



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.774.3

СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Я. Д. ГАЛКИН^{1,2}, О. В. ДВОРНИКОВ³, В. А. ЧЕХОВСКИЙ², Н. Н. ПРОКОПЕНКО⁴

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(г. Минск, Республика Беларусь)

³ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 30.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Для удовлетворения существующей потребности отечественного рынка радиоэлектронной аппаратуры в быстродействующих широкополосных операционных усилителях ранее было предложено использование базового матричного кристалла МН2ХА031, содержащего комплементарные биполярные транзисторы, совместно с разработанными схемами быстродействующего операционного ОАmp9 и прецизионного операционного ОАmp10 усилителей с унифицированными каскадами и возможностью программирования таких параметров, как ток потребления, максимальный выходной ток, полоса пропускания, скорость нарастания выходного напряжения. В статье рассмотрено увеличение быстродействия указанных операционных усилителей за счет уменьшения паразитной коллекторной емкости транзисторов подачей обратного напряжения смещения в ОАmp9 и применения корректирующих цепей в ОАmp10, что позволило увеличить скорость нарастания выходного напряжения на 29 % в первом случае и в 3,1 раза во втором. Приведены электрические схемы и результаты схемотехнического моделирования модернизированных усилителей, названных ОАmp9М и ОАmp10М, которые соответственно характеризуются напряжением смещения нуля 0,35 и 0,03 мВ, коэффициентом усиления напряжения $2,7 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^5$, произведением коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания 161 МГц и 68 МГц, скоростью нарастания выходного напряжения 708 и 64,5 В/мкс.

Ключевые слова: быстродействующий операционный усилитель, прецизионный операционный усилитель, базовый матричный кристалл, комплементарные биполярные транзисторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Схемотехническая модернизация операционных усилителей для увеличения скорости нарастания выходного напряжения / Я. Д. Галкин [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53>.

CIRCUIT DESIGN MODERNIZATION OF OPERATIONAL AMPLIFIERS FOR INCREASING SLEW RATE OF OUTPUT VOLTAGE

YAROSLAV D. GALKIN^{1,2}, OLEG V. DVORNIKOV³, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI²,
NIKOLAY N. PROKOPENKO⁴

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

³JSC "Minsk Research Instrument-Making Institute" (Minsk, Republic of Belarus)

⁴Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Submitted 30.01.2023

Abstract. To meet the existing needs of the domestic market of radio electronic equipment in high-speed wideband operational amplifiers, it was previously proposed to use the MH2XA031 master slice array containing complementary bipolar transistors, together with the developed circuits of the OAmpl9 high-speed operational amplifier and the OAmpl10 precision operational amplifier with unified cascades and the ability to program parameters such as current consumption, maximum output current, bandwidth, slew rate. The article discusses the increase in the performance of these operational amplifiers by reducing the parasitic collector capacitance of transistors by applying a reverse bias voltage to OAmpl9 and using correction circuits in OAmpl10, which made it possible to increase the output voltage slew rate by 29 % in the first case and 3.1 times in the second. The electrical circuits and the results of circuit simulation of the upgraded amplifiers, called OAmpl9M, OAmpl10M, are presented, which are respectively characterized by a zero offset voltage of 0.35 and 0.03 mV, a voltage gain of $2.7 \cdot 10^3$ and $3 \cdot 10^5$, the gain bandwidth product 161 and 68 MHz, output voltage slew rate 708 and 64.5 V/ μ s.

Keywords: high speed operational amplifier, precision operational amplifier, master slice array, complementary bipolar transistors.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Galkin Ya. D., Dvornikov O. V., Tchekhovski V. A., Prokopenko N. N. (2023) Circuit Design Modernization of Operational Amplifiers for Increasing Slew Rate of Output Voltage. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 46–53. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-46-53> (in Russian).

Введение

Быстродействующие широкополосные операционные усилители (ОУ) широко применяются в различной аппаратуре двойного и специального назначения. Проведенный анализ рынка таких изделий позволил отметить следующее [1]:

– в настоящее время затруднена возможность приобретения зарубежных микросхемных устройств, в том числе быстродействующих широкополосных ОУ;

– большинство из быстродействующих ОУ проектируется на комплементарных биполярных (КБ) транзисторах [2, 3] с малой паразитной емкостью коллектора, обеспечиваемой за счет применения диэлектрической изоляции интегральных элементов. Такие технологические маршруты отсутствуют на отечественных предприятиях;

– возможным решением отсутствующих маршрутов являются одновременное проведение работ по проектированию быстродействующих ОУ для имеющегося КБ-техмаршрута ЗСВТ (ОАО «Интеграл») [4] и модернизация техмаршрута изготовления микросхем с целью уменьшения паразитной емкости коллектора и увеличения граничной частоты КБ-транзисторов;

– относительно невысокая потребность отечественного рынка в быстродействующих ОУ делает целесообразным их проектирование на базовом матричном кристалле (БМК) MH2XA031 [5], изготовленном по ЗСВТ-техмаршруту.

Ранее на БМК MH2XA031 [5] были разработаны два быстродействующих ОУ с унифицированными каскадами и возможностью программирования параметров, в одном из которых (OAmpl9) значительно улучшены динамические параметры (скорость нарастания выходного напряжения (output voltage slew rate, SL), произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания (gain band width product, GBP)), а в другом (OAmpl10) – статические параметры (напряжение смещения нуля V_{OFF} , коэффициент усиления напряжения K_V при разомкнутой цепи отрицательной обратной связи, и уровень шума) [1]. В статье рассматриваются модернизированные схемы ОУ (OAmpl9M, OAmpl10M) с увеличенной скоростью нарастания выходного напряжения.

Результаты схемотехнической и параметрической модернизации

Электрические схемы модернизированных ОУ для программного обеспечения LTSpice приведены на рис. 1, 2.

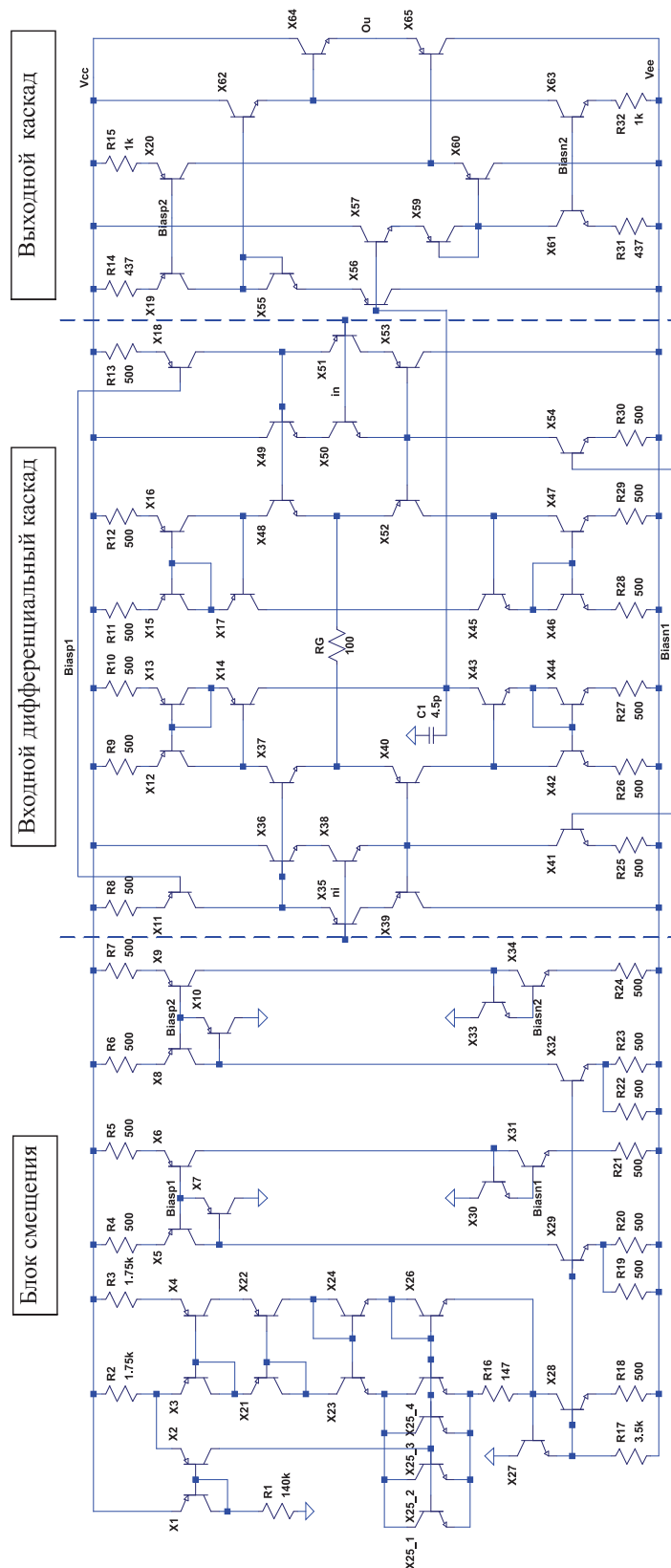


Рис. 1. Электрическая схема операционного усилителя OAm9M
Fig. 1. Electrical circuit of the OAm9M operational amplifier

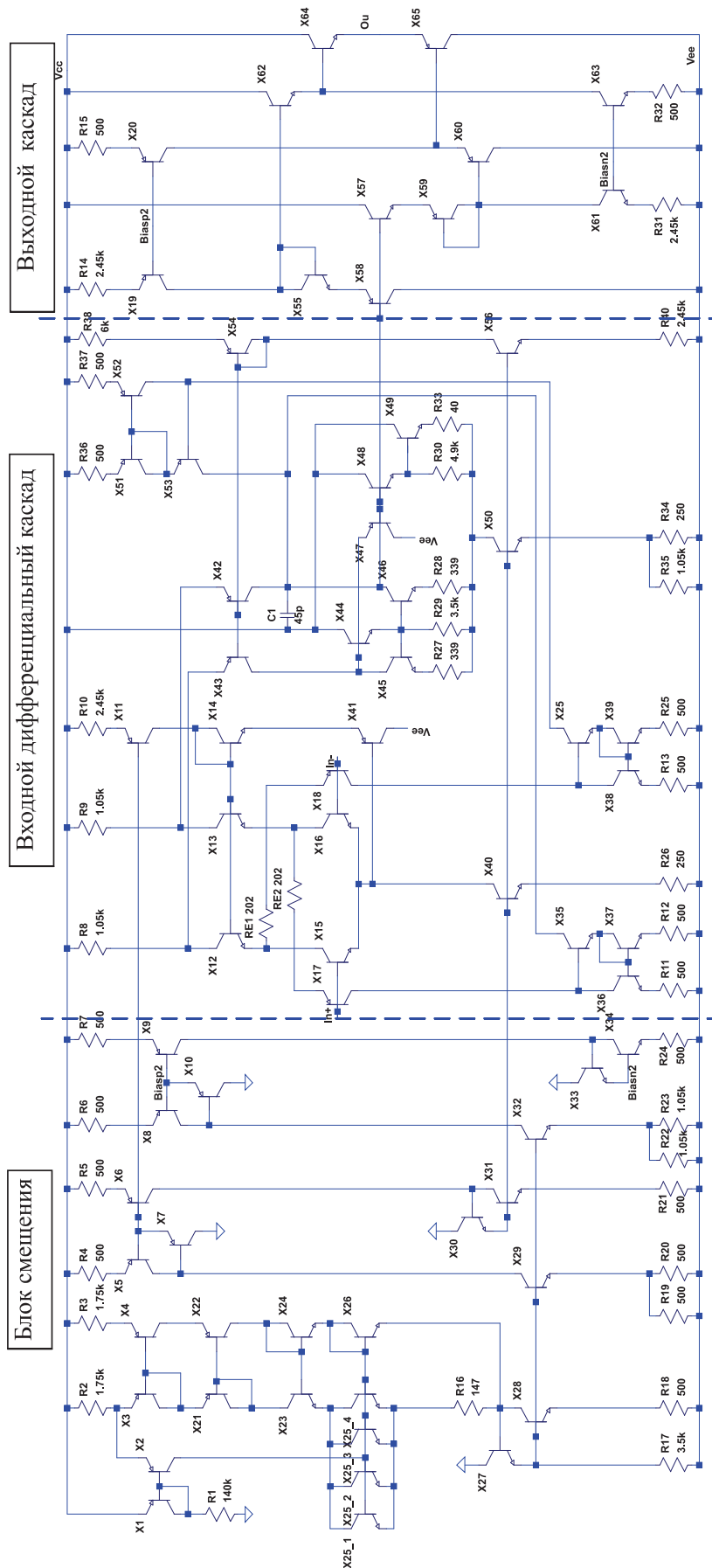


Рис. 2. Электрическая схема операционного усилителя OAmpl10M
Fig. 2. Electrical circuit of the OAmpl10M operational amplifier

Каждый ОУ содержит одинаковые по схемотехнике блок смещения и выходной каскад и разные входные дифференциальные каскады. Узлы с одинаковым наименованием (V_{CC} , V_{EE} , $Biasn1$, $Biasn2$, $Biasp1$, $Biasp2$) внутри каждого ОУ соединены. Указанные на схемах сопротивления резисторов получены последовательно-параллельным соединением имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1,00 и 2,45 кОм. Так, резистор $R38 = 6$ кОм на рис. 2 представляет собой соединение 2,45 кОм + 2,45 кОм + 1 кОм + 1 кОм/10. Программирование параметров каждого входного дифференциального каскада осуществляется в блоке смещения отключением резистора $R19$, а изменение нагрузочной способности выходного каскада – отключением $R22$. Блок смещения построен по типовой схеме РТАТ-источника тока (proportional to absolute temperature) [6] с цепью запуска на $X1$, $X2$, $R1$. Подробно работа отдельных блоков рассмотрена в [1].

Заметим, что схемы на рис. 1, 2 приведены без каких-либо упрощений и сокращений. Это позволяет, с одной стороны, показать достаточность использования только двух имеющихся на БМК резисторов с сопротивлениями 1,00 и 2,45 кОм для получения требуемого отношения сопротивлений, а с другой – непосредственно применять рассматриваемые ОУ и их отдельные блоки в других разработках аналоговых схем. КБ-транзисторы на схемах обозначены префиксом X , что в соответствии с правилами LTSpice указывает на то, что эти элементы реализованы в виде подсхем.

Известно, что на быстродействие ОУ существенно влияет паразитная емкость, соединенная с коллектором. Применяемые подсхемы транзисторов на рис. 3, 4 позволяют адекватно учесть это влияние, так как паразитная емкость коллектора $n-p-n$ -транзистора ($DSubnnpn$) подключена между коллектором и глобальным узлом sub , а $p-n-p$ -транзистора ($DWpnp$) – между коллектором и глобальным узлом w , которые при моделировании соединены с отдельными источниками напряжения V_S и V_W соответственно

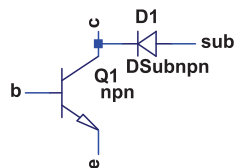


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема $n-p-n$ в LTSpice

Fig. 3. Equivalent electrical circuit $n-p-n$ in LTSpice

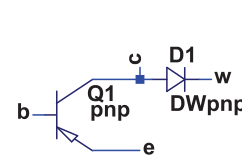


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема $p-n-p$ в LTSpice

Fig. 4. Equivalent electrical circuit $p-n-p$ in LTSpice

Отличие модернизированного ОУ OAmpl9M от исходного минимально, а именно: $R22 = R23 = 500$ Ом (было 1 кОм), $R_G = 100$ Ом (было 140 Ом), $R14 = R31 = 437$ Ом (было 500 Ом). Однако при схемотехническом моделировании были применены уточненные Spice-параметры диодов $DSubnnpn$, $DWpnp$ и изучено влияние абсолютной величины напряжения источников V_S и V_W на скорость нарастания выходного напряжения.

В OAmpl10M тоже несколько изменены сопротивления резисторов: $R14 = R31 = 2,45$ кОм (было 9,5 кОм), $R27 = R28 = 339$ Ом (было 250 Ом), введены повторители тока на $n-p-n$ ($X35-X37$; $X25$, $X38$, $X39$) и $p-n-p$ ($X51-X53$) транзисторах и цепи ($RE1$, $X18$; $RE2$, $X17$), формирующие импульс тока при большой амплитуде входного импульса ОУ, похожие на решение, приведенное в [7]. Тщательный анализ нескольких вариантов корректирующих цепей, увеличивающих быстродействие ОУ, будет выполнен в отдельной статье.

Результаты схемотехнического моделирования скорости нарастания выходного напряжения на рис. 5, 6 иллюстрируют эффективность принятых мер, особенно для OAmpl10M, а данные табл. 1 подтверждают высокий уровень параметров модернизированных усилителей.

Таблица 1. Результаты схемотехнического моделирования операционных усилителей
Table 1. Results of circuit simulation of the operational amplifiers

Параметр / Parameter	Операционный усилитель / Operational amplifier	
	OAmpl9M	OAmpl10M
Напряжение питания V_{CC} , В	-5/5	-5/5
Ток потребления в режиме холостого хода I_{CC} , мА	21,73	8,53
Напряжение смещения нуля V_{OFF} , мВ	0,35	0,03
Коэффициент усиления напряжения K_V	$2,7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^5$

Окончание табл. 1
Ending of Tab. 1

Параметр / Parameter	Операционный усилитель / Operational amplifier	
	OАmp9M	OАmp10M
Входной ток I_{IN} , мкА	2,71	8,75
Произведение коэффициента усиления напряжения на ширину полосы пропускания GBP , МГц	161*/620**	68*
Минимальный запас по фазе в полосе пропускания Δ	40*/68**	46*
Максимальная скорость нарастания выходного напряжения SL , В/мкс	708*	64,5
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу, e_N , нВ/Гц ^{0,5} , при частоте 1 кГц	2,64	1,15
* $K_V = 1$, $C1 = 4,5$ пФ для OАmp9M. ** $K_V = 10$, $C1 = 1$ пФ для OАmp9M.		

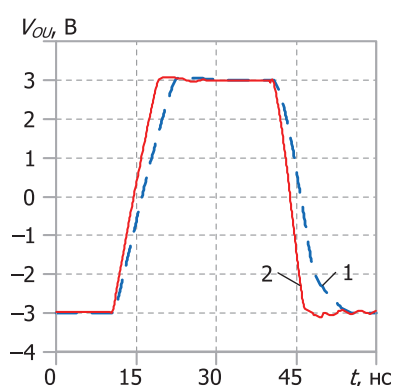


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения V_{OU} от времени t при включении операционных усилителей как повторителей напряжения: 1 – OАmp9 при $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 5$ В; 2 – OАmp9M при $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 10$ В
Fig. 5. $V_{OU}(t)$ characteristics when operational amplifiers are connected as a voltage follower: 1 – OАmp9 when $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 5$ V; 2 – OАmp9M when $|V_{S1}| = |V_{M1}| = 10$ V

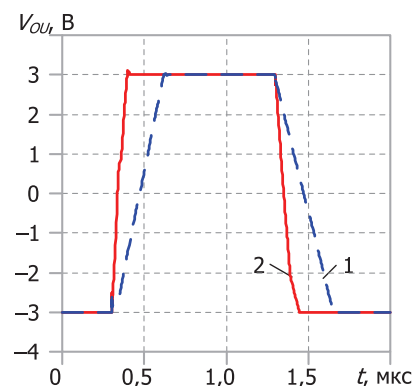


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения V_{OU} от времени t при включении операционных усилителей как повторителей напряжения: 1 – OАmp10; 2 – OАmp10M
Fig. 6. $V_{OU}(t)$ characteristics when operational amplifiers are connected as a voltage follower: 1 – OАmp10; 2 – OАmp10M

Заключение

1. Для элементов базового матричного кристалла МН2ХА031 модернизированы схемы двух операционных усилителей, названных OАmp9M и OАmp10M. Схемотехническое моделирование показало, что OАmp9M характеризуется следующими параметрами: $K_V > 2,7 \cdot 10^3$, $V_{OFF} < 0,35$ мВ, $GBP > 161$ МГц и $SL > 708$ В/мкс, а OАmp10M – $K_V > 3 \cdot 10^5$, $V_{OFF} < 0,03$ мВ, $GBP > 68$ МГц и $SL > 64,5$ В/мкс.

2. Схемотехническая и параметрическая модернизация позволила увеличить скорость нарастания выходного напряжения OАmp9M на 29 % по сравнению с OАmp9 и в 3,1 раза в OАmp10M по сравнению с OАmp10.

3. Эффективность корректирующих цепей в OАmp10M стимулирует продолжение работ в этой области, результаты которых будут рассмотрены в отдельной статье.

Список литературы

1. Быстродействующие широкополосные операционные усилители на базовом матричном кристалле / О. В. Дворников [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2023. Т. 28, № 1. С. 96–111. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111.
2. Bowers, D. F. Recent Developments in Bipolar Operational Amplifiers / D. F. Bowers, S. A. Wurcer // Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Cat. No 99CH37024, 28–28 Sept. 1999. P. 38–45. DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.

3. Close, J. High Speed OP Amps: Performance, Process and Topologies / J. Close // 2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). P. 1–8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
4. Прокопенко, Н. Н. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков / Н. Н. Прокопенко, О. В. Дворников, А. В. Бугакова. М.: СОЛОН-Пресс, 2021.
5. Проектирование аналоговых микросхем для экстремальных условий эксплуатации на основе базового матричного кристалла МН2ХА031 / О. В. Дворников [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 2. С. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46>.
6. Дворников, О. В. Схемотехника биполярно-полевых аналоговых микросхем. Ч. 3. Источники тока, управляемые током с нерегулируемым коэффициентом передачи / О. В. Дворников // ChipNews. 2005. № 1. С. 12–15.
7. Прокопенко, Н. Н. Дифференциальный операционный усилитель с повышенным быстродействием / Н. Н. Прокопенко // Приборы и техника эксперимента. 1978. № 2. С. 153–154.

References

1. Dvornikov O. V., Chekhovsky V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2023) High-Speed Wideband Operational Amplifiers on Master Slice Array. *Izvestiya vuzov. Elektronika*. 28 (1), 96–111. DOI: 10.24151/1561-5405-2023-28-1-96-111 (in Russian).
2. Bowers D. F., Wurcer S. A. (1999) Recent Developments in Bipolar Operational Amplifiers. *Proceedings of the 1999 Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, Cat. No 99CH37024, 28–28 Sept. 1999*. 38–45. DOI: 10.1109/BIPOL.1999.803521.
3. Close J. (2012) High Speed OP Amps: Performance, Process and Topologies. *2012 IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM)*. 1–8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
4. Prokopenko N. N., Dvornikov O. V., Bugakova A. V. (2021) *Designing Low-Temperature and Radiation-Hardened Analog Circuits for Processing Sensor Signals*. Moscow, SOLON-Press Publ. (in Russian).
5. Dvornikov O. V., Tchekhovskiy V. A., Prokopenko N. N., Galkin Y. D., Kunts A. V., Chumakov V. E. (2021) Analog Integrated Circuits Design for Extreme Environmental Conditions on the Base of Master Slice Array МН2ХА031. *Problems of Development of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems (MES)*. (2), 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31114/2078-7707-2021-2-37-46> (in Russian).
6. Dvornikov O. V. (2005) Schematics of Bipolar-Field Analog Microcircuits. Part. 3 Current Controlled Current Sources with Unregulated Transfer Ratio. *Chip News*. (1), 12–15 (in Russian).
7. Prokopenko N. N. (1978) Differential Operational Amplifier with Increased Performance. *Pribory i Tehnika Eksperimenta*. (2), 153–154 (in Russian).

Вклад авторов

Галкин Я. Д. выполнил схемотехническое моделирование и параметрическую оптимизацию операционных усилителей.

Дворников О. В. выполнил анализ современного состояния проблемы по теме работы, сформулировал цель и задачи исследований, провел идентификацию параметров моделей.

Чеховский В. А. участвовал в схемотехническом моделировании и параметрической оптимизации OАmp10М.

Прокопенко Н. Н. предложил и обосновал введение дополнительных цепей, увеличивающих быстродействие OАmp10М.

Authors' contribution

Galkin Ya. D. has performed circuit simulation and parametric optimization of operational amplifiers.

Dvornikov O. V. has analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the work, has performed the identification of model parameters.

Tchekhovskiy V. A. has taken part in circuit simulation and parametric optimization of OАmp10М.

Prokopenko N. N. has proposed and substantiated the insertion of additional circuits that increase the performance of OАmp10М.

Сведения об авторах

Галкин Я. Д., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, мл. н. с. лаборатории электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Дворников О. В., д. т. н., доцент, гл. н. с. ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт»

Чеховский В. А., заведующий лабораторией электронных методов и средств эксперимента НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Прокопенко Н. Н., д. т. н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 25 725-07-75
E-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Галкин Ярослав Денисович

Information about the authors

Galkin Ya. D., Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of the NRU “Research Institute for Nuclear Problems” of the Belarusian State University

Dvornikov O. V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Principal Researcher at the JSC “Minsk Research Instrument-Making Institute”

Tchekhovski V. A., Head of the Electronic Methods and Experiment Means Laboratory of the NRU “Research Institute for Nuclear Problems” of the Belarusian State University

Prokopenko N. N., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Systems and Radioelectronics Department of the Don State Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 725-07-75
E-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Galkin Yaroslav Denisovich