

А.А. Жук, Д.В. Клейменкин, Н.Н. Прокопенко**SIGЕ ВІСМOS ВЫХОДНЫЕ КАСКАДЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Разработка и проектирование кремний-германиевых (SiGe) аналоговых функциональных узлов (операционных усилителей, выходных каскадов, и др.) является одной из актуальных задач в современной микроэлектронике. Применение совмещенного технологического процесса SiGe BiCMOS позволяет объединять в единой интегральной схеме преимущества комплементарных КМОП-транзисторов (низкое энергопотребление и высокая плотность интеграции) и биполярных транзисторов с гетеропереходом (HBT) n-p-n типа (способность работать на высоких частотах, низкое энергопотребление и, как следствие, малое собственное тепловыделение, большой коэффициент усиления, высокое быстродействие, повышенная надежность, относительно низкая стоимость). Для создания микромощной аналоговой компонентной базы, работающей при воздействии высоких температур (до + 250 градусов Цельсия), необходима разработка специальных SiGe BiCMOS схемотехнических решений, учитывающих ограничения технологического процесса на использование определенных видов транзисторов. Исследуется 4 модификации буферных усилителей для применения в качестве выходных каскадов операционных усилителей, которые ориентированы на SiGe BiCMOS технологический процесс. Разработана программа каталогизации и визуализации рассмотренных схем, которые отличаются друг от друга величинами входных и выходных сопротивлений, статическим токопотреблением, схемотехникой цепей установления статического режима, максимальными амплитудами положительного и отрицательного выходных напряжений и т.п. Приведены примеры компьютерного моделирования статических режимов и амплитудных характеристик в среде проектирования электроники и микроэлектроники Cadence при двух температурах + 27 °C и + 250 °C. Предлагаемые схемотехнические решения рекомендуются для практического использования в микроэлектронных устройствах, работающих в условиях повышенных температур.

Высокотемпературная электроника; аналоговый интерфейс; операционный усилитель; выходной каскад; буферный усилитель; SiGe; BiCMOS.

A.A. Zhuk, D.V. Kleimenkin, N.N. Prokopenko**SIGЕ ВІСМOS OUTPUT STAGES OF HIGH-TEMPERATURE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

Development and design of silicon-germanium (SiGe) analog functional units (operational amplifiers, output stages, etc.) is one of the urgent tasks in modern microelectronics. The use of the combined technological process of SiGe BiCMOS makes it possible to combine in a single integrated circuit the advantages of complementary CMOS transistors (low power consumption and high integration density) and bipolar heterojunction transistors (HBT) n-p-n type (the ability to operate at high frequencies, low power consumption and, as a result, low intrinsic heat dissipation, high gain, high performance, increased reliability, relatively low cost). To create a micro-power analog component base operating at high temperatures (up to + 250 degrees Celsius), it is necessary to develop special SiGe BiCMOS circuit solutions that take into account the process limitations on the use of certain types of transistors. Four modifications of buffer amplifiers for application as output stages of operational amplifiers, which are oriented to SiGe BiCMOS technological process, are investigated. A program for cataloging and visualization of the considered circuits is developed, which differ from each other by the values of input and output resistances, static current consumption, circuitry of static mode establishment circuits, maximum amplitudes of positive and negative output voltages, etc. Examples of computer simulation of static modes and amplitude characteristics in the Cadence electronics and microelectronics design environment at two temperatures of + 27 and + 250 degrees Celsius are given. The proposed circuit design solutions are recommended for practical use in microelectronic devices operating at elevated temperatures.

High-temperature electronics; analog interface; operational amplifier; output stage; buffer amplifier; SiGe; BiCMOS.

Введение. Одним из значительных технологических прорывов в мире электроники конца XX века является создание нового технологического процесса – SiGe BiCMOS (Bipolar Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), который объединяет в себе преимущества биполярных транзисторов с высоким быстродействием и КМОП-структур. Данный технологический процесс [1–11] является основой создания электронной компонентной базы для систем на кристалле, которые стали основой нового поколения приборов и телекоммуникационных устройств (радиолокационных систем, сотовой и спутниковой связи, систем навигации и др.). Технология, созданная специалистами IBM, сейчас широко распространена по всему миру и продолжает развиваться, в том числе ведущими микроэлектронными фирмами – Intel, Texas Instruments, TSMC и др. Причиной этому служит сочетание высоких потребительских параметров элементов с высокой надежностью, сопоставимой с обычными кремниевыми приборами, а также приемлемой ценой [12].

Микросхемы современных буферных усилителей (БУ), а также выходные каскады (ВыхК) операционных усилителей (ОУ) характеризуются в общем случае около 50 параметрами [13–15]. В их числе максимальная амплитуда выходных напряжений для положительной ($U_{н.мах}^{(+)}$) и отрицательной ($U_{н.мах}^{(-)}$) полярностей, которая обычно измеряется при высоком сопротивлении нагрузки, максимальный ток в нагрузке для положительной ($I_{н.мах}^{(+)}$) и отрицательной ($I_{н.мах}^{(-)}$) полярностей, который определяется при малом сопротивлении нагрузки, статический ток (I_p), потребляемый схемой от источника питания, коэффициент эффективности БУ по собственному токопотреблению ($I_{н.мах}/I_p$), входное ($R_{вх}$) и выходное ($R_{вых}$) дифференциальные сопротивления, входная емкость, допустимая емкость нагрузки, систематическая составляющая напряжения смещения нуля ($U_{см}$), входной ток ($I_{вх}$), коэффициент передачи (K_{θ}) в рабочем диапазоне частот, частота единичного усиления (f_1), максимальная скорость нарастания выходного напряжения в режиме большого сигнала (SR). Кроме этого, БУ характеризуется энергетическими параметрами, такими как максимально допустимая рассеиваемая мощность ($P_{мах}$), максимальная температура кристалла ($T_{мах}$), тепловое сопротивление корпуса ($R_{т.к}$), допустимая температура корпуса (T_k) [16, 17], диапазон рабочих температур. Для многих применений БУ важно также иметь информацию о вносимых им нелинейных искажениях сигнала, собственным шумам, а также допустимом диапазоне изменения напряжений питания.

Названные выше параметры существенно зависят от используемых технологических процессов и разрешенных к применению транзисторов, а также от схемотехники БУ, которая определяет многие качественные показатели практических схем.

Целью и новизной данной статьи является обобщение базовых свойств и сравнительный анализ работы предлагаемых авторами статьи 4 модификаций SiGe BiCMOS выходных каскадов операционных усилителей (ОУ) [18] с диапазоном рабочих температур до 250°C [19–24].

1. Программа каталогизации и визуализации выходных каскадов высокотемпературных ОУ на гетеропереходных п-р-п биполярных и металл-оксид полевых транзисторах п- и р-каналом. Для выбора оптимального схемотехнического решения под конкретную реализацию ОУ была разработана программа каталогизации буферных усилителей (рис. 1) [25]. Она представляет собой интерактивную платформу, включающую электрические схемы, адаптированные для SiGe технологических процессов, содержащих только гетеропереходные п-р-п биполярные и КМОП транзисторы.

Данная программа решает следующие задачи:

- ◆ каталогизация схем с описанием их работы;
- ◆ графическая визуализация выбранного схемотехнического решения с отображением нумерации компонентов и их соединений.

Таким образом, программа представляет собой эффективный инструмент для разработчиков высокотемпературных SiGe ОУ, позволяющий оптимизировать процесс выбора выходного каскада (БУ) с учетом его схемотехнических особенностей.

```

def show_project_details(self, event): 1 usage
    selected_index = self.listbox.curselection()
    if not selected_index:
        return

    project = self.resources[selected_index[0]]
    details_window = Toplevel(self.root)
    details_window.title(project["name"])

    try:
        image_path = f"{project['id']}.png"
        if os.path.exists(image_path):
            img = Image.open(image_path)
            img = img.resize(size=(400, 400), Image.Resampling.LANCZOS)
            img_tk = ImageTk.PhotoImage(img)
            canvas = Canvas(details_window, width=400, height=400)
            canvas.create_image(*args: 0, 0, anchor="nw", image=img_tk)
            canvas.image = img_tk # Keep a reference
            canvas.pack()
        else:
            Label(details_window, text="Image not found", fg="red").pack()
    except Exception as e:
        Label(details_window, text=f"Error loading image: {e}", fg="red").pack()

    Label(details_window, text=f"Имя и номер: {project['name']}", font=("Arial", 14)).pack(pady=5)
    self.render_description(details_window, project["description"])

```

Рис. 1. Фрагмент файла описания программы каталогизации и визуализации БУ [25]

2. Схемы буферных усилителей высокотемпературных ОУ на гетеропереходных п-р-п биполярных и КМОП транзисторах, представленные в программе. При расчете максимальных выходных токов БУ ($I_{н.маx}^{(+)}$ и $I_{н.маx}^{(-)}$) стоит учитывать, что в реальных схемах ОУ источник сигнала, подключаемый ко входу БУ (I_n), не является идеальным источником напряжения, имеющим нулевое выходное сопротивление. Как следствие, промежуточный каскад (ПК) ограничивает максимально возможные значения токов нагрузки. Поэтому при оценке $I_{н.маx}^{(+)}$ и $I_{н.маx}^{(-)}$ конкретных схем, которые измеряются при $R_n = 0$, необходимо учитывать максимально возможные значения выходных токов $I_{с.маx}^{(+)}$ и $I_{с.маx}^{(-)}$ ПК. На рис. 2 показана схема БУ с неидеальным источником сигнала в виде промежуточного каскада.

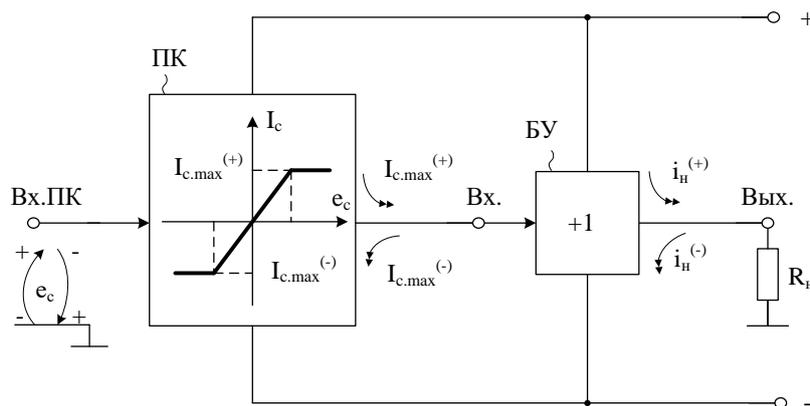


Рис. 2. БУ с неидеальным источником входного сигнала

Первая модификация БУ (рис. 3). Особенность БУ на рис. 3 состоит в том, что двуполярные направления токов в нагрузке R_n здесь формируются п-р-п транзисторами VT1, VT2, VT3 и зависят от численных значений токов двухполосников $I_1 = I_2 = I_0$. Дру-

Допустимый диапазон изменения напряжения питания (V_{dd}), при котором транзисторы VT1 и VT2 работают в активном режиме, определяется наименьшим из двух значений:

$$\Delta V_{dd.1}^{(-)} \approx U_{кб.1}, \quad (7)$$

$$\Delta V_{dd.2}^{(-)} \approx U_{эб.3-2}, \quad (8)$$

где $U_{кб.1}$ – напряжение коллектор-база транзистора VT1 в статическом режиме, $U_{эб.3-2}$ – суммарное напряжение эмиттер-база составного транзистора Дарлингтона (VT2, VT3).

Статический входной ток ($I_{БУ}$) и входное дифференциальное сопротивление БУ ($R_{вх.БУ}$):

$$I_{БУ} = \frac{I_0}{\beta_1}, \quad (9)$$

$$R_{БУ} \approx \beta_1 R_H. \quad (10)$$

Малосигнальное выходное сопротивление БУ:

$$R_{ВЫХ} \approx \frac{\varphi_T}{I_0} + \frac{R_C}{\beta_1}, \quad (11)$$

где $\varphi_T \approx 26$ мВ – температурный потенциал, R_C – сопротивление источника сигнала (рис. 2).

Из уравнения (11) следует, что при подключении БУ к промежуточному каскаду с высокоимпедансным выходным узлом, выходное сопротивление БУ существенно возрастает.

Малосигнальный коэффициент передачи БУ по напряжению зависит от сопротивления нагрузки:

$$K_0 \approx \frac{R_H}{R_H + r_3}, \quad (12)$$

где r_3 – сопротивление эмиттерного перехода VT1.

На рис. 4 показан статический режим БУ рис. 3 в среде Cadance при $I_4 = I_5 = 200$ мкА, резисторах $R_2 = 500$ Ом и $R_0 = 250$ Ом, напряжениях питания ± 3 В.

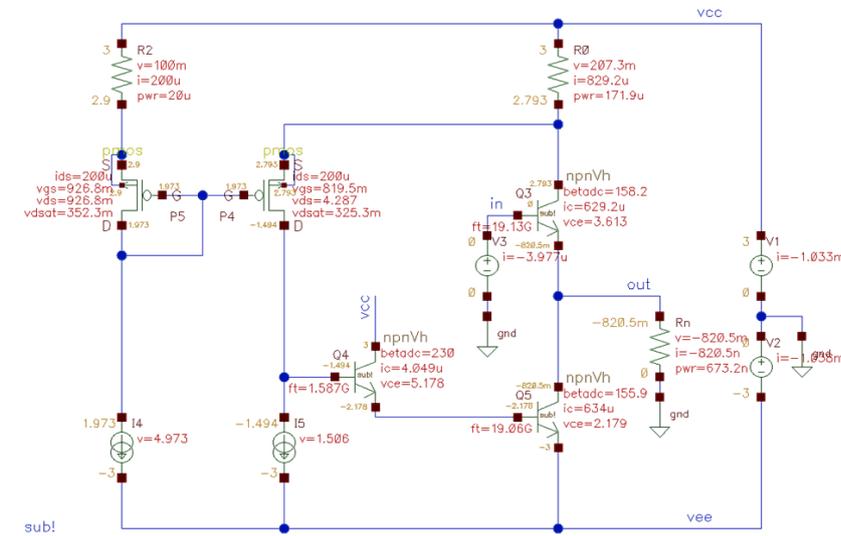


Рис. 4. Статический режим SiGe БУ рис. 3 при $t = 27^\circ C$

На рис. 5 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 4 при разных сопротивлениях нагрузки R_H .

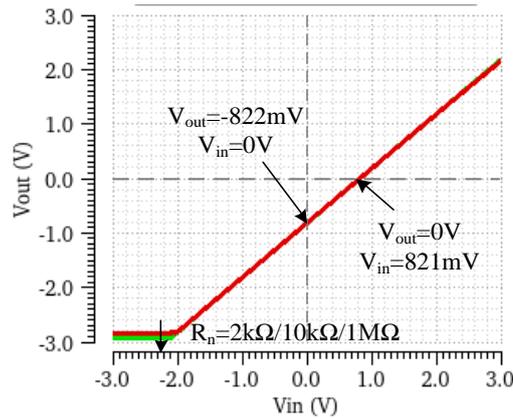


Рис. 5. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 4 при $R_n = 2 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}, 1 \text{ МОм}$ $t = 27^\circ\text{C}$

На рис. 6 показан статический режим БУ рис. 3 в среде Cadance при повышенной температуре ($t = 250^\circ\text{C}$), $I_4 = I_5 = 200 \text{ мкА}$, резисторах $R_2 = 500 \text{ Ом}$ и $R_0 = 250 \text{ Ом}$, напряжениях питания $\pm 3 \text{ В}$.

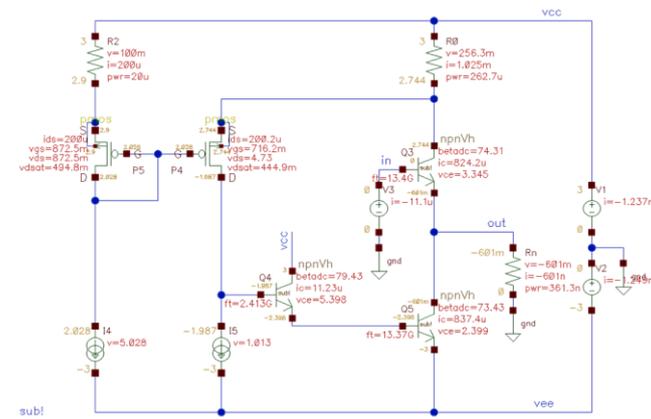


Рис. 6. Статический режим SiGe БУ рис. 3 при повышенной температуре

На рис. 8 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 7 при разных сопротивлениях нагрузки R_n для температуры $t = 250^\circ\text{C}$.

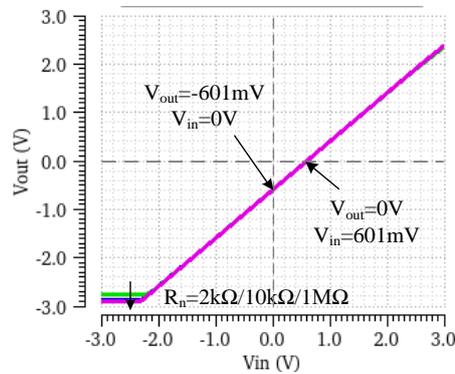


Рис. 7. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 6 при $R_n = 2 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}, 1 \text{ МОм}$

Вторая модификация БУ (рис. 8). В схеме БУ на рис. 8 ток в нагрузке положительного направления обеспечивается биполярным транзистором VT2, а отрицательного направления – полевым транзистором VT3. Настройка статического режима БУ обеспечивается выбором тока двухполюсника I_I .

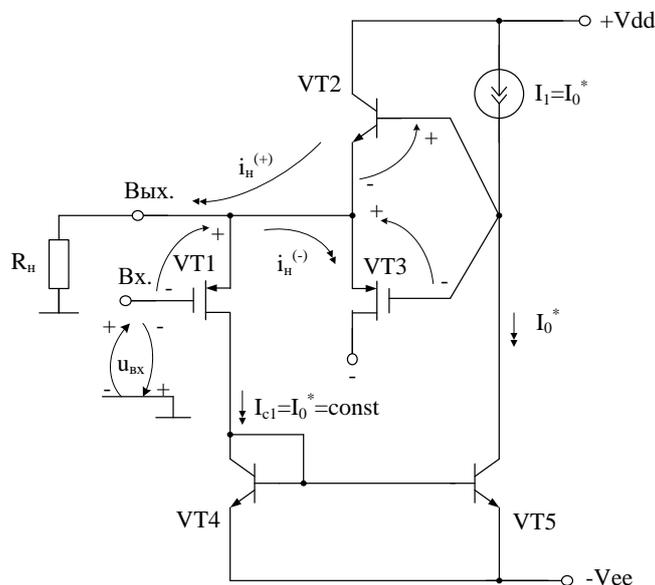


Рис. 8. SiGe буферный усилитель: модификация №2

Схема на рис. 8 имеет высокое входное сопротивление, что связано с применением КМОП транзистора VT1. Его статический ток истока и, как следствие, напряжение затвор-исток при высокоомной нагрузке не изменяется в широком диапазоне изменения отрицательного входного напряжения и равен $I_{c1} = I_0^*$. В этом режиме биполярный транзистор VT2 находится в режиме отсечки. Если на вход БУ подается положительное напряжение, то в работу включается биполярный транзистор VT2, коэффициент усиления которого по току (β_2) определяет максимальный ток в нагрузке

$$I_{н.max}^{(+)} \approx \beta_2 I_0^* \quad (13)$$

Если БУ должен иметь малый статический ток, потребляемый схемой от источника питания ($I_p = 2I_0^*$), то в качестве VT2 рекомендуется использовать составной транзистор Дарлингтона [26–28].

Максимальный отрицательный ток в низкоомной нагрузке определяется максимальным током стока транзистора VT3:

$$I_{н.max}^{(-)} \approx I_{c3.max} \quad (14)$$

Максимальные амплитуды отрицательного и положительного выходных напряжений находится по формулам:

$$U_{н.max}^{(-)} \approx V_{ee} - U_{зи.1} - U_{эб.4}, \quad (15)$$

$$U_{н.max}^{(+)} \approx V_{dd} - U_{эб.2} - U_{min.I_1}, \quad (16)$$

где $U_{min.I_1}$ – минимальное напряжение на источнике опорного тока I_1 , до которого он имеет высокое входное сопротивление, $U_{эб.4}$, $U_{эб.2}$ – напряжение эмиттер-база транзисторов VT4, VT2.

На рис. 9 показан статический режим БУ рис. 8 в среде Cadance при $t = 27^\circ\text{C}$, источнике опорного тока $I_0 = 100 \mu\text{A}$, напряжениях питания $\pm 3 \text{ В}$, резисторе $R_n = 1 \text{ МОм}$.

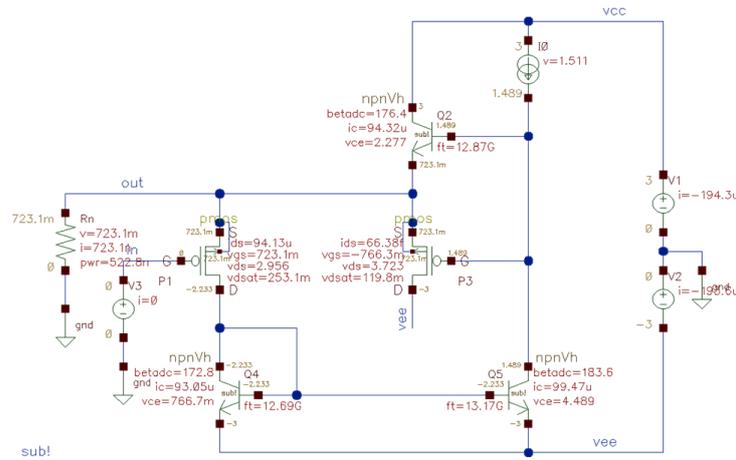


Рис. 9. Статический режим SiGe БУ рис. 8 при комнатной температуре

На рис. 10 приведена амплитудная характеристика БУ на рис. 9 при разных сопротивлениях нагрузки R_n .

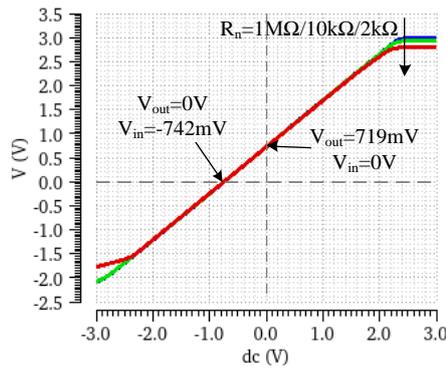


Рис. 10. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 9 при $R_n = 2 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}$

На рис. 11 показан статический режим БУ рис. 8 в среде Cadance при $t = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, источнике опорного тока $I_0 = 100 \text{ мкА}$, напряжениях питания $\pm 3 \text{ В}$, резисторе $R_n = 1 \text{ МОм}$.

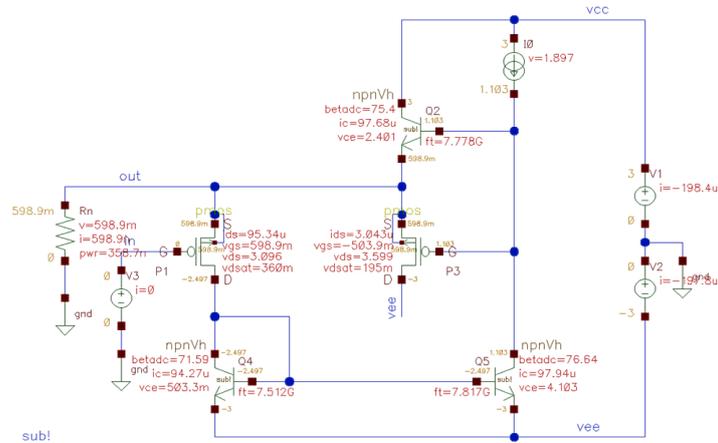


Рис. 11. Статический режим SiGe на БУ рис. 8

На рис. 12 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 11 при разных сопротивлениях нагрузки R_n и температуре 250 °С.

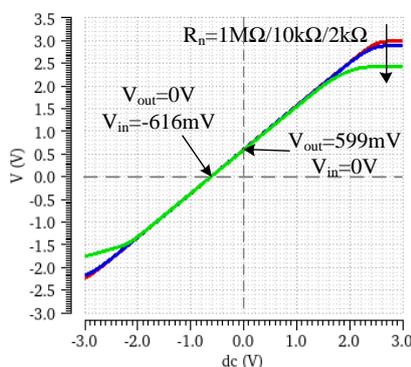


Рис. 12. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 11 при $R_n = 2 \text{ кОм}$, 10 кОм , 1 МОм

Третья модификация БУ (рис. 13). Особенность БУ на рис. 13 состоит в том, что двуполярные направления токов в нагрузке R_n здесь формируются биполярным транзистором VT1 и полевым транзистором VT2.

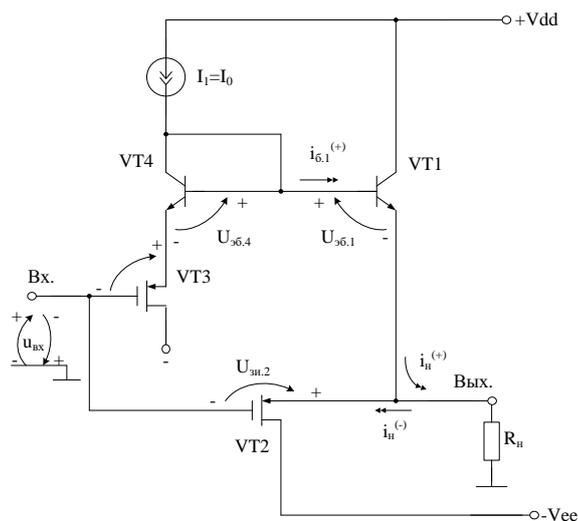


Рис. 13. SiGe буферный усилитель: модификация №3

Данный буферный усилитель имеет повышенное входное сопротивление. Максимальный положительный ток в низкоомной нагрузке определяется коэффициентом усиления по току (β_1) транзистора VT1:

$$I_{н.мах}^{(+)} \approx \beta_1 I_0. \quad (17)$$

Максимальный отрицательный ток в нагрузке зависит от предельного тока стока транзистора VT2:

$$I_{н.мах}^{(-)} \approx I_{с.2.мах}. \quad (18)$$

Амплитуда отрицательного выходного напряжения БУ не превышает значения:

$$U_{н.мах}^{(-)} \approx V_{ee} - U_{зи.2}, \quad (19)$$

где $U_{зи.2}$ – напряжение затвор-исток транзистора VT2.

Статический ток, потребляемый схемой при высокоомной нагрузке, равен $I_p = 2I_0$. При этом коэффициенты эффективности БУ по статическому токопотреблению определяются формулами:

$$g^{(+)} = \frac{I_{н.max}^{(+)}}{I_p} = \frac{\beta_1}{2}, \tag{20}$$

$$g^{(-)} = \frac{I_{н.max}^{(-)}}{I_p} = \frac{I_{c.2.max}}{2I_0}. \tag{21}$$

Малосигнальное выходное сопротивление БУ:

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{r_{э1}}{1+r_{э1}S_2}, \tag{22}$$

где $r_{э1}$ – сопротивление эмиттерного перехода транзистора VT1, S_2 – крутизна стокзатворной характеристики VT2.

На рис. 14 показан статический режим БУ рис. 13 в среде Cadance при $t = 27^\circ\text{C}$, $I_I = 200$ мкА, резисторе нагрузки $R_n = 1$ МОм, напряжениях питания ± 3 В.

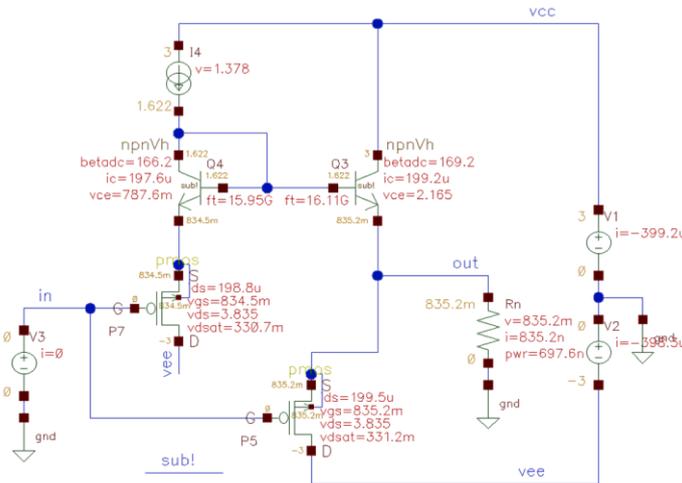


Рис. 14. Статический режим SiGe БУ рис. 13

На рис. 15 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 14 при разных сопротивлениях нагрузки R_n и комнатной температуре $t = 27^\circ\text{C}$.

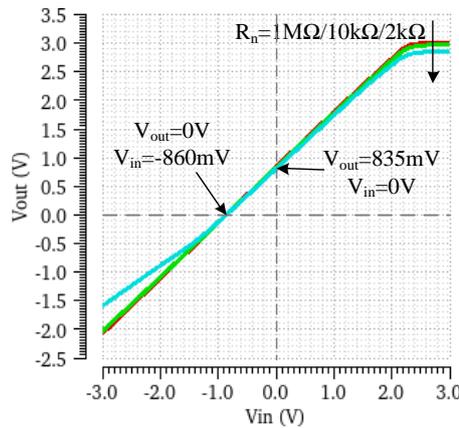


Рис. 15. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 14 при $R_n = 2$ кОм, 10 кОм, 1 МОм

На рис. 16 показан статический режим БУ рис. 13 в среде Cadance при $t = 250\text{ }^\circ\text{C}$, $I_1 = 200\text{ }\mu\text{A}$, резисторе нагрузки $R_n = 1\text{ МОм}$, напряжениях питания $\pm 3\text{ В}$.

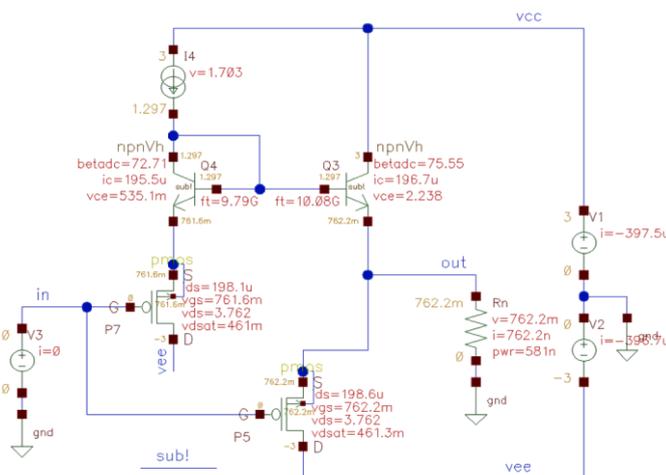


Рис. 16. Статический режим SiGe БУ на рис. 14

На рис. 17 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 16 при разных сопротивлениях нагрузки R_n и температуре $t = 250\text{ }^\circ\text{C}$.

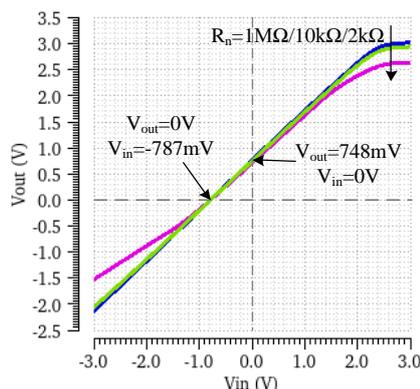


Рис. 17. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 16 при $R_n = 2\text{ кОм}$, 10 кОм , 1 МОм

Четвертая модификация БУ (рис. 18). Особенность БУ на рис. 18 состоит в том, что двуполярные направления токов в нагрузке R_n здесь формируются p-n транзисторами VT1, VT2, VT3 и зависят от тока двухполюсника $I_1 = I_0$. Другие элементы схемы БУ обеспечивают контроль состояния транзисторов VT2 и VT3, и когда VT1 запирается (при отрицательном $u_{вх}$), управляют транзисторами VT2 и VT3, которые создают отрицательный ток в нагрузке. Настройка схемы БУ обеспечивается выбором сопротивлений резисторов $R1 \dots R2$ и тока $I_1 = I_2$.

При этом $I_{н.мах}^{(+)}$ и $I_{н.мах}^{(-)}$ определяются по формулам:

$$I_{н.мах}^{(+)} \approx \beta_4 \beta_5 I_1, \quad (23)$$

$$I_{н.мах}^{(-)} \approx I_{с.мах.1} \beta_3, \quad (24)$$

где $\beta_3, \beta_4, \beta_5$ – коэффициенты усиления по току биполярных транзисторов VT3...VT5, I_0 – ток двухполюсника I_1 , $I_{с.мах.1}$ – максимальный ток стока полевого транзистора VT1.

На рис. 19 показан статический режим БУ рис. 18 в среде Cadance при $I_0 = 200$ мкА, резисторе нагрузки $R_H = 1$ МОм, напряжениях питания ± 3 В.

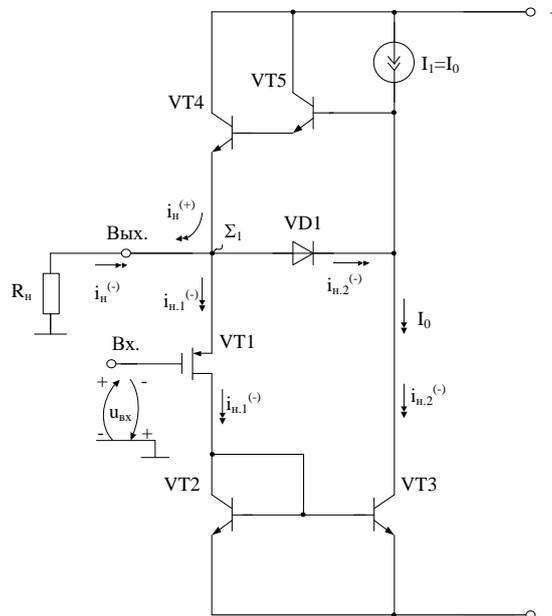


Рис. 18. SiGe буферный усилитель: модификация № 4

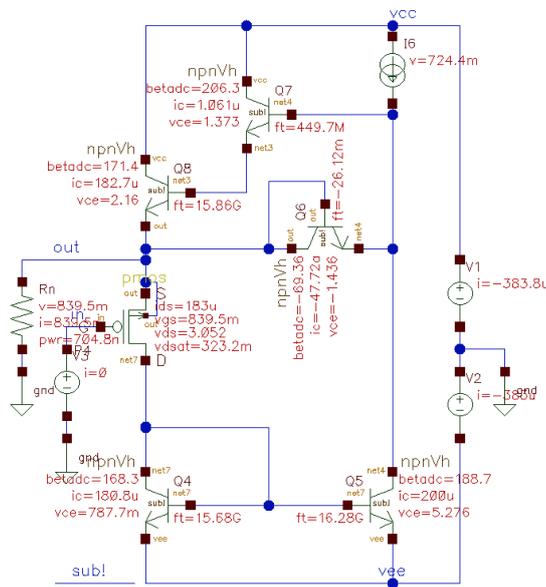


Рис. 19. Статический режим SiGe БУ на рис. 18 при $t = 27^\circ\text{C}$

На рис. 20 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 19 при разных сопротивлениях нагрузки R_H .

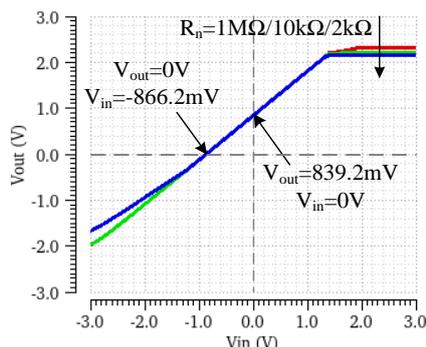


Рис. 20. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 19 при $R_n = 2 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}, 1 \text{ МОм}, t = 27^\circ\text{C}$

На рис. 21 показан статический режим БУ рис. 18 в среде Cadence при температуре $t = 250^\circ\text{C}, I_0 = I_6 = 200 \text{ мкА}$, резисторе нагрузки $R_n = 1 \text{ МОм}$, напряжениях питания $\pm 3 \text{ В}$.

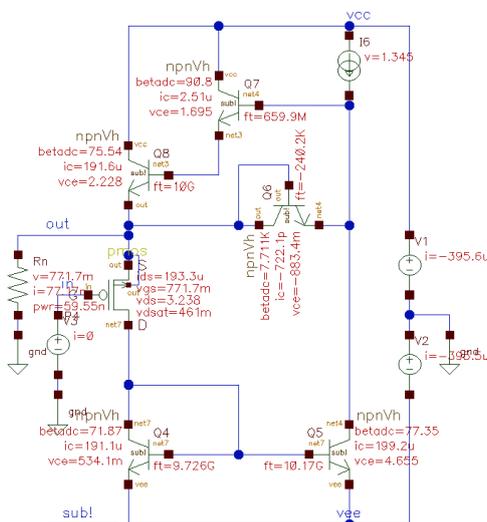


Рис. 21. Статический режим SiGe БУ рис. 18

На рис. 22 приведена амплитудная характеристика БУ рис. 21 при разных сопротивлениях нагрузки R_n и температуре 250°C .

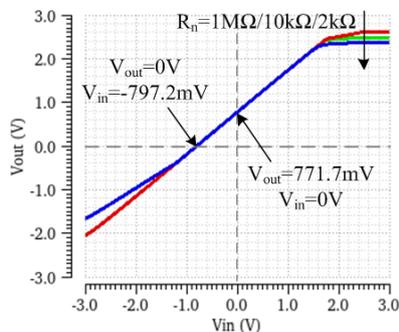


Рис. 22. Амплитудная характеристика SiGe БУ на рис. 21 при $R_n = 2 \text{ кОм}, 10 \text{ кОм}, 1 \text{ МОм}$

Другие 8 модификаций предлагаемых БУ рассматриваемого класса на SiGe BiCMOS технологическом процессе представлены в препринте [18].

Заключение. Рассмотрено семейство буферных усилителей (4 модификации) которые рекомендуется использовать в качестве выходных каскадов SiGe ОУ по технологии BiCMOS. Разработана программа каталогизации и визуализации, позволяющая при проектировании высокотемпературных ОУ оптимизировать процесс выбора БУ с учетом их схемотехнических особенностей. Приведены результаты компьютерного моделирования в среде Cadence, на основании которых можно сделать вывод о том, что максимальные выходные напряжения предлагаемых схем БУ отличаются от напряжений на соответствующих шинах питания на 15-25%. За счет применения SiGe BiCMOS технологического процесса разработанные схемотехнические решения сохраняют свою работоспособность при температурах до 250 °C [19–24].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, <https://rscf.ru/project/23-79-10069/>.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Avenier G. et al.* 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology for mm-wave applications // 2008 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Monterey, CA, USA, 2008. – P. 89-92. – doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719.
2. *Hashimoto T. et al.* A CMOS-based RF SiGe BiCMOS technology featuring over-100 GHz $f_{sub\ max}$ /SiGe HBTs and 0.13 μ m CMOS // Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2002. – P. 189-192. – doi: 10.1109/BIPOL.2002.1042915.
3. *Wietstruck M., Marschmeyer S., Schulze S., Wipf S.T., Wipf C. and Kaynak M.* Recent Developments on SiGe BiCMOS Technologies for mm-wave and THz Applications // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, MA, USA, 2019. – P. 1126-1129. – doi: 10.1109/MWSYM.2019.8701049.
4. *Candra P. et al.*, A 130nm SiGe BiCMOS technology for mm-Wave applications featuring HBT with fT/f_{MAX} of 260/320 GHz // 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Seattle, WA, USA, 2013. – P. 381-384. – doi: 10.1109/RFIC.2013.6569610.
5. *Zimmer T. et al.* SiGe HBTs and BiCMOS Technology for Present and Future Millimeter-Wave Systems // in IEEE Journal of Microwaves. – Jan. 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 288-298. – doi: 10.1109/JMW.2020.3031831.
6. *Rucker H. et al.* A 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology featuring fT/f_{max} of 240/330 GHz and gate delays below 3 ps // 2009 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Capri, Italy, 2009. – P. 166-169. – doi: 10.1109/BIPOL.2009.5314251.
7. *Dielacher F., Tiebout M., Lachner R., Knapp H., Aufinger K. and Sansen W.* SiGe BiCMOS technology and circuits for active safety systems // Proceedings of Technical Program - 2014 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA), Hsinchu, Taiwan, 2014. – P. 1-4. – doi: 10.1109/VLSI-DAT.2014.6834937.
8. *Pekarik J.J. et al.* A 90nm SiGe BiCMOS technology for mm-wave and high-performance analog applications // 2014 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Coronado, CA, USA, 2014. – P. 92-95. – doi: 10.1109/BCTM.2014.6981293.
9. *Pizzimento L.* On novel front-end electronics for the ATLAS BI RPC upgrade at HL-LHC developed in SiGe BiCMOS technology with a high-resolution rad-hard Time-To-Digital converter embedded // in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2024. – Vol. 1069. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169892>.
10. *Cheng G. et al.* A 22-to-36.8 GHz low phase noise Colpitts VCO array in 0.13- μ m SiGe BiCMOS technology // in Microelectronics Journal. – 2019. – Vol. 88. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.04.004>.
11. *Sorge R. et al.* JICG CMOS transistors for reduction of total ionizing dose and single event effects in a 130 nm bulk SiGe BiCMOS technology // in JICG CMOS transistors for reduction of total ionizing dose and single event effects in a 130 nm bulk SiGe BiCMOS technology. – 2021. – Vol. 987. – doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164832>.
12. *Малышев И.В. и др.* Перспективы использования технологии SiGe BiCMOS для создания СВЧ микросхем // Проблемы разработки перспективных микроэлектронных систем – 2006: Сб. научных трудов / под ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИПИМ РАН, 2006. – С. 191-193. – doi: 10.1109/ESSDERC.2000.194715.
13. *Carter B., Mancini R.* Op Amps for Everyone. – 5th ed. – Oxford: Newnes, 2017. – 484 p.

14. Картер Б., Манчини Р. Операционные усилители для всех: пер. с англ. А.Н. Рабодзея. – М.: Додэка-XXI, 2011. – 544 с. – (Серия «Схемотехника»). – Доп. тит. л. англ. – ISBN 978-5-94120-242-3.
15. Single-Supply, Low Power, Precision FET Input Quad Buffer: datasheet / Analog Devices. – Rev. A. – URL: <https://www.rlocman.ru/datasheet/pdf.html?di=168497> (дата обращения: 10.06.2025).
16. Дворников О., Чеховский В., Попов А. Разработка и применение мощных аналоговых БМК при проектировании силовых аналоговых микросхем // Электронные компоненты. – 2025. – № 5. – С. 14-20.
17. Sedra A.S., Smith K.C. Microelectronic Circuits. – 7th ed. – Oxford: Oxford University Press, 2015. – 1328 p. – ISBN 978-0-19-933913-6.
18. Жук А., Клейменкин Д., Прокопенко Н. SiGe BiCMOS выходные каскады высокотемпературных операционных усилителей // Preprints. – 2025. – doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202504.2193.v1>.
19. Najafizadeh L. et al., "SiGe BiCMOS Precision Voltage References for Extreme Temperature Range Electronics // 2006 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Maastricht, Netherlands, 2006. – P. 1-4. – doi: 10.1109/BIPOL.2006.311117.
20. Cornett K.J., Fu G., Escorcia I. and Mantooth H.A. SiGe BiCMOS fully differential amplifier for extreme temperature range applications // 2009 IEEE Aerospace conference, Big Sky, MT, USA, 2009. – P. 1-10. – doi: 10.1109/AERO.2009.4839517.
21. Dylan T. et al. SiGe Amplifier and Buffer Circuits for High Temperature Applications // IMAPS International Conference & Exhibition on High Temperature Electronics (HiTEC 2010), USA, 2010. – P. 1-7. – doi: 10.4071/HITEC-DThomas-THA25.
22. Bellini M., Cressler J.D. and Cai J. Assessing the High-Temperature Capabilities of SiGe HBTs Fabricated on CMOS-compatible Thin-film SOI // 2007 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Boston, MA, USA, 2007. – P. 234-237. – doi: 10.1109/BIPOL.2007.4351877.
23. Thomas D.B. et al. Performance and reliability of SiGe devices and circuits for high-temperature applications. Proceedings // 2009 IMAPS International Conference on High Temperature Electronics Network, HiTEN, 2009. – P. 49-56.
24. Basu R., Singh A. High temperature Si-Ge alloy towards thermoelectric applications // A comprehensive review. Materials Today Physics. – No. 21. – P. 1-26. – doi: 10.1016/j.mtphys.2021.100468.
25. Жук А.А., Бугакова А.А., Прокопенко Н.Н., Клейменкин Д.В. Программа каталогизации и визуализации выходных каскадов высокотемпературных операционных усилителей на гетеропереходных n-p-n биполярных и металл-оксид полевых транзисторах, № RU 2025660214 от 2025.
26. Williams R.S., Tuckerman D.B. Low-noise Darlington amplifier design for high-frequency applications // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1987. – Vol. 34, No. 5. – P. 567-574. – DOI: 10.1109/TCS.1987.1086185.
27. Gupta A., Singh R. Performance Analysis of Darlington Transistor Arrays in High-Precision Analog Circuits // Journal of Solid-State Circuits. – 2021. – Vol. 56, No. 4. – P. 1123-1132. – DOI: 10.1109/JSSC.2020.3040123.
28. Kim H.S., Cho M.J. Integration of Darlington Transistors in Low-Voltage Power ICs for Enhanced Efficiency // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – Vol. 37, No. 2. – P. 2345-2353. – DOI: 10.1109/TPEL.2021.3103456.

REFERENCES

1. Avenier G. et al. 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology for mm-wave applications, 2008 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Monterey, CA, USA, 2008, pp. 89-92. doi: 10.1109/BIPOL.2008.4662719.
2. Hashimoto T. et al. A CMOS-based RF SiGe BiCMOS technology featuring over-100 GHz f/sub max/ SiGe HBTs and 0.13 /spl mu/m CMOS, Proceedings of the Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2002m pp. 189-192. doi: 10.1109/BIPOL.2002.1042915.
3. Wietstruck M., Marschmeyer S., Schulze S., Wipf S.T., Wipf C. and Kaynak M. Recent Developments on SiGe BiCMOS Technologies for mm-wave and THz Applications, 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Boston, MA, USA, 2019, pp. 1126-1129. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8701049.
4. Candra P. et al., A 130nm SiGe BiCMOS technology for mm-Wave applications featuring HBT with fT/fMAX of 260/320 GHz, 2013 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), Seattle, WA, USA, 2013, pp. 381-384. doi: 10.1109/RFIC.2013.6569610.
5. Zimmer T. et al. SiGe HBTs and BiCMOS Technology for Present and Future Millimeter-Wave Systems, in IEEE Journal of Microwaves, Jan. 2021, Vol. 1, No. 1, pp. 288-298. doi: 10.1109/JMW.2020.3031831.
6. Rucker H. et al. A 0.13 μ m SiGe BiCMOS technology featuring fT/fmax of 240/330 GHz and gate delays below 3 ps, 2009 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Capri, Italy, 2009, pp. 166-169. doi: 10.1109/BIPOL.2009.5314251.

7. Dielacher F., Tiebout M., Lachner R., Knapp H., Aufinger K. and Sansen W. SiGe BiCMOS technology and circuits for active safety systems, *Proceedings of Technical Program - 2014 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA), Hsinchu, Taiwan, 2014*, pp. 1-4. doi: 10.1109/VLSI-DAT.2014.6834937.
8. Pekarik J.J. et al. A 90nm SiGe BiCMOS technology for mm-wave and high-performance analog applications, *2014 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Coronado, CA, USA, 2014*, pp. 92-95. doi: 10.1109/BCTM.2014.6981293.
9. Pizzimento L. On novel front-end electronics for the ATLAS BI RPC upgrade at HL-LHC developed in SiGe BiCMOS technology with a high-resolution rad-hard Time-To-Digital converter embedded, in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2024, Vol. 1069. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169892>.
10. Cheng G. et al. A 22-to-36.8 GHz low phase noise Colpitts VCO array in 0.13- μ m SiGe BiCMOS technology, in *Microelectronics Journal*, 2019, Vol. 88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2019.04.004>.
11. Sorge R. et al. JICG CMOS transistors for reduction of total ionizing dose and single event effects in a 130 nm bulk SiGe BiCMOS technology, in *JICG CMOS transistors for reduction of total ionizing dose and single event effects in a 130 nm bulk SiGe BiCMOS technology*, 2021, Vol. 987. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164832>.
12. Malyshev I.V. i dr. Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologii SiGe BiCMOS dlya sozdaniya SVCh mikroskhem [Prospects of using SiGe BiCMOS technology to create microwave microcircuits], *Problemy razrabotki perspektivnykh mikroelektronnykh sistem – 2006: Sb. nauchnykh trudov* [Problems of development of advanced microelectronic systems – 2006: Collection of scientific papers], ed. by A.L. Stempkovskogo. Moscow: IPPM RAN, 2006, pp. 191-193. doi: 10.1109/ESSDERC.2000.194715.
13. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. 5th ed. Oxford: Newnes, 2017, 484 p.
14. Karter B., Mancini R. Operatsionnye usiliteli dlya vseh [Operational amplifiers for everyone]: transl. from engl. by A.N. Rabodzeya. Moscow: Dodeka-XXI, 2011, 544 p. (Series “Circuit Engineering”). ISBN 978-5-94120-242-3.
15. Single-Supply, Low Power, Precision FET Input Quad Buffer: datasheet, Analog Devices. Rev. A. Available at: <https://www.rlocman.ru/datasheet/pdf.html?di=168497> (accessed 10 June 2025).
16. Dvornikov O., Chekhovskiy V., Popov A. Razrabotka i primeneniye moshchnykh analogovykh BMK pri proektirovani silovykh analogovykh mikroskhem [Development and application of the powerful analog BICs at designing of the power analog microcircuits], *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2025, No. 5, pp. 14-20.
17. Sedra A.S., Smith K.C. Microelectronic Circuits. 7th ed. Oxford: Oxford University Press, 2015, 1328 p. ISBN 978-0-19-933913-6.
18. Zhuk A., Kleymenkin D., Prokopenko N. SiGe BiCMOS vykhodnye kaskady vysokotemperaturnykh operatsionnykh usiliteley [SiGe BiCMOS output stages of high-temperature operational amplifiers], *Preprints*, 2025. doi: <https://doi.org/10.20944/preprints202504.2193.v1>.
19. Najafzadeh L. et al., "SiGe BiCMOS Precision Voltage References for Extreme Temperature Range Electronics, *2006 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Maastricht, Netherlands, 2006*, pp. 1-4. doi: 10.1109/BIPOL.2006.311117.
20. Cornett K.J., Fu G., Escorcia I. and Mantooth H.A. SiGe BiCMOS fully differential amplifier for extreme temperature range applications, *2009 IEEE Aerospace conference, Big Sky, MT, USA, 2009*, pp. 1-10. doi: 10.1109/AERO.2009.4839517.
21. Dylan T. et al. SiGe Amplifier and Buffer Circuits for High Temperature Applications, *IMAPS International Conference & Exhibition on High Temperature Electronics (HiTEC 2010), USA, 2010*, pp. 1-7. doi: 10.4071/HITEC-DThomas-THA25.
22. Bellini M., Cressler J.D. and Cai J. Assessing the High-Temperature Capabilities of SiGe HBTs Fabricated on CMOS-compatible Thin-film SOI, *2007 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Boston, MA, USA, 2007*, pp. 234-237. doi: 10.1109/BIPOL.2007.4351877.
23. Thomas D.B. et al. Performance and reliability of SiGe devices and circuits for high-temperature applications. *Proceedings, 2009 IMAPS International Conference on High Temperature Electronics Network, HiTEN, 2009*, pp. 49-56.
24. Basu R., Singh A. High temperature Si-Ge alloy towards thermoelectric applications, *A comprehensive review. Materials Today Physics*, No. 21, pp. 1-26. doi: 10.1016/j.mtphys.2021.100468.
25. Zhuk A.A., Bugakova A.A., Prokopenko N.N., Kleymenkin D.V. Programma katalogizatsii i vizualizatsii vykhodnykh kaskadov vysokotemperaturnykh operatsionnykh usiliteley na geteroperekhodnykh n-p-n bipolyarnykh i metall-oksid polevykh tranzistorakh, № RU 2025660214 ot 2025 [Program of cataloging and visualization of output stages of high-temperature operational amplifiers on heterojunction n-p-n bipolar and metal-oxide field-effect transistors, No. RU 2025660214 in 2025].

26. Williams R.S., Tuckerman D.B. Low-noise Darlington amplifier design for high-frequency applications, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1987, Vol. 34, No. 5, pp. 567-574. DOI: 10.1109/TCS.1987.1086185.
27. Gupta A., Singh R. Performance Analysis of Darlington Transistor Arrays in High-Precision Analog Circuits, *Journal of Solid-State Circuits*, 2021, Vol. 56, No. 4, pp. 1123-1132. DOI: 10.1109/JSSC.2020.3040123.
28. Kim H.S., Cho M.J. Integration of Darlington Transistors in Low-Voltage Power ICs for Enhanced Efficiency, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, Vol. 37, No. 2, pp. 2345-2353. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3103456.

Жук Алексей Андреевич – Донской государственный технический университет; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79185880301; младший научный сотрудник отдела «Управление научных исследований»; ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника».

Клейменкин Дмитрий Владимирович – Донской государственный технический университет; e-mail: k-dima-01@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281970049; младший научный сотрудник отдела «Управление научных исследований».

Прокопенко Николай Николаевич – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281201984; зав. кафедрой «Информационные системы и радиотехника».

Zhuk Alexey Andreevich – Don State Technical University; e-mail: alexey.zhuk96@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79185880301; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”; assistant of the Department of Information Systems and Radio Engineering.

Kleimenkin Dmitry Vladimirovich – Don State Technical University; e-mail: k-dima-01@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281970049; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281201984; junior research fellow of the “Office of Scientific Research”; head of Department “Information Systems and Radio Engineering”.

УДК 681.586

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-159-167

С.П. Малюков, В.Д. Мишнев

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГОЙ
МЕМБРАНЫ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ
«КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»**

Высокая точность и повышенные эксплуатационные характеристики датчиков давления необходимы для обеспечения безопасности, качества и эффективности в различных отраслях промышленности и техники. Применение метода конечных элементов (МКЭ) при проектировании датчиков давления позволяет улучшить их точность за счёт более глубокого анализа механических и физических процессов, возникающих при воздействии нагрузки от давления. Целью данной работы является построение цифровой трёхмерной модели чувствительного элемента (ЧЭ) датчика давления и анализ напряжённно-деформированного состояния упругой мембраны под действием нагрузки от давления от 0 до 15 МПа. Основные задачи работы: исследование свойств и параметров материалов, применяющихся в составе чувствительного элемента датчика давления на основе структуры «кремний на сапфире»; получение значений максимального эквивалентного напряжения, возникающего в конструкции упругой мембраны ЧЭ при воздействии нагрузки от давления 125% от номинального значения; распределение радиальных и тангенциальных деформаций упругой мембраны и определение наилучшего расположения тензорезисторов на поверхности ЧЭ датчика давления. В результате исследования установлено, что используемые материалы обладают хорошей стойкостью к воздействию агрессивной среды, а также возможностью работы в широком диапазоне температур и при воздействии высоких нагрузок от давления. По результатам моделирования определено значение максимального эквивалентного напряжения, величина