

19. *Korsunskiy V.A.* Perspektivy razvitiya voennykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov nazemnogo bazirovaniya v Rossii [Prospects for the development of military mobile robotic complexes of ground-based in Russia]. Moscow: MGTU im. Baumana, 2013, 379 p.
20. *Skiba V.A. i dr.* Robototekhnicheskie komplekсы voennogo naznacheniya: ucheb. posobie [Robotic complexes for military purposes: studies. stipend]. Balashikha: VA RVSN im. Petra Velikogo, 2021, 168 p.
21. *Lopota A.V.* Nazemnye robototekhnicheskie komplekсы voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Ground-based robotic complexes for military and special purposes]. St. Petersburg: TSNI robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2016, 29 p.
22. *Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V.* Opyt sozdaniya avtonomnykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya [Experience in creating autonomous mobile robotic-technical complexes for special purposes], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. «Spetsial'naya robototekhnika i mekhatronika»* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. "Special robotics and mechatronics"], 2011, pp. 7-24.
23. *Rubtsov I.V.* Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya otechestvennoy nazemnoy robototekhniki voennogo i spetsial'nogo naznacheniya [Issues of the state and prospects of development of domestic ground-based robotics for military and special purposes], *Izbrannye Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Selected Works of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks"], 2015, Vol. II, pp. 64-70.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. профессор Ю.А. Пушкарев.

Пискулин Игорь Викторович – Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого; e-mail: pikselzte@gmail.com; г. Серпухов, Россия; тел.: 89257250636; преподаватель.

Piskulin Igor Viktorovich – Branch of the Military Academy of the Peter the Great Strategic Missile Forces; e-mail: pikselzte@gmail.com; Serpukhov, Russia; phone: +79257250636; lecturer.

УДК 621.375.9

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-148-156

Н.Н. Прокопенко, Д.В. Клейменкин, М.А. Сергеенко

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ «ПЕРЕГНУТОГО» КАСКАДА*

Предлагаются три схемотехнических приема, обеспечивающих (при одновременном использовании) повышение более чем на два порядка максимальной скорости нарастания выходного напряжения (SR) микроэлектронных операционных усилителей (ОУ) на биполярных транзисторах с классической архитектурой, предназначенных для работы в системах автоматического управления, радиотехники и связи, например, в качестве драйверов сверхбыстродействующих аналого-цифровых преобразователей (EVIОAS150, EVIОAS350, AD9208, AD9691, 1273ПВ14 и др.). Рассматриваемые ОУ содержат каскадный входной каскад с нелинейной коррекцией проходной характеристики и цепью следящей связи, повышающей коэффициент ослабления входных синфазных сигналов и коэффициент подавления помех по шинам питания, а также промежуточный каскад на основе «перегнутого» каскада. Применение «перегнутого» каскада позволяет повысить эффективность использования напряжений источников питания, а также увеличить частоту единичного усиления скорректированного ОУ. Однако, такой промежуточный каскад является существенным нелинейным звеном, ограничивающим максимальные выходные токи, перезаряжающие корректирующий конденсатор ОУ. Приводятся результаты компьютерного моделирования двух модификаций ОУ AmpSR1, AmpSR2, отличающихся друг от друга структурой нелинейного параллельного канала, устраняющего динамическую перегрузку «перегнутого»

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00637).

каскада. Актуальность выполненных исследований связана с проблемами импортозамещения в классе быстродействующих ОУ и отсутствием у дизайнеров аналоговых схем новых и перспективных идей повышения SR ОУ, базирующихся на одновременном использовании нелинейных и дифференцирующих цепей коррекции переходного процесса в режиме большого сигнала. Рассмотренные схемотехнические приемы эффективны и при использовании CMOS технологических процессов.

Операционный усилитель; максимальная скорость нарастания выходного напряжения; «перегнутый» каскод; нелинейная коррекция; нелинейные параллельные каналы; дифференцирующие цепи коррекции.

N.N. Prokopenko, D.V. Kleimenkin, M.A. Sergeenko

CIRCUITRY METHODS FOR INCREASING THE SPEED OF OPERATIONAL AMPLIFIERS BASED ON A "FOLDED" CASCODE

Three circuit techniques are proposed that provide (with simultaneous use) an increase by more than two orders of magnitude of the maximum output voltage slew rate (SR) of microelectronic operational amplifiers (op-amps) based on bipolar transistors with a classical architecture, designed to operate in automatic control systems, radio engineering and communications, for example, as drivers for ultra-high-speed analog-to-digital converters (EVIOAS150, EVIOAS350, AD9208, AD9691, 1273PV14, etc.). The considered op-amps contain a cascode input stage with a non-linear correction of the pass-through characteristic and a tracking circuit that increases the attenuation coefficient of the input common-mode signals and the noise suppression coefficient on the power buses, as well as an intermediate stage based on a "folded" cascode. The use of a "folded" cascode makes it possible to increase the efficiency of using power supply voltages, as well as to increase the unity gain frequency of the corrected op-amp. However, such an intermediate stage is an essential non-linear link that limits the maximum output currents that recharge the op-amp correction capacitor. The results of computer simulation of two modifications of the AmpSR1, AmpSR2 op amps, which differ from each other in the structure of a nonlinear parallel channel, which eliminates the dynamic overload of a "folded" cascode, are presented. The relevance of the research performed is related to the problems of import substitution in the class of high-speed op-amps and the lack of new and promising ideas for increasing the SR of the op-amp based on the simultaneous use of non-linear and differentiating transient correction circuits in the large signal mode among analog circuit designers. The considered circuit techniques are also effective when using CMOS technological processes.

Operational amplifier; maximum output voltage slew rate; "folded" cascode; nonlinear correction; nonlinear parallel channels; differentiating correction circuits.

Введение. В системах автоматического управления (САУ) радиотехники и связи различного функционального назначения широко применяются операционные усилители (ОУ), динамические параметры которых в режиме большого сигнала оказывают существенное влияние на параметры САУ [1]. В этой связи методам повышения быстродействия микросэлектронных ОУ всегда уделялось существенное внимание [2–14]. При этом использовались как схемотехнические [2–14], так и технологические [15] приемы.

Цель и новизна настоящей статьи состоит в рассмотрении новых схемотехнических методов повышения быстродействия достаточно распространенного подкласса ОУ, которые используют «перегнутые» каскоды в качестве промежуточного каскада [16, 17]. Такой «перегнутый» каскод является существенным нелинейным звеном в структуре ОУ и оказывает отрицательное влияние на максимальную скорость нарастания выходного напряжения (SR) в режиме большого сигнала.

1. Многоканальный операционный усилитель AmpSR1 с квазилинейным входным каскадом и дифференцирующими цепями коррекции переходного процесса. На рис. 1 приведена схема предлагаемого ОУ AmpSR1 [18], который содержит каскодный входной дифференциальный каскад VT1, VT2, VT3, VT4 с цепью

На рис. 2 приведен статический режим ОУ в среде LTSpice на моделях транзисторов базовых матричных кристаллов МН2ХА031_25.01.21 [20] при 27°C, резисторах $R1=R2=100$ Ом, $R3=R4=5$ кОм, источниках опорного тока $I1=400$ мкА, $I2=100$ мкА, источнике опорного напряжения $V6=3$ В.

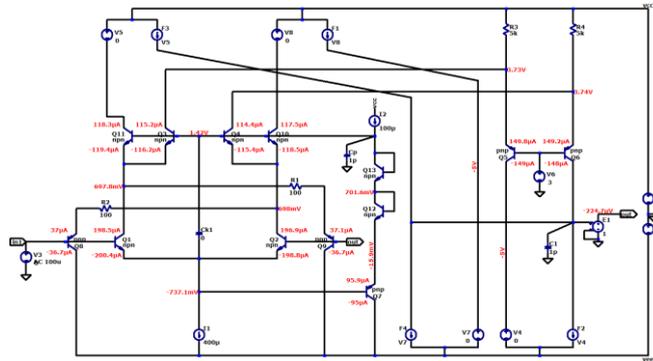


Рис. 2. Статический режим схемы ОУ на рис. 1 в среде LTSpice

На рис. 3 показаны результаты моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) ОУ на рис. 2.

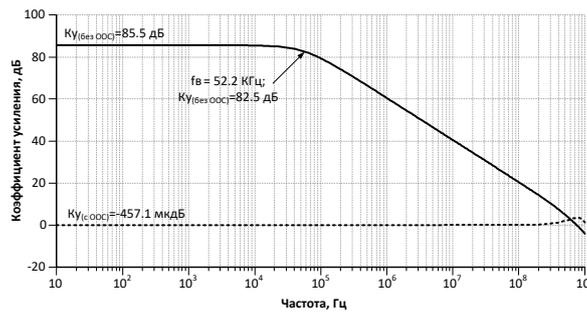


Рис. 3. ЛАЧХ коэффициента усиления ОУ на рис. 2

Передний и задний фронты переходного процесса в ОУ на рис. 2 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора $Ck1$ показаны на рисунках 4 и 5 соответственно.

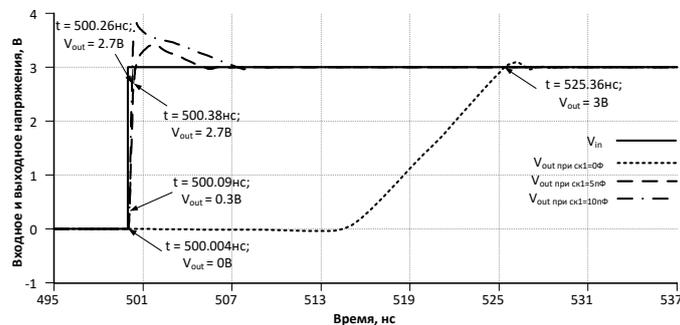


Рис. 4. Передний фронт переходного процесса в ОУ на Рис. 2 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора ($Ck1=0 \div 10$ нФ)

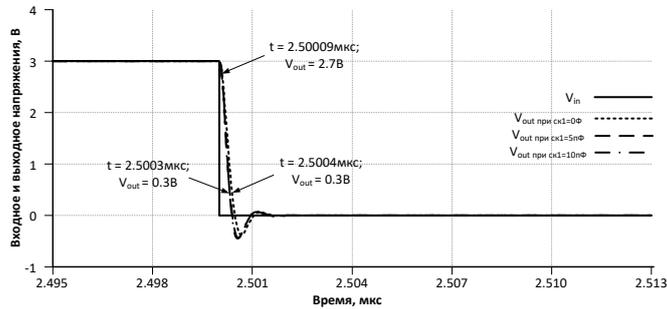


Рис. 5. Задний фронт переходного процесса в ОУ на Рис. 2 при $C_{k1}=0\div 10$ пФ

При отсутствии дифференцирующего конденсатора C_{k1} переходным процессам на рис. 4 и 5 соответствуют следующие значения SR : для переднего фронта $SR^{(+)} = 115$ В/мкс, для заднего фронта $SR^{(-)} = 6153$ В/мкс. Таким образом, при $C_{k1}=0$ операционный усилитель имеет существенно отличающиеся значения $SR^{(+)}$ и $SR^{(-)}$. Этот эффект объясняется задержкой сигнала в цепи следящей связи из-за влияния паразитной емкости C_p в цепях базы транзисторов $VT3$, $VT4$ [18].

Введение дифференцирующего конденсатора $C_{k1}=10$ пФ обеспечивает повышение предельных значений максимальной скорости нарастания выходного напряжения до уровней: $SR^{(+)} = 14117,0$ В/мкс, $SR^{(-)} = 11428,0$ В/мкс. Данные значения SR получены при идеальных токовых зеркалах ПТ1, ПТ3 и буферном усилителе БУ. В качестве этих функциональных узлов могут применяться сотни известных схемотехнических решений [1], что позволяет за счет оптимизации схем приблизить практические значения SR к предельным значениям $SR_{max} \approx 11,5-14,1$ тыс. В/мкс.

2. Быстродействующий операционный усилитель AmpSR2 с модифицированным нелинейным параллельным каналом. Отличие схемы ОУ AmpSR2 на рис. 6 состоит в использовании транзисторов $VT8$, $VT9$ для управления токовыми зеркалами ПТ1 и ПТ2 и передачи больших импульсных токов во время переходного процесса в интегрирующую корректирующую емкость C_k . При этом малосигнальная ЛАЧХ ОУ определяется каскодным входным каскадом $VT1$, $VT4$ и промежуточным «перегнутым» каскадом $VT5$, $VT6$.

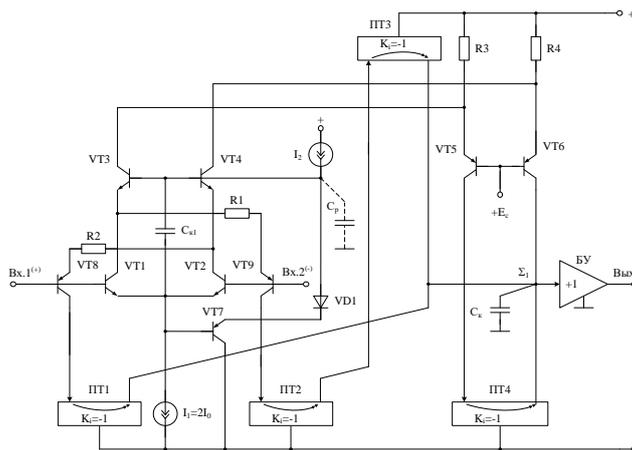


Рис. 6. Быстродействующий операционный усилитель AmpSR2 с модифицированным нелинейным параллельным каналом

На рис. 7 приведен статический режим ОУ на рис. 6 в среде LTSpice на моделях транзисторов MН2ХА031_25.01.21 [20] при 27°C, резисторах R1=R2=100 Ом, R3=R4=5 кОм, источниках опорного тока I1=I2=400мкА, конденсаторах C1=4пФ, Cк1=0Ф, Ср=1пФ напряжениях питания V1=V2=±5В.

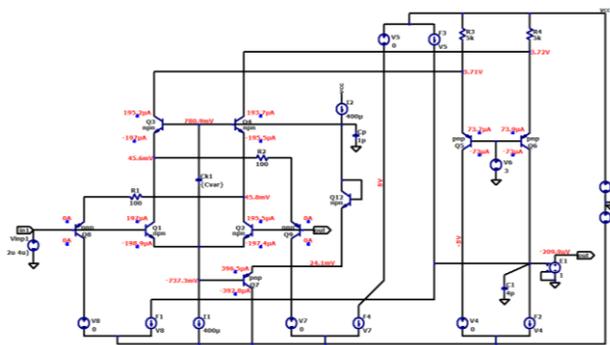


Рис. 7. Статический режим схемы ОУ рис. 6 в среде LTSpice

На рис. 8 показаны результаты моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) схемы ОУ (рис. 6).

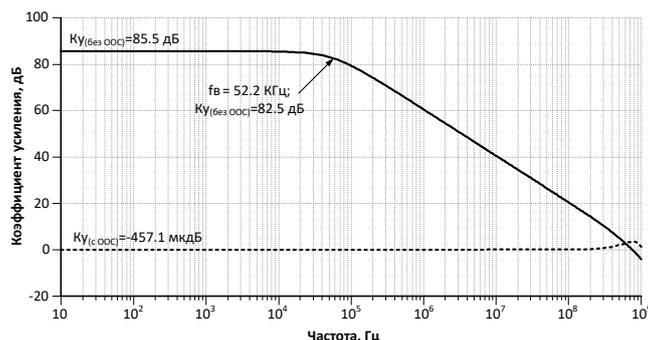


Рис. 8. ЛАЧХ коэффициента усиления схемы ОУ на рис. 7

Передний и задний фронты переходного процесса в ОУ на рис. 7 показаны на рис. 9 и 10 соответственно.

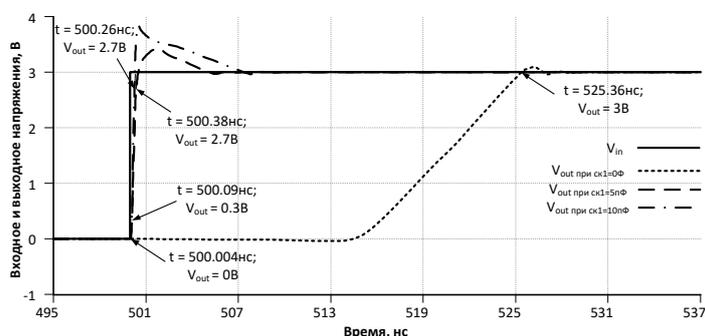


Рис. 9. Передний фронт переходного процесса ОУ на рис. 7 при разных значениях емкости дифференцирующего конденсатора Cк1 = 0 ÷ 10 пФ

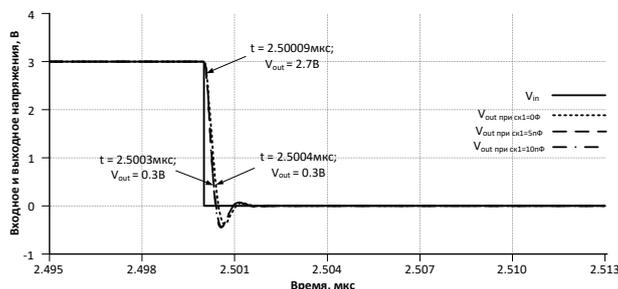


Рис. 10. Задний фронт переходного процесса рис. 7

Переходным процессам на рис. 9 и 10, полученным при $C_k=10$ пФ, соответствуют следующие предельные значения SR: $SR_{\max}^{(+)}=14176.0$ В/мкс, $SR_{\max}^{(-)}=11428,0$ В/мкс. При этом дифференцирующий конденсатор уменьшает динамическую асимметрию в переходных процессах, обеспечивая равенство $SR_{\max}^{(+)} \approx SR_{\max}^{(-)}$.

Заключение. Рассмотрены схемотехнические приемы повышения максимальной скорости нарастания выходного напряжения в классических операционных усилителях на биполярных транзисторах, содержащих в своей структуре «перегнутые» каскоды. Существенное повышение SR обеспечивается за счет использования во входном каскодном дифференциальном усилителе цепи нелинейной коррекции и дифференцирующей цепи коррекции переходного процесса, а также введения параллельного канала на трех токовых зеркалах для передачи больших импульсных токов входного каскада в интегрирующую емкость коррекции.

Предлагаемые схемотехнические приемы повышения SR могут использоваться не только в ОУ на биполярных транзисторах, но и в схемах, реализуемых по CMOS технологиям, в т.ч на широкозонных полупроводниках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. – 5th ed. – Newnes, 2017. – 484 p.
2. Прокопенко Н.Н., Будяков А.С. Архитектура и схемотехника быстродействующих операционных усилителей: монография. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2006. – 231 с.
3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. High-Speed Operational Amplifier with Differentiating Transient Correction Circuits // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002969.
4. Johnson Jeffrey David. Slew rate enhancement circuit / US Patent 6831515 (B2), 2004. 1-11.
5. Sauer Don R. Rail to rail operational amplifier input stage / US Patent 5414388 (A), 1995. 1-7.
6. Rajesh A. Thakkerv, Mayank Shrivastava, Maryam Shojaei Baghini, Dinesh Kumar Sharma, Ramgopal V. Rao, Mahesh B. Patil. Operational amplifier having improved slew rate / US Patent 8089314 (B2), 2012. 1-11.
7. Steven Obed Smith. Enhanced slew rate in amplifier circuits / US Patent 6456161(B2), 2002. 1-9.
8. Frank Murden, Carl W Moreland. n-bit analog-to-digital converter with n-1 magnitude amplifiers and n comparators / US Patent 5684419 (A), 1997. 1-23.
9. Yasuo Yamada, Kenji Yokoyama. Operational Amplifier / US Patent Appl. 2007069815, Mar. 29, 2007.
10. Рысин В.С., Ткаченко В.А. Операционный усилитель, А. св. СССР 970638, 30.10.1982.
11. Патент № 2282303 Российская Федерация, МПК8 H03F 3/45. Дифференциальный усилитель с нелинейным параллельным каналом: № 2005102144; заявл. 28.01.2005; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23 / Прокопенко Н.Н., Крюков В.В., Сергеев А.И.; заявитель ЮРГУЭС.
12. Прокопенко Н.Н. Дифференциальный усилитель с повышенным быстродействием // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 2. – С. 153-154.
13. Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. Операционные усилители с непосредственной связью каскадов: монография. – Л.: Энергия, 1979. – 148 с.

14. Полонников Д.Е. Операционные усилители. Принципы построения, теория, схемотехника: монография. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 1983. – 216 с.
15. Close J. High speed op amps: Performance, process and topologies // IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Portland, OR, USA, 2012. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.
16. Prokopenko N. N., Bugakova A.V., Titov A.E., Budyakov P.S. Features of Increasing the Fast Response of Differential Operational Amplifiers on the Basis of a "Folded" Cascode // 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), 1978. – P. 1-3. – DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565782.
17. Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V., Butyrlagin N.V. The method of speeding of the operational amplifiers based on the folded cascode // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia, 2016. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807722.
18. Прокопенко Н.Н., Чумаков В.Е., Клейменкин Д.В., Сергеенко М.А. Каскодный входной каскад быстродействующего операционного усилителя с нелинейной коррекцией переходного процесса: заявка на патент РФ № 2023104265; заявл. 27.02.23.
19. Patent US 4151483, 1979-04-24, Radiation-hardened transistor amplifiers / Thomas J Robe. fig. 3.
20. Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бугакова А.В. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография, серия «Библиотека студента». – М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 200 с.

REFERENCES

1. Carter B., Mancini R. Op Amps for Everyone. 5th ed. Newnes, 2017, 484 p.
2. Prokopenko N.N., Budyakov A.S. Arkhitektura i skhemotekhnika bystrodeystvuyushchikh operatsionnykh usiliteley: monografiya [Architecture and circuitry of high-speed operational amplifiers: monograph]. Shakhty: Izd-vo YuRGUES, 2006, 231 p.
3. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. High-Speed Operational Amplifier with Differentiating Transient Correction Circuits, 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Tomsk, Russian Federation, 2022, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002969.
4. Johnson Jeffrey David. Slew rate enhancement circuit, US Patent 6831515 (B2), 2004. 1-11.
5. Sauer Don R. Rail to rail operational amplifier input stage, US Patent 5414388 (A), 1995. 1-7.
6. Rajesh A. Thakkerv, Mayank Shrivastava, Maryam Shojaei Baghini, Dinesh Kumar Sharma, Ramgopal V. Rao, Mahesh B. Patil. Operational amplifier having improved slew rate, US Patent 8089314 (B2), 2012. 1-11.
7. Steven Obed Smith. Enhanced slew rate in amplifier circuits, US Patent 6456161(B2), 2002. 1-9.
8. Frank Murden, Carl W Moreland. n-bit analog-to-digital converter with n-1 magnitude amplifiers and n comparators, US Patent 5684419 (A), 1997. 1-23.
9. Yasuo Yamada, Kenji Yokoyama. Operational Amplifier, US Patent Appl. 2007069815, Mar. 29, 2007.
10. Rysin V.S., Tkachenko V.A. Operatsionnyy usilitel', A. sv. SSSR 970638, 30.10.1982 [Operational amplifier, A. St. USSR 970638, 30.10.1982].
11. Prokopenko N.N., Kryukov V.V., Sergeenko A.I. Patent № 2282303 Rossiyskaya Federatsiya, MPK8 H03F 3/45. Differentsial'nyy usilitel' s nelineynym parallel'nyym kanalom: № 2005102144 [Patent No. 2282303 Russian Federation, MPK8 H03F 3/45. Differential amplifier with non-linear parallel channel: No. 2005102144]; dec. 01/28/2005; publ. 20.08.2006, Bull. No. 23; applicant SRSUEAs.
12. Prokopenko N.N. Differentsial'nyy usilitel' s povyshennym bystrodeystviem [Differential amplifier with increased speed], Pribory i tekhnika eksperimenta [Instruments and experimental technique], 1978, No. 2, pp. 153-154.
13. Anisimov V.I., Kapitonov M.V., Prokopenko N.N., Sokolov Yu.M. Operatsionnye usiliteli s neposredstvennoy svyaz'yu kaskadov: monografiya [Operational amplifiers with direct connection of cascades: monograph]. Leningrad: Energiya, 1979, 148 p.
14. Polonnikov D.E. Operatsionnye usiliteli. Printsipy postroeniya, teoriya, skhemotekhnika: monografiya [Operational amplifiers. Construction principles, theory, circuitry: monograph]. Moscow: Izd-vo «Energoatomizdat», 1983, 216 p.
15. Close J. High speed op amps: Performance, process and topologies, IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM), Portland, OR, USA, 2012, pp. 1-8. DOI: 10.1109/BCTM.2012.6352648.

16. Prokopenko N. N., Bugakova A.V., Titov A.E., Budyakov P.S. Features of Increasing the Fast Response of Differential Operational Amplifiers on the Basis of a "Folded" Cascode, *14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 1978, pp. 1-3. DOI: 10.1109/ICSICT.2018.8565782.
17. Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Bugakova A.V., Butyrlagin N.V. The method of speeding of the operational amplifiers based on the folded cascade, *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, Armenia, 2016*, pp. 1-4. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807722.
18. Prokopenko N.N., Chumakov V.E., Kleymenkin D.V., Sergeenko M.A. Kaskodnyy vkhodnoy kaskad bystrodeystviyushchego operatsionnogo usilitelya s nelineynoy korrektsiey perekhodnogo protsessa: zayavka na patent RF № 2023104265; zayavl. 27.02.23 [Cascode input stage of a high-speed operational amplifier with non-linear transient correction: RF patent application No. 2023104265; dec. 27.02.23].
19. Thomas J Robe. Patent US 4151483, 1979-04-24, Radiation-hardened transistor amplifiers, fig. 3.
20. Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Bugakova A.V. Proektirovanie nizkoterperaturnykh i radiatsionno-stoykikh analogovykh mikroskhem dlya obrabotki signalov datchikov: monografiya, seriya «Biblioteka studenta» [Design of low-temperature and radiation-resistant analog microcircuits for processing sensor signals: monograph, series "Student's Library"]. Moscow: SOLON-Press, 2021, 200 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

Прокопенко Николай Николаевич – Донской государственный технический университет; e-mail: prokopenko@sssu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79281201984; д.т.н.; профессор; зав. кафедрой информационных систем и радиотехники.

Клейменкин Дмитрий Владимирович – e-mail: k-dima-01@mail.ru; тел.: +79281970049; магистрант.

Сергеенко Марсель Алексеевич – e-mail: mars1327el@gmail.com; тел.: +79185704519; студент.

Prokopenko Nikolay Nikolayevich – Don State Technical University; e-mail: prokopenko@sssu.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79281201984; dr. of eng. sc.; professor; head of the department of information systems and radio engineering.

Kleimenkin Dmitriy Vladimirovich – e-mail: k-dima-01@mail.ru; phone: +79281970049; master's student.

Sergeenko Marsel Alexeyevich – e-mail: mars1327el@gmail.com; phone: +79185704519; student.

УДК 621.38

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-156-165

В.В. Бахчевников, В.А. Деркачев, А.Н. Бакуменко

РЕАЛИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАННОГО ФИЛЬТРА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПЛИС

Применение фильтров, согласованных с радиосигналами, достаточно распространено в радиолокации, что способствует улучшению разрешающей способности по дальности, а также в системах связи и многих других радиотехнических системах, позволяя увеличить выходного отношение сигнал-шум (ОСШ) по сравнению с входным. Проектирование цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) типа FPGA (Field Programmable Gate Array) позволяет достаточно гибко их конфигурировать и создавать прототипы радиотехнических систем для дальнейшей реализации алгоритмов ЦОС на интегральных схемах специального назначения (Application-Specific Integrated Circuit, ASIC), GPU, CPU и т.д. Цифровые устройства на ПЛИС находят широкое применение в мобильных системах низкой мощности, в то время как ASIC показывают наибольшую производительность, имея недостаток в виде высокой стоимости разработки. В работе особое внимание уделено проектированию и реализации фильтра, согласованного с комплексным ЛЧМ-сигналом, в частотной области на ПЛИС с помощью библиотеки для Matlab / Simulink Xilinx