

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (ИППМ РАН)**

Библиотека схемотехнических решений

**BiJFet мультидифференциальный операционный усилитель с парафазным
выходом для работы в условиях проникающей радиации: модификация
МОУ-П-1**

Пахомов И.В., ilyavpakhomov@gmail.com,

Бутырлагин Н.В., nbutyrlagin@mail.ru,

Титов А.Е., alex.evgeny.titov@gmail.com,

Коваль Н.С., Вяликов И.Л.

Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в
экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского государственного
технического университета (г. Ростов-на-Дону)

**1. Области применения мультидифференциального операционного
усилителя**

Предлагаемый мультидифференциальный операционный усилитель (МОУ) предназначен для работы в аналоговых и аналого-цифровых устройствах систем связи, автоматики и приборостроения. Его применение позволяет по-другому (в отличие от классических ОУ) решать проблемы преобразования сигналов [1-4]. В настоящей работе рассматривается схемотехника и результаты компьютерного моделирования BiJFet МОУ с парафазным выходом, предназначенного для работы в структуре радиационно-стойких и низкотемпературных инструментальных усилителей [4] (BiJFet-биполярно-полевой техпроцесс, АО «НПП «Пульсар», г. Москва, АО «Интеграл», г. Минск [5,6]). Электрическая схема предлагаемого МОУ, представлена на рис. 1.

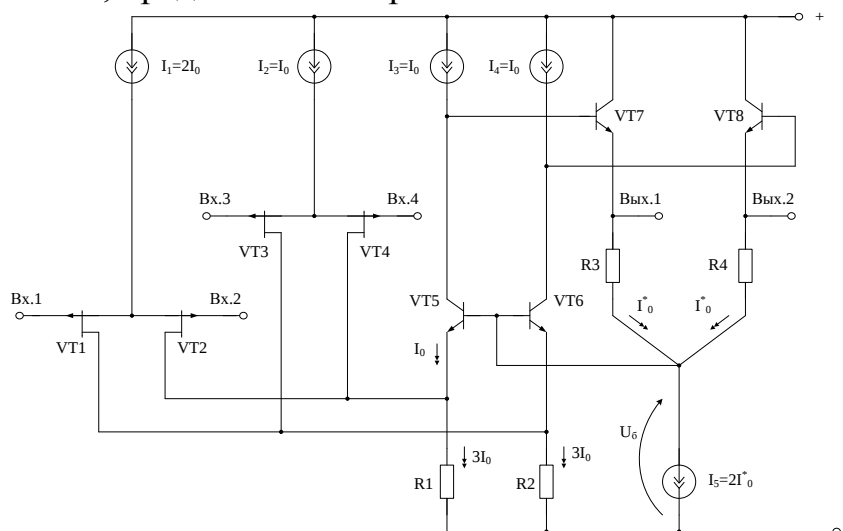


Рис. 1 Схема МОУ на базе компонентов BiJFET базового матричного кристалла
АБМК-1.3

Практическая реализация схемы рис. 1 может быть осуществлена (при определенной доработке) в рамках других технологий: TSMC (BiCMOS), SiGe (IHP, Германия), NHGRACE SoI (кремний на изоляторе), H10-CMOS090_LP (АО «Микрон», г. Зеленоград), комплементарный биполярный техпроцесс (АО «НПП Пульсар», г. Москва) и др.

2. Описание схемы МОУ

Мультидифференциальный операционный усилитель (рис.1) включает:

- входы (Вх.1 Вх.4) и выходы (Вых.1-Вых.2) устройства,
- входные дифференциальные каскады (VT1-VT2, VT3-VT4),
- промежуточный каскад (VT5-VT6),
- выходной каскад (VT7-VT8),
- источники опорного тока (I_1 - I_5).

Входные дифференциальные каскады МОУ выполнены на JFet транзисторах VT1-VT4. Статический режим МОУ рис. 1 устанавливается источниками опорного тока I_1 - I_5 , которые могут изменяться в широких пределах (единицы микроампер –единицы миллиампер).

Схемотехника источников опорного тока (ИОТ) может предусматривать стабилизацию их режимов работы при увеличении базовых токов транзисторов VT5-VT8 при воздействии радиации и функционировании ИОТ в расширенном температурном диапазоне.

Исследование показало, что статическое выходное напряжение в данной схеме $U_{\text{вых}} \approx -5$ мВ, его изменение слабо зависит от воздействия потока нейтронов и температуры и изменяется в диапазоне приблизительно 0.5 мВ. Статические выходные напряжения относительно общей шины усилителя имеет сильную зависимость от температуры.

Коэффициент усиления МОУ без обратной связи равен $K_y \approx 40$ дБ. Верхняя граничная частота – $f_b \approx 2.1$ МГц.

3. Компьютерное моделирование мультидифференциального операционного усилителя

В частном случае схема МОУ рис. 1 исследовалась в среде Orcad.9.2 на моделях библиотеки транзисторов базового матричного кристалла АБМК_1.3_rad. (ОАО «ИНТЕГРАЛ», г. Минск)



Рис. 2 Графическое изображение n-p-n и p-n-p транзисторов АБМК_1.3_rad

На рис. 3 показана схема МОУ в среде Orcad9.2.

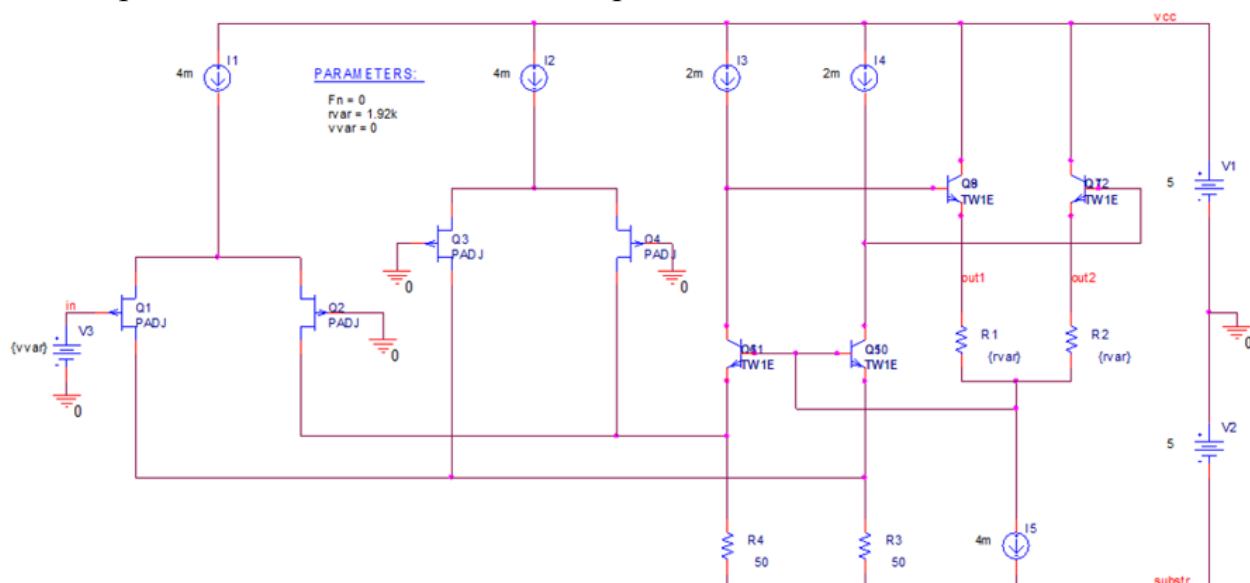


Рис. 3 Схема МОУ (рис. 1) в среде Orcad.9.2 на моделях транзисторов АБМК_1.3_rad

4. Ожидаемые параметры и характеристики МОУ

На рис.4 - рис.11 приведены характеристики мультидифференциального операционного усилителя (рис. 3).

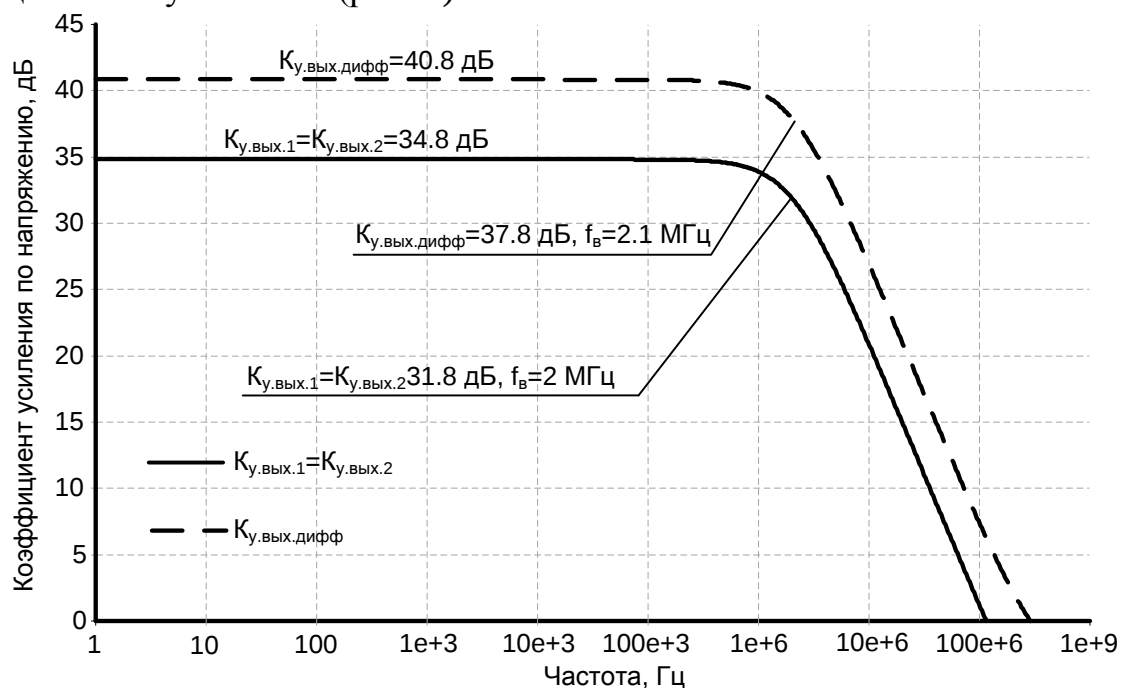


Рис. 4 – АЧХ коэффициента усиления по напряжению МОУ для каждого из выходов ($K_{у,вых.1} = K_{у,вых.2}$) и для дифференциального выхода ($K_{у,вых.дифф}$).

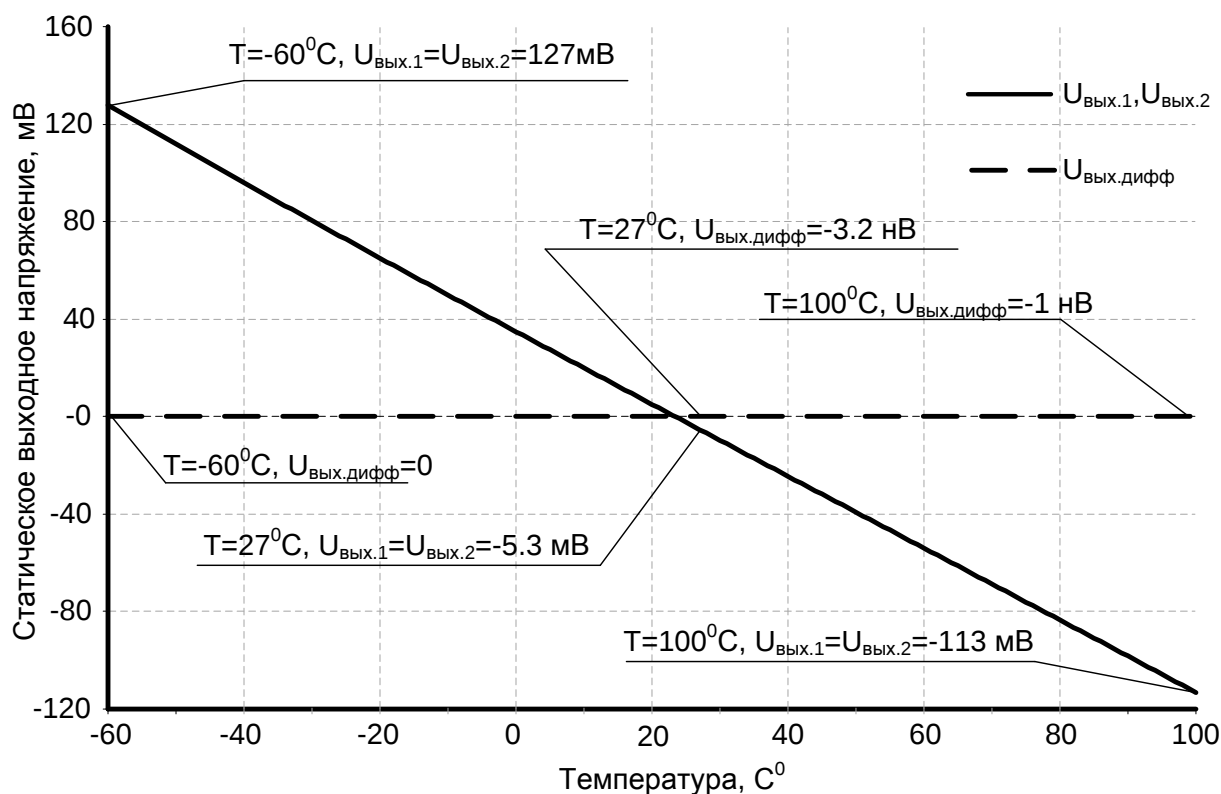


Рис. 5 – Зависимость выходных статических напряжений ($U_{\text{вых.1}} = U_{\text{вых.2}}$) и дифференциального статического выходного напряжения ($U_{\text{вых.дифф}}$) МОУ от температуры

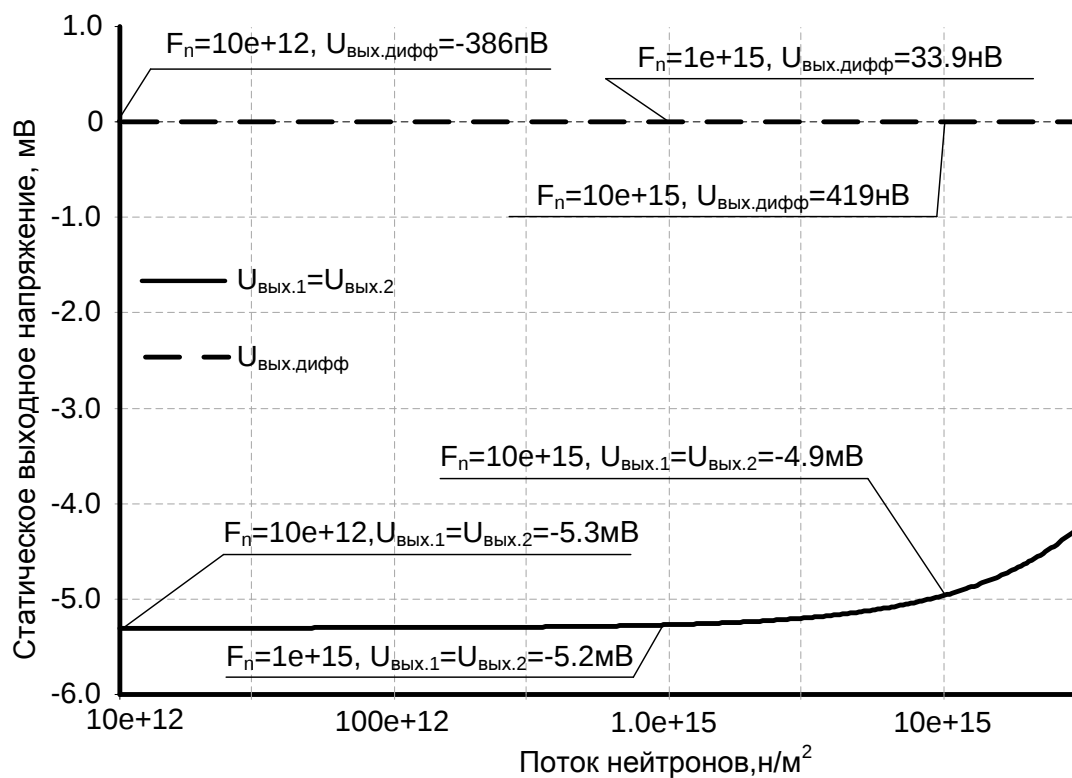


Рис. 6 – Зависимость выходных статических напряжений ($U_{\text{вых.1}} = U_{\text{вых.2}}$) и дифференциального статического выходного напряжения ($U_{\text{вых.дифф}}$) МОУ от потока нейтронов

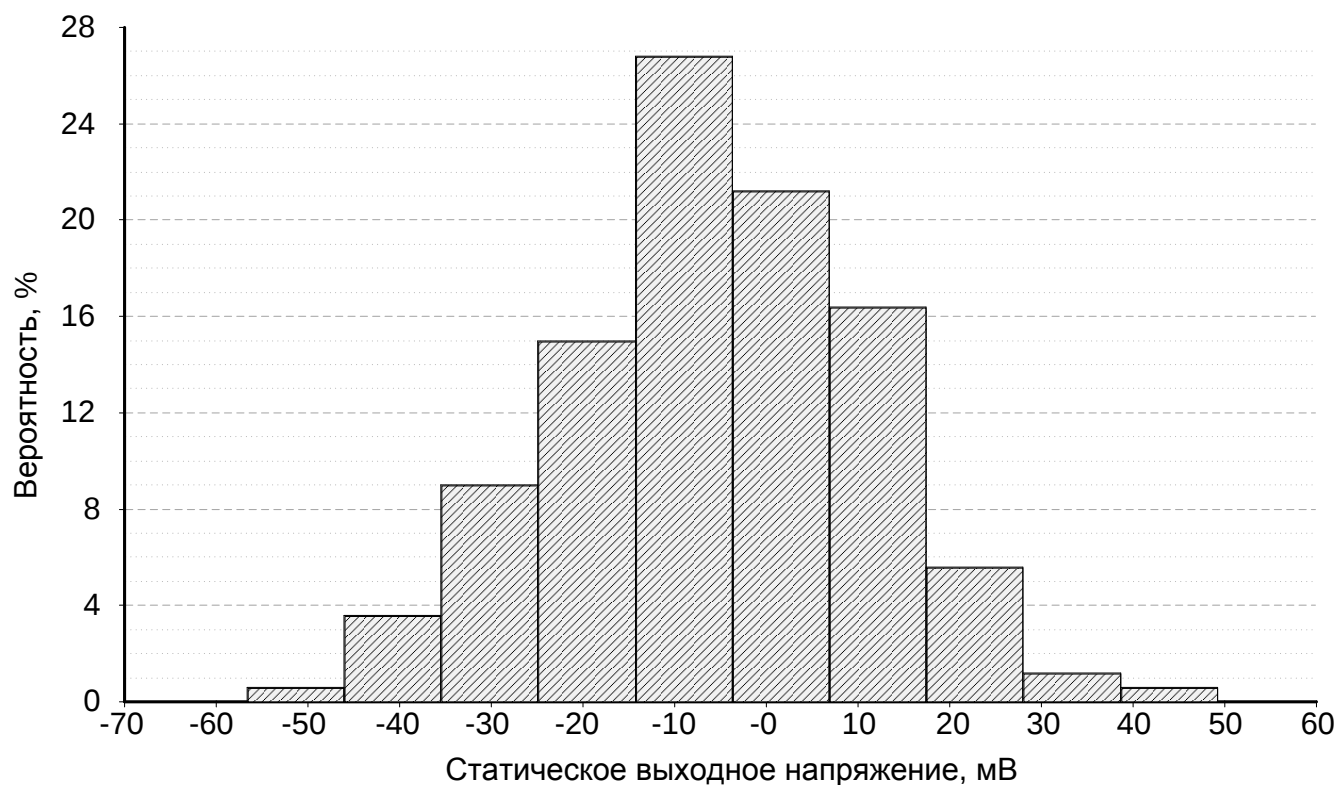


Рис. 7 – Анализ Монте-Карло. Зависимость дифференциального статического выходного напряжения МОУ от относительного разброса параметров транзисторов на 10 %

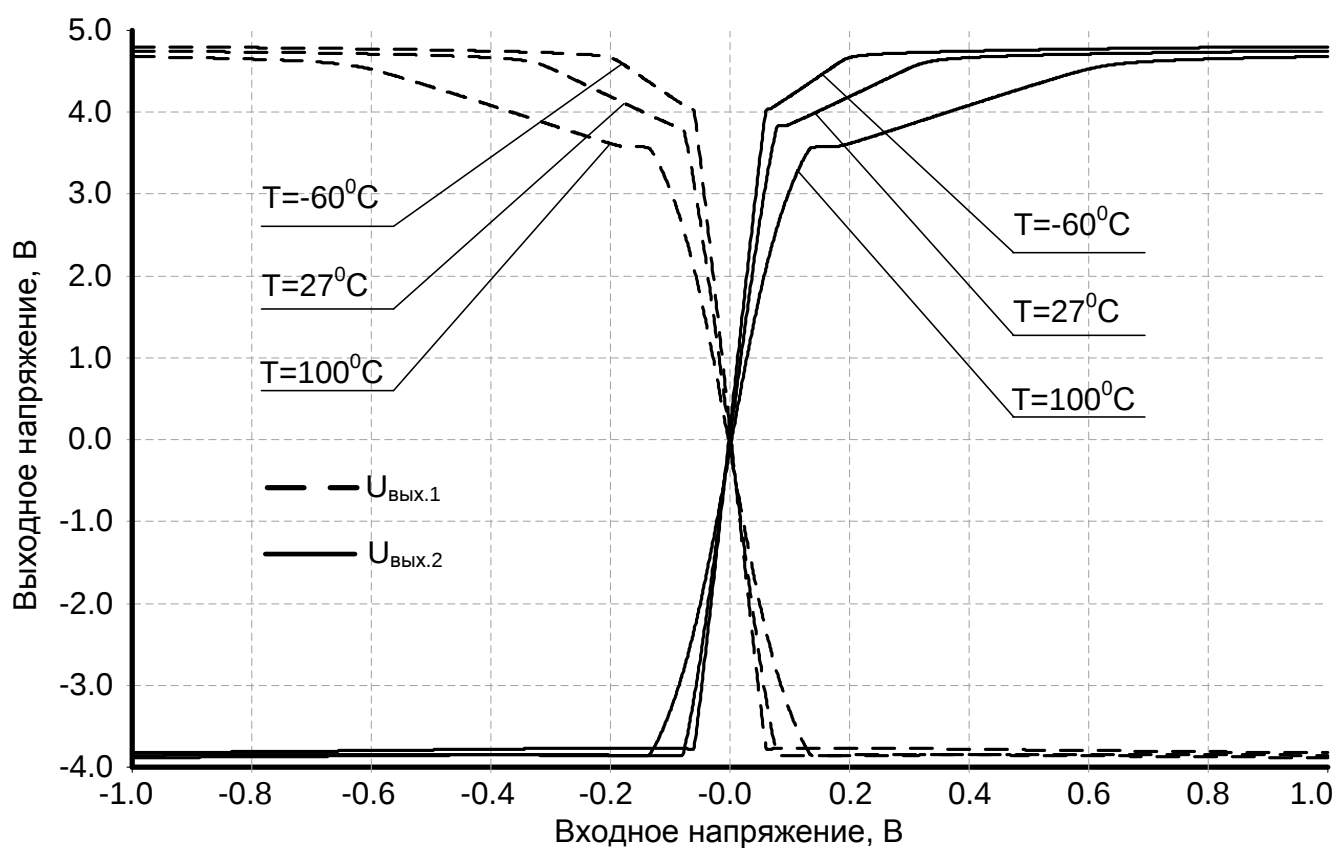


Рис. 8 – Амплитудные характеристики МОУ в диапазоне температур

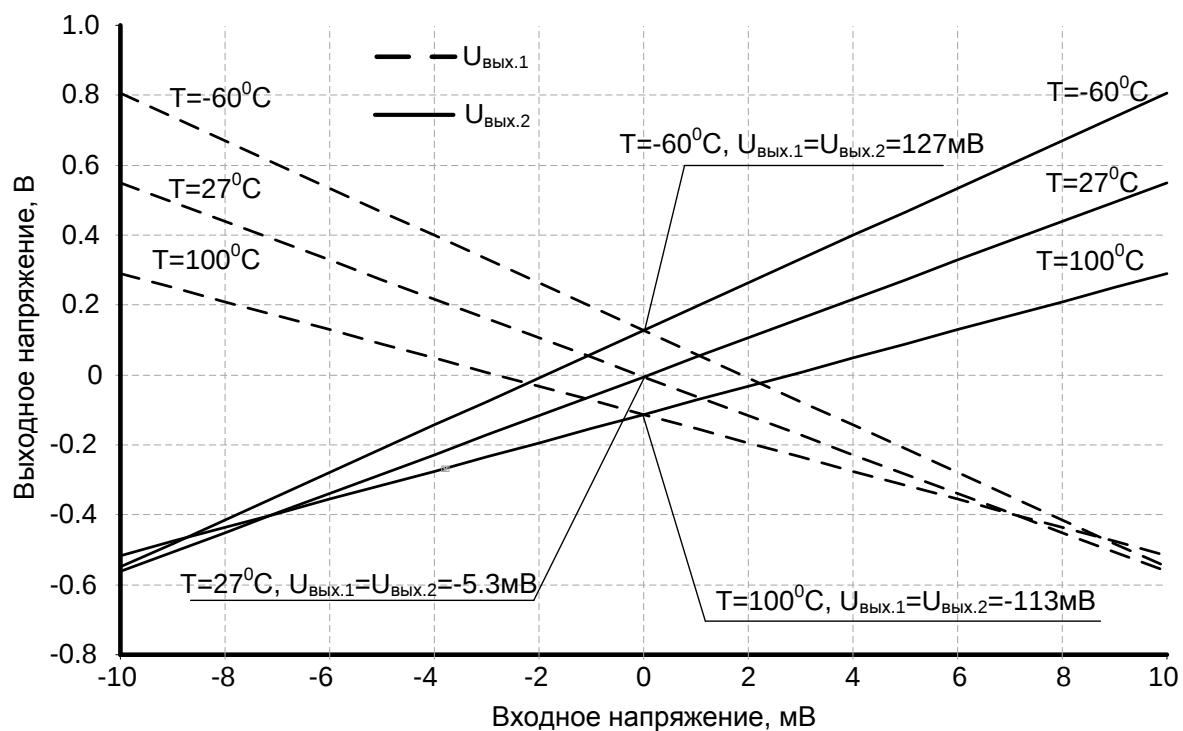


Рис. 9 – Амплитудные характеристики МОУ в диапазоне температур (в увеличенном масштабе).

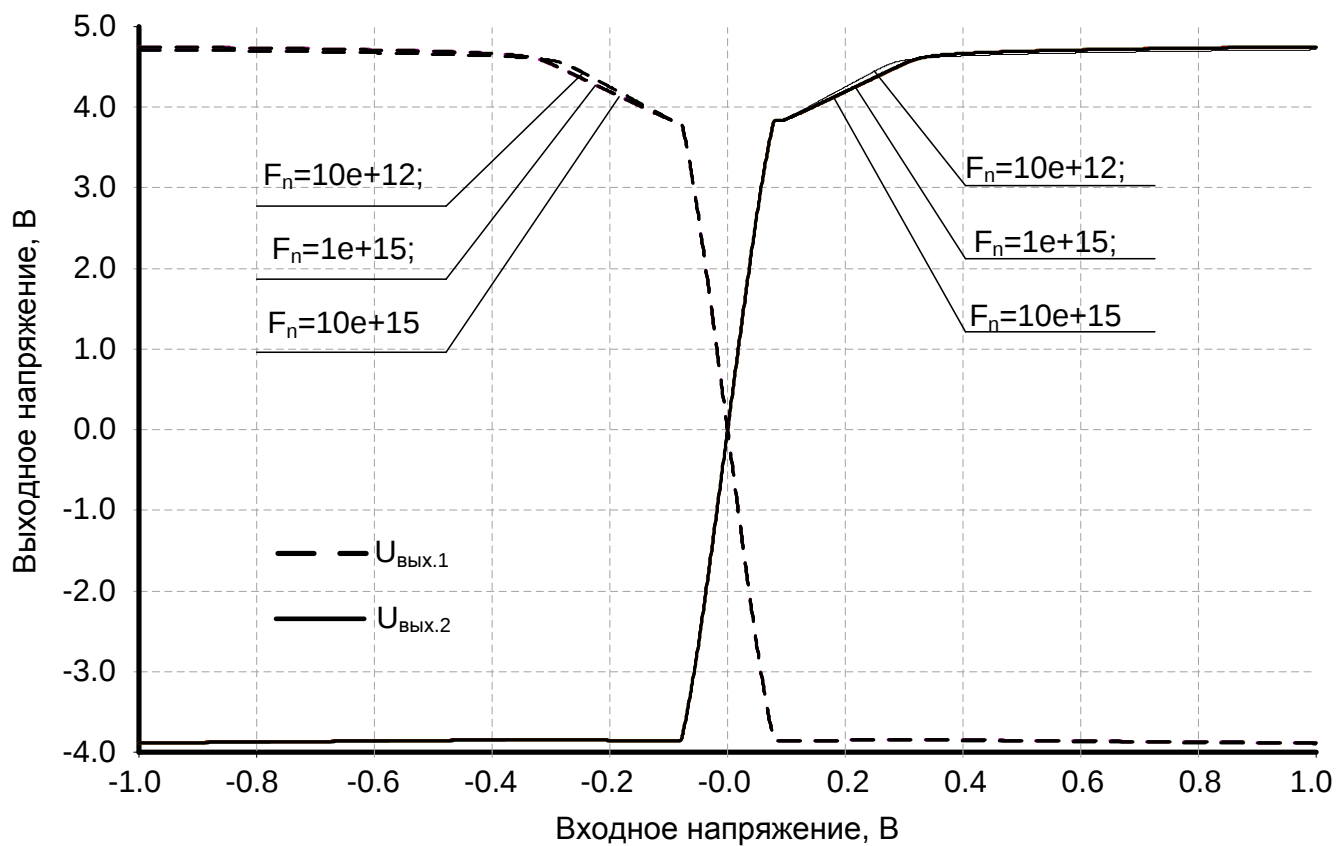


Рис. 10 – Амплитудные характеристики МОУ при воздействии потока нейтронов

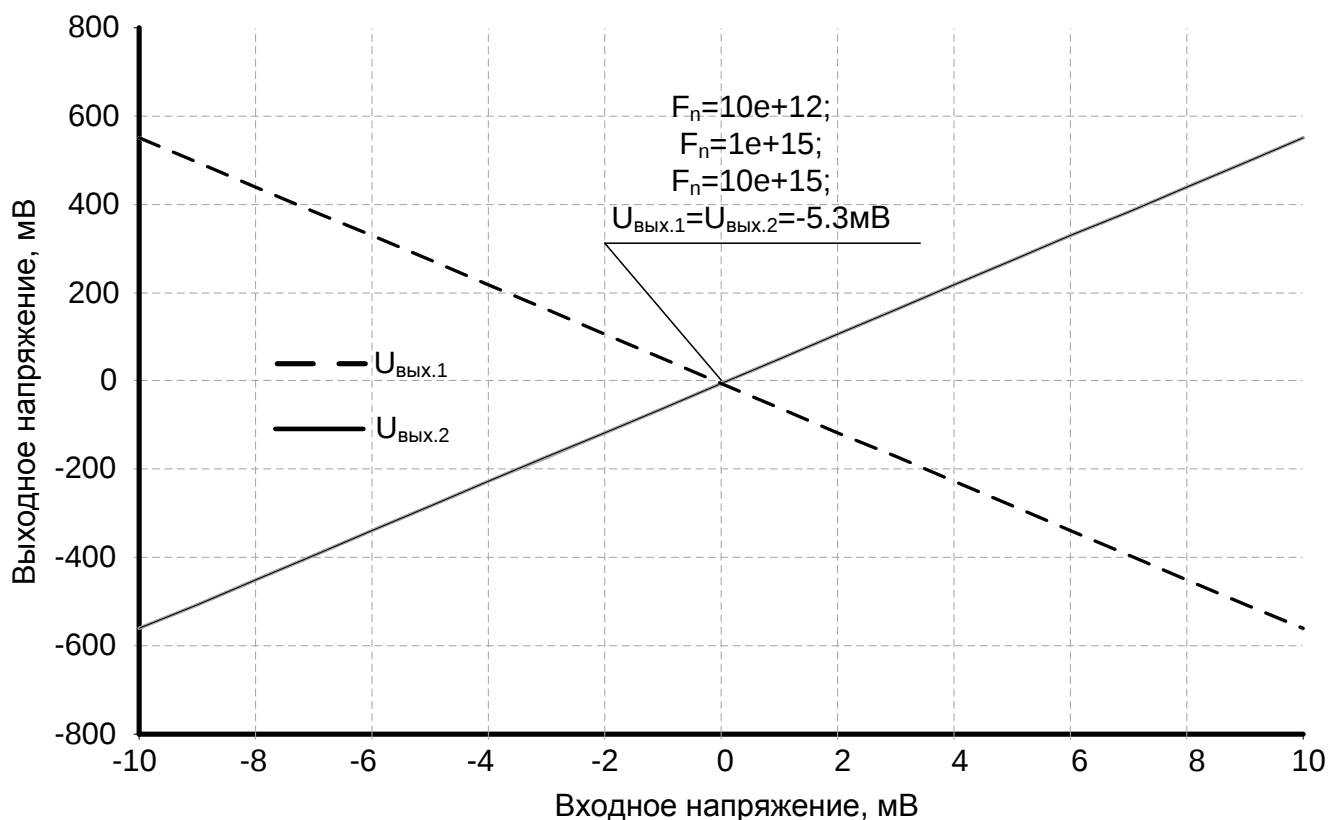


Рис. 11 – Амплитудные характеристики МОУ при воздействии потока нейтронов (в увеличенном масштабе)

5. Параметры оптимизации

Практический интерес представляет определение оптимальных значений сопротивлений резисторов R_1 - R_4 (рис. 1), статических токов I_1 - I_5 , которые могут быть разными для конкретной технологии, а также геометрических параметров каналов JFET-транзисторов.

6. Netlist в Spice (рис.3)

```

* source 128
X_Q9      N277618 VCC OUT1 substr TW1E
X_Q12     N277649 VCC OUT2 substr TW1E
I_I1      VCC N276995 DC 4m
I_I5      N277473 SUBSTR DC 4m
I_I2      VCC N277062 DC 4m
V_V1      VCC 0 5
R_R3      SUBSTR N278533 50
V_V2      0 SUBSTR 5B
X_Q5      N277473 N277649 N278533 substr TW1E
R_R1      N277473 OUT1 {rvar}
R_R4      SUBSTR N278564 50
X_Q10     N277473 N277649 N278533 substr TW1E
I_I3      VCC N277618 DC 2m
R_R2      N277473 OUT2 {rvar}
X_Q6      N277473 N277618 N278564 substr TW1E
X_Q1      N276995 IN N278533 substr PADJ

```

```

V_V3      IN 0 {vvar}
I_I4      VCC N277649 DC 2m
X_Q7      N277649 VCC OUT2 substr TW1E
X_Q2      N276995 0 N278564 substr PADJ
X_Q11     N277473 N277618 N278564 substr TW1E
X_Q3      N277062 0 N278533 substr PADJ
X_Q8      N277618 VCC OUT1 substr TW1E
X_Q4      N277062 0 N278564 substr PADJ
.PARAM    vvar=0 rvar=1.92k Fn=0

```

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10109).

При подготовке статьи использовались компьютерные модели транзисторов, разработанные Дворниковым Олегом Владимировичем (г. Минск, МНИПИ, oleg_dvornikov@tut.by).

Список литературы

1. N. N. Prokopenko, O. V. Dvornikov, N. V. Butyrlagin, A. V. Bugakova "The Main Connection Circuits of the Radiation-Hardened Differential Difference Amplifier Based on the Bipolar and Field Effect Technological Process," 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014), October 2-4, 2014, Novosibirsk, Russia, Volume 1, pp. 29–34.
2. Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов. Л.: 1979. 148 с.
3. Кошелев С.И. Автоматизация проектирования электронных устройств средствами САПР OrCAD[Электронный ресурс] // Информационно-библиотечный комплекс СПбПУ[сайт][2018]. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2668.pdf/download/2668.pdf>(дата обращения: 17.10.2018).
4. Знакомство с пакетом OrCad 9.1 Урок 3. Проектирование иерархических блоков[Электронный ресурс]URL: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/02_03/stat_126.htm (дата обращения: 19.10.2018).
5. K.O. Petrosyants, M. Ismail-zade, O.V. Dvornikov etal. "Automation of parameter extraction procedure for Si JFET SPICE model in the– 200...+ 110° C temperature range", Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, pp. 1-6, 2018.
6. O. V. Dvornikov, V. L. Dzatlau, N. N. Prokopenko, K. O. Petrosiants, N. V. Kozhukhov and V. A. Tchekhovski, "The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors," 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507