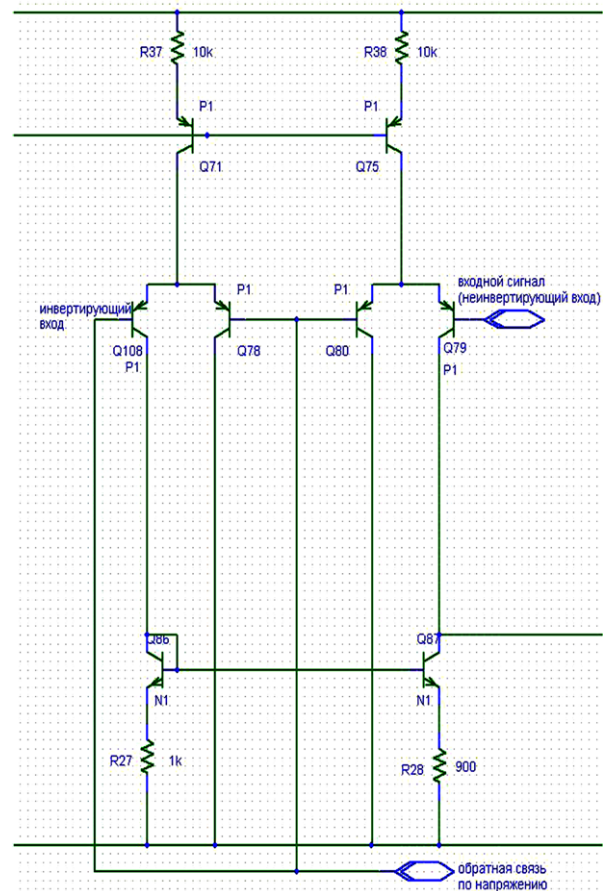
$$\frac{\Delta \mu}{\mu_{\text{ср}}} = \frac{\Delta U_{\text{кб}}}{U_{\text{кб}}},$$

$$\Delta U_{\text{кб}} = \Delta U_{\text{кб1}} - \Delta U_{\text{кб2}},$$

$$\frac{1}{\text{КОСС}} = 5 \times 10^{-5}.$$

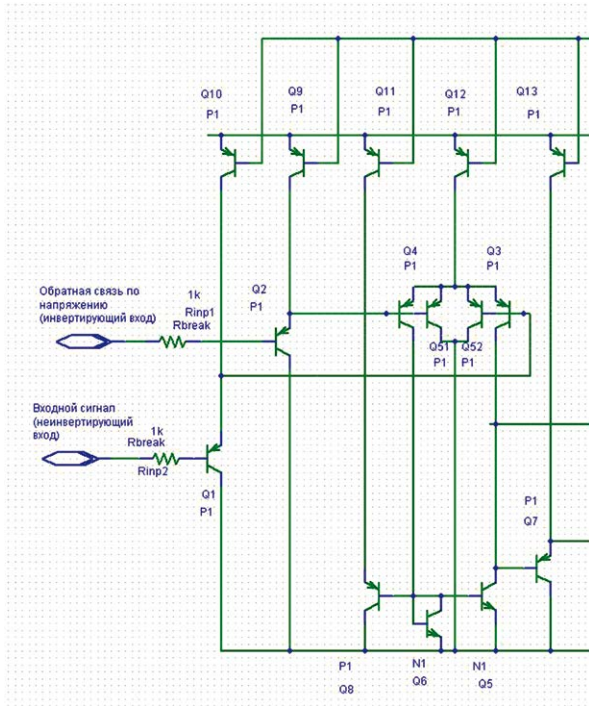
Таким образом, основной вклад в КОСС вносит разброс ширин баз входной дифференциальной пары.

В настоящей работе рассматриваются архитектурные и схемотехнические методы [7, 8] построения входных дифференциальных каскадов путём параллельного соединения двух входных дифференциальных каскадов и подачи на их входы двухпетлевой отрицательной обратной связи (ООС) (рис. 1а) с целью улучшения радиационно-чувствительных характеристик (уменьшение входных токов, повышение КОСС), а также сокращение SET при воздействии ТЗЧ.



**Рис. 1а**

Упрощённая схема предложенного ДК с двойной петлей обратной связи

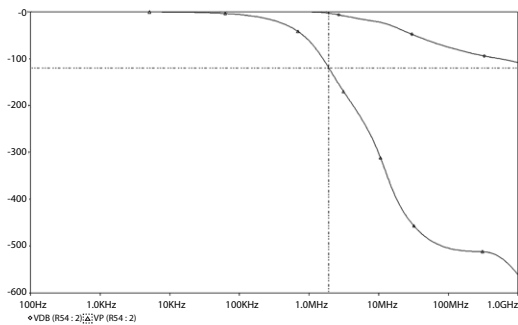


**Рис. 16**

Схема входного ДК операционного усилителя LM124

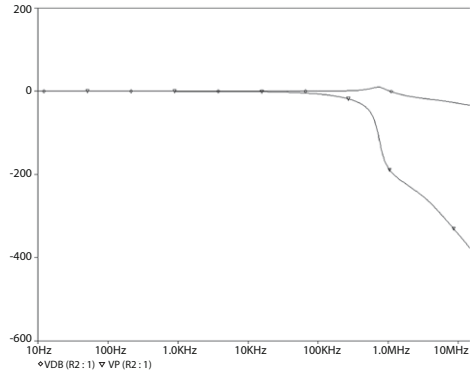
Если заменить входной ДК ОУ LM124 на предложенный ДК с двойной петлёй обратной связи, становится возможным улучшить, сохраняя при этом режимные токи, следующие характеристики усилителя:

1. За счёт разнесения первого и второго полюса устойчивость операционного усилителя повышена более чем на порядок по сравнению с аналогичным решением в ОУ LM124: запас по фазе составляет  $70^\circ$  при той же ёмкости коррекции, что и в стандартной схеме:  $c_x \approx 5$  пФ (рис. 2а), при этом на АЧХ нет выброса на частоте 1 МГц, в отличие от зарубежного аналога (рис. 2б).



**Рис. 2а**

Диаграмма Бode в режиме повторителя разработанного ОУ с предложенным ДК с двойной петлёй обратной связи на входе (полоса пропускания 1,9 МГц, запас по фазе  $70^\circ$ )



**Рис. 2б**

Диаграмма Бode ОУ LM124 (полоса пропускания 1 МГц, запас по фазе  $36^\circ$ , виден выброс на АЧХ)

2. Входные токи разработанного ОУ сохранены такие же, как и в ОУ LM124, а разностный входной ток при этом снижен в 3-5 раз.

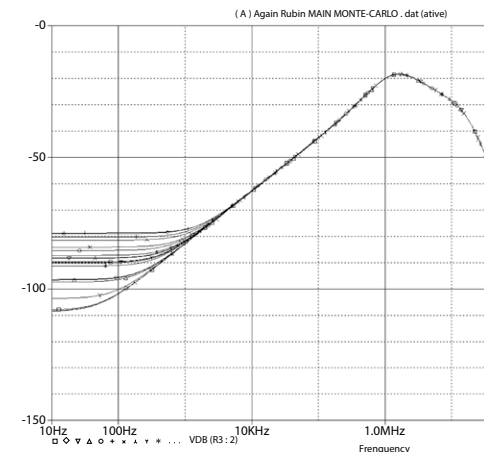
3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала повышен почти на порядок по сравнению с аналогом (рис. 3), а напряжение смещения нуля улучшено до  $0,5 \pm 0,8$  мВ.

Моделирование коэффициента КОСС проводилось с помощью метода Монте-Карло с учётом разбросов следующих величин параметров:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu_{cp}} = \pm 0,1; \quad \frac{\Delta\beta}{\beta} = \pm 0,1; \quad \frac{\Delta r_s}{r_s} = \pm 0,1.$$

Основной вклад в величину КОСС вносит разброс  $\frac{\Delta\mu}{\mu_{cp}}$ , затем  $\frac{\Delta r_s}{r_s}$  и  $\frac{\Delta\beta}{\beta}$ .

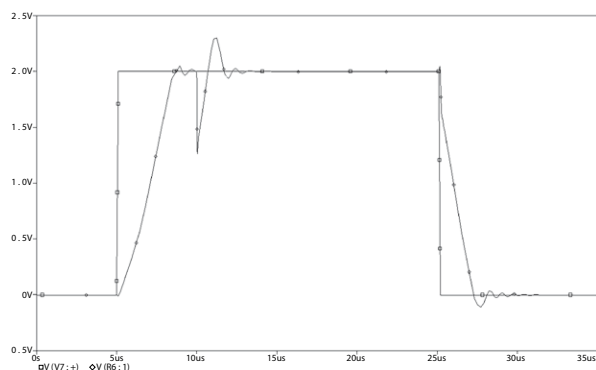
Из рис. 3 следует, что минимальное и типовое значения улучшены на 8 и 12 дБ соответственно.



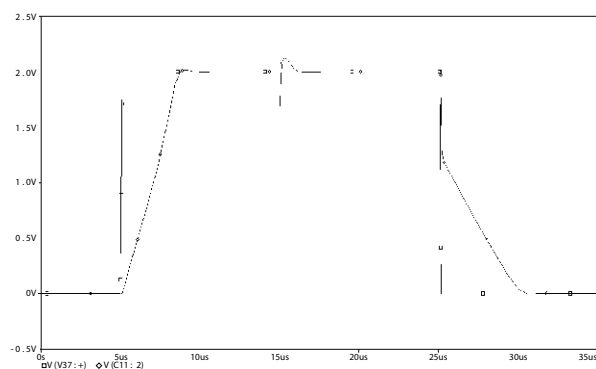
**Рис. 3**

Диаграмма Бode разработанного усилителя при подаче синфазного сигнала  $\diamond$  - минимальное значение КОСС равно 78 дБ (LM124 – 70 дБ);  $\Delta$  - типовое значение КОСС равно 97 дБ (LM124 – 85 дБ)

4. Уменьшено время отклика на воздействие ТЗЧ в 2-4 раза (рис. 4б) при сохранении скорости нарастания выходного сигнала (длительность SET для разработанного ОУ 1 мкс, для LM124 – 4 мкс).



а)



б)

**Рис. 4**

Переходная характеристика LM124 (а) и переходная характеристика разработанного ОУ (б)

### **Заключение**

Для улучшения точностных характеристик (увеличения КОСС, уменьшения напряжения смещения нуля и разности входных токов) предлагается использовать новую архитектуру ОУ класса LM124 с двумя петлями отрицательной обратной связи, одна из которых подаётся в точку соединения двух параллельно включённых входных дифференциальных каскадов; данная архитектура также позволяет уменьшить длительность SET в несколько раз.

### **Литература**

1. R. L. Pease, R. D. Schrimpf, D.M. Fleetwood ELDRS in Bipolar Linear Circuits: A Review // IEEE Transactions on Nucl. Sci. – August 2009. – Vol. 56. – N 4. – P. 1894-1908.
2. Лебедев А. А. Повышение радиационной стойкости операционного усилителя класса LM124 схемотехническими методами / А. А. Лебедев, А. С. Бакеренков, В. И. Диденко, М. С. Горбунов // Вопросы атомной науки и техники. – Москва. – 2013. – С. 44-49.
3. Дроздов Д. Г. Особенности использования самосовмещения в комплементарной биполярной технологии / Д. Г. Дроздов, Е. М. Савченко // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2011. – № 2. – С. 53-58.
4. Дроздов Д. Г. Результаты приборно-технологического моделирования комплементарной биполярной технологии с граничной частотой 10 ГГц и более / Д. Г. Дроздов, Е. М. Савченко, А. М. Зубков // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)". Сборник трудов. – 2010. – № 1. – С. 66-69.
5. Виноградов Р. Н. Исследование деградации параметров интегральных микросхем операционных усилителей при воздействии ионизирующего излучения космического пространства / Р. Н. Виноградов, Э. Н. Вологдин, П. А. Дюканов, С. В. Корнеев, Е. М. Савченко, Д. С. Смирнов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2012. – № 2 (229). – С. 28-33.
6. Prokopenko N. N., Budyakov A. S., Savchenko E. M., Korneev S. V. Maximum ratings of voltage feedback and current feedback operational amplifiers in linear and nonlinear modes // 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, ECCSC '08 sponsors: Romanian Ministry of Education. Bucharest. – 2008. – С. 205-210.
7. Савченко Е. М. Методы обеспечения высокой динамической точности обработки сигнала в операционных усилителях с токовой обратной связью // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – № 2. – С. 83-92.