

Прокопенко Николай Николаевич – Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности РАН и ЮРГУЭС; e-mail: prokopenko@sss.ru; 346500, г. Шахты, Шевченко, 147; тел.: +78636222037; первый проректор, проректор по научной работе и международному сотрудничеству.

Будяков Пётр Сергеевич – e-mail: budyakovp@gmail.com; тел.: +79185056136; научный сотрудник.

Бутырлагин Николай Владимирович – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; тел.: +79034320799; инженер-исследователь.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Laboratory of perspective technologies and processes of the Center of researches of problems of safety of Russian Academy of Science and SRSUES; e-mail: prokopenko@sss.ru; 147, Shevchenko, Shakhty, 346500, Russia; phone: +78636222037; first Vice-Vice Rector for scientific work and international collaboration.

Budyakov Petr Sergeevich – e-mail: budyakovp@gmail.com; phone: +79185056136; scientist.

Butyrlagin Nikolay Vladimirovich – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; phone: +79034320799; research engineer.

УДК 621.375

Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, Н.В. Бутырлагин

**МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ ЧАСТОТ
КЛАССИЧЕСКИХ ТРАНЗИСТОРНЫХ КАСКАДОВ С ОБЩЕЙ БАЗОЙ
И ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ***

Рассматривается архитектура широкополосного усилителя на основе классических каскадов с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ), в которую вводится цепь компенсации паразитной емкости коллекторного перехода $C_{кб}$ и емкости на подложку $C_{п}$. Для повышения верхней граничной частоты (f_v) в схему введен параллельный каскад взаимной компенсации импедансов, реализованный на транзисторе по схеме с ОБ и буферном усилителе с единичным коэффициентом передачи. Приводится теоретическое описание предлагаемых усилителей и их компьютерное моделирование в среде P-Spice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар» (амплитудно-частотная характеристика при различных значениях ёмкости корректирующего конденсатора). Показано, что рассматриваемое схемотехническое решение особенно актуально для микросхем с топологическими нормами 0,6÷3 мкм (например, «кремний на изоляторе», «кремний на сапфире» и др.), на основе которых выполняются микросхемы с повышенной радиационной стойкостью и расширенным температурным диапазоном), где присутствуют большие паразитные емкости транзисторов.

Каскад с общей базой; каскад с общим эмиттером; взаимная компенсация.

N.N. Prokopenko, P.S. Budyakov, N.V. Butyrlagin

**METHOD OF EXTEND OPERATING FREQUENCY RANGE
OF THE CLASSICAL TRANSISTOR STAGE WITH A COMMON BASE
AND COMMON EMITTER**

The architecture of a broadband amplifier based on the classical stage with a common base (CB) and common emitter (CE) with a circuit to compensate of parasitic capacitance of the collector junction capacitance C_{cb} and capacitance on substrate C_s are considered. For increase the

* Статья подготовлена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках гранта 14.B37.21.0781.

high-frequency cutoff (f_v) in circuit added parallel cascade of mutual impedance compensation, implemented on the circuit with transistor with CB and buffer amplifier with a single transfer ratio. The theoretical descriptions and computer simulation in P-Spice on models integrated transistors FSUE NPP "Pulsar" of the proposed amplifiers (frequency response function for different values of compensation capacitor) are given. This circuit solution is especially important for ICs with topological rules $0,6 \div 3 \text{ mm}$ (eg "silicon on insulator", "silicon on sapphire", etc.) based on which the implement circuit with increased radiation stability and an extended temperature range), where have large parasitic capacitance of transistors are shown.

Common base stage; common emitter stage; cancellation.

Основой современной аналоговой микроэлектроники являются классические транзисторные каскады с общей базой (ОБ) (рис. 1) и общим эмиттером (ОЭ) [1–2], входящие в структуру многих существующих и разрабатываемых микросхем.

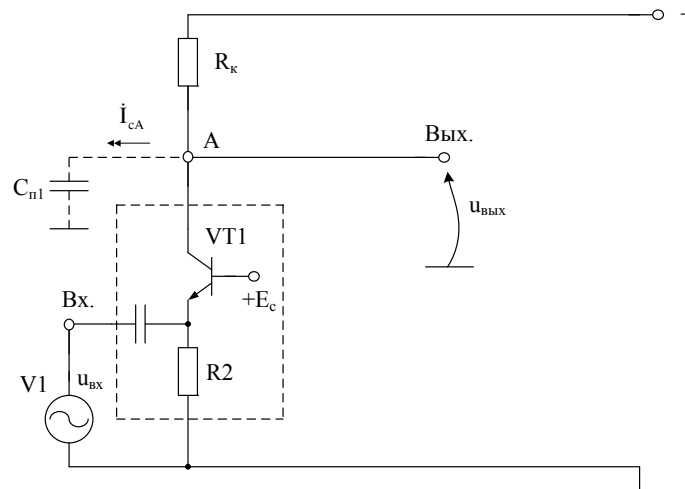


Рис. 1. Функциональная схема классического каскада с ОБ

При этом их верхняя граничная частота f_v (по уровню -3дБ) определяется, в основном, постоянной времени, образуемой паразитной емкостью на подложку $C_{п1}$ и ёмкостью коллектор-база $C_{кб}$ выходного интегрального транзистора VT1:

$$f_v \approx \frac{1}{2\pi\tau_b}, \quad (1)$$

где $\tau_b \approx R_k(C_{п1} + C_{кб})$, R_k – эквивалентное сопротивление в коллекторной цепи выходного транзистора с ОБ (ОЭ).

Для повышения коэффициента усиления по напряжению K_u сопротивление R_k приходится выбирать большим, что снижает верхнюю граничную частоту f_v . В классических каскадах ОБ и ОЭ данное противоречие практически не разрешимо в рамках известных схемотехнических решений. Увеличение f_v схем ОЭ, ОБ – одна из центральных проблем современной микросхемотехники. Ее разрешение особенно актуально для микросхем с топологическими нормами $0,6 \div 3 \text{ мкм}$, так как в рамках данных технологий сегодня выпускается более 70 % дешевых микроэлектронных изделий.

Известны методы повышения f_v широкополосных усилителей (ШУ), рассмотренные в патентах фирм Analog Devices [1], STM Microelectronics [2]. Однако они не универсальны – их практическое применение связано с использованием специальных технологических процессов и уникальной схемотехники, что удорожает конкретные изделия. Так, предложенный в патенте [1] фирмы Analog Devices

схемотехнический прием применим для технологии с диэлектрической изоляцией. Для его осуществления при каждом транзисторе необходимо иметь широкополосный буферный усилитель с малой входной ёмкостью.

Для повышения f_b предлагается введение в схему с ОБ параллельного каскада взаимной компенсации импедансов, реализованного на транзисторе VT2 и буферном усилителе БУ1 (рис. 2).

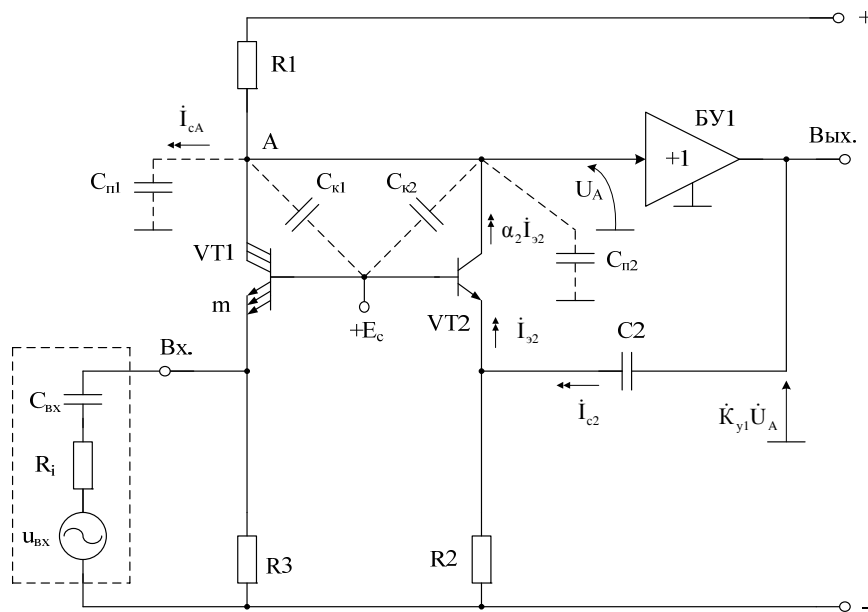


Рис. 2. Схема предлагаемого широкополосного каскада с общей базой [3]

Комплексный коэффициент усиления по напряжению ШУ рис. 1 определяется известной формулой:

$$\dot{K}_y = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} \approx \frac{K_0}{1 + j\omega R_k C_A}, \quad (1)$$

где K_0 – коэффициент усиления каскада с ОБ в диапазоне средних частот, когда влиянием всех конденсаторов можно пренебречь; R_k, C_A – эквивалентное сопротивление коллекторной нагрузки и емкость паразитного конденсатора в узле А.

Для рассматриваемых каскадов с ОБ (рис. 2) и ОЭ (рис. 3):

$$K_0 = K_{0,ОБ} \approx K_{0,ОЭ} \approx \frac{R1}{r_3}, \quad (2)$$

где $r_3=10\div 50$ Ом – сопротивление эмиттерного р-п перехода транзистора VT1.

Причем верхняя граничная частота f_b в ШУ рис. 1 и площадь усиления B_s , определяющая качество ШУ, находятся по формулам:

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_k C_A}, \quad (3)$$

$$B_s = f_b K_0 = \frac{1}{2\pi r_3 C_A}, \quad (4)$$

где C_A – суммарная ёмкость в узле «А».

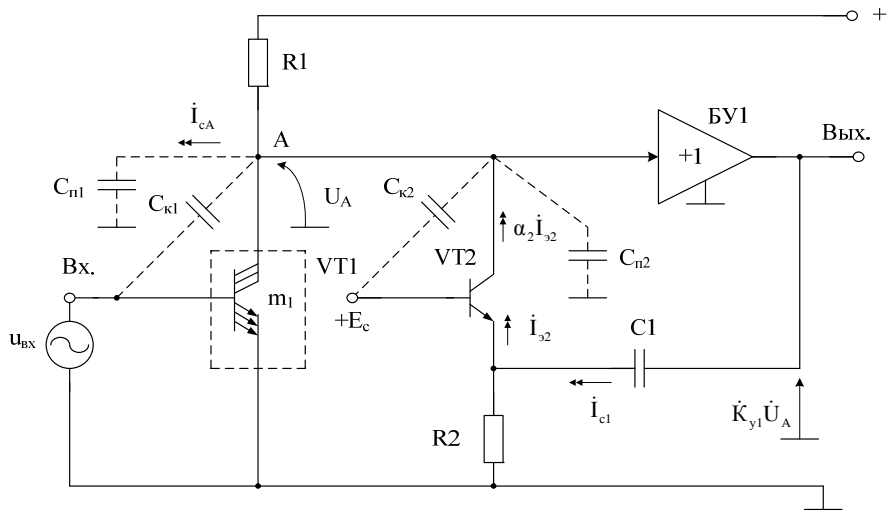


Рис. 3. Схема широкополосного каскада с общим эмиттером (ОЭ)

В предлагаемых каскадах рис. 2 (при выборе буферного усилителя с единичным усилением $\dot{K}_y = 1$) площадь усиления B_s^* и верхняя граничная частота $f_{в.н}$ возрастают:

$$B_s^* \approx \frac{1}{2\pi\tau_3 C_A (1 - \alpha_2)} \gg B_s, \quad (5)$$

$$f_{в.н} = \frac{1}{2\pi R_1 C_A (1 - \alpha_2)}, \quad (6)$$

где $\alpha_2 \leq 0,9 \div 0,99$ – коэффициент усиления по току эмиттера транзистора VT2.

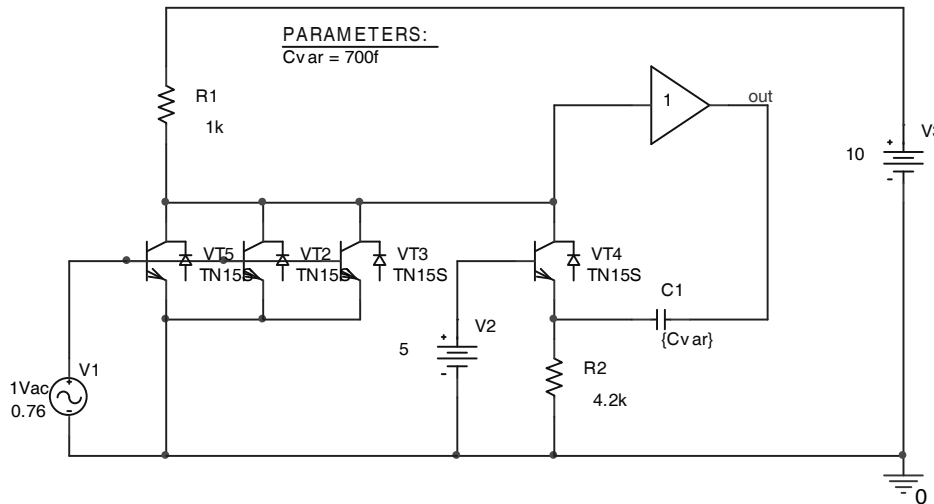


Рис. 4. Схема ШУ с общим эмиттером на моделях интегральных транзисторов ФГУП НПП «Пульсар»

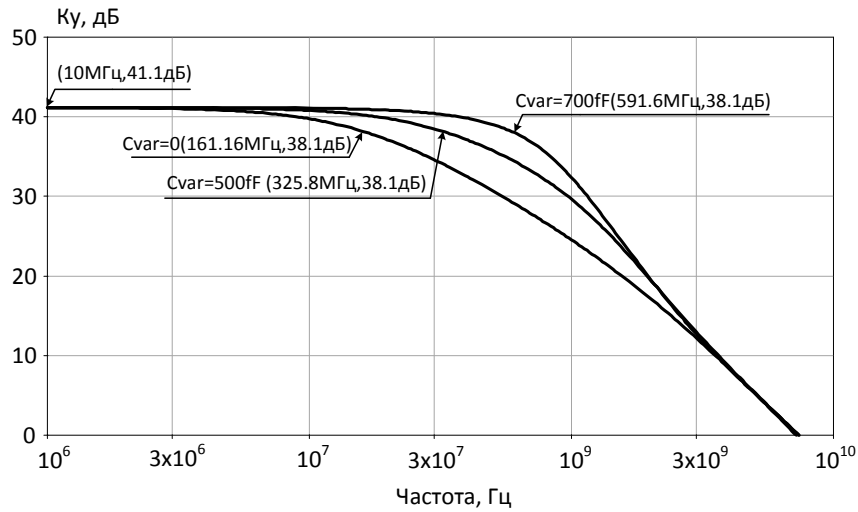


Рис. 5. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики ШУ с ОЭ при различных значениях ёмкости корректирующего конденсатора $C_{var}=C1$

- Данный вывод подтверждается результатами компьютерного моделирования:
- ♦ в схеме ШУ с ОЭ рис. 4 граничная частота f_b возрастает в 3,6 раза (рис. 5);
 - ♦ в схеме ШУ с ОБ рис. 6 верхняя граничная частота f_b увеличивается в сравнении с прототипом в 6,3 раза без ухудшения K_0 (рис. 7).

Таким образом, в рассмотренных ШУ решается одна из фундаментальных проблем современной микроэлектроники – расширение диапазона рабочих частот классических каскадов с общей базой и общим эмиттером. Причем данный эффект реализуется в рамках стандартных, в том числе микронных технологий (например, «кремний на изоляторе», «кремний на сапфире» и др., на основе которых выполняются микросхемы с повышенной радиационной стойкостью и расширенным температурным диапазоном).

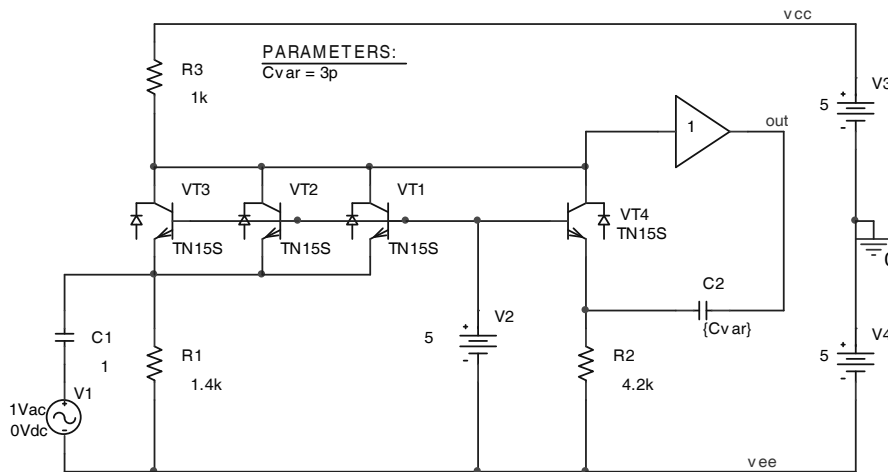


Рис. 6. Схема ШУ с общей базой в среде Pspice на моделях интегральных транзисторов ФГУП НИИ «Пульсар»

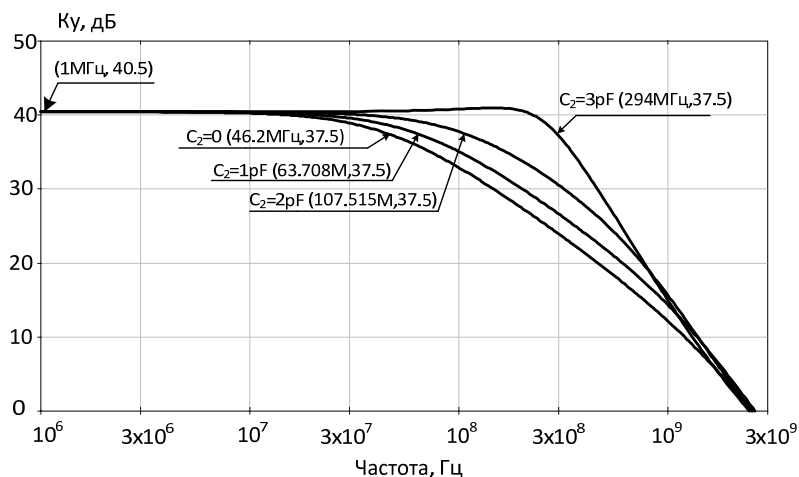


Рис. 7. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики ШУ с ОБ при различных значениях емкости корректирующего конденсатора $C_{var}=C_2$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Parasitic capacitance cancellation circuit: патент США №5.434.446, H01L 2712; H01L 2702, Edward B. Hilton, Robert A. Duris; Original Assignee: Analog Devices, Inc. Filing: Aug 8, 1994, Issue: Jul 18, 1995.
2. Parasitic capacitance reduction for passive charge read-out: патент США №6.233.012, H04N 314; H04N 964, Roberto Guerrieri, Marco Bisio; Original Assignee: STMicroelectronics, Inc., Filing: Nov 5, 1997, Issue: May 15, 2001.
3. Широкополосный усилитель на основе каскада с общей базой (или с общим эмиттером); Н03F 3/68 / Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бутырлагин Н.В. – № 2012155404/08; заявл. 19.12.12 (511).

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

Прокопенко Николай Николаевич – Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности РАН и ЮРГУЭС; e-mail: prokopenko@sssu.ru; 346500, г. Шахты, Шевченко, 147; тел.: +78636222037; первый проректор, проректор по научной работе и международному сотрудничеству.

Будяков Пётр Сергеевич – e-mail: budyakovp@gmail.com; тел.: +79185056136; научный сотрудник.

Бутырлагин Николай Владимирович – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; тел.: +79034320799; инженер-исследователь.

Prokopenko Nikolay Nikolaevich – Laboratory of perspective technologies and processes of the Center of researches of problems of safety of Russian Academy of Science and SRSUES; e-mail: prokopenko@sssu.ru; 147, Shevchenko, Shakhty, 346500, Russia; phone: +78636222037; first Vice -Vice Rector for scientific work and international collaboration.

Budyakov Petr Sergeevich – e-mail: budyakovp@gmail.com; phone: +79185056136; scientist.

Butyrlagin Nikolay Vladimirovich – e-mail: nbutyrlagin@mail.ru; phone: +79034320799; research engineer.