

# Низкочувствительный активный RC-фильтр второго порядка с расширенным частотным диапазоном

Д.Ю. Денисенко<sup>1</sup>, Н.Н. Прокопенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, prokopenko@sssu.ru

<sup>2</sup>Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Зеленоград

**Аннотация** — Предлагается новая структура низкочувствительного активного RC-фильтра второго порядка (ARCф) с расширенным частотным диапазоном. Схема ARCф реализуется на трех операционных усилителях (ОУ) и рекомендуется для использования в качестве универсального звена при построении полосовых фильтров, а также антиэйлайзинговых фильтров нижних и верхних частот для работы в структурах с аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Показано, что благодаря введению новой связи в передаточной функции рассматриваемого ARCф появляются дополнительные разностные коэффициенты, зависящие от площадей усиления ОУ, что позволяет снизить влияние частотных свойств ОУ на реализуемые характеристики при малом энергопотреблении.

**Ключевые слова** — универсальный активный RC-фильтр, антиэйлайзинговый фильтр, полосовой фильтр, операционный усилитель, площадь усиления.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аналоговую фильтрацию значительно потеснила цифровая обработка сигналов (ЦОС). Однако, при жестких ограничениях на энергопотребление [1] многие задачи построения интерфейсов датчиков только на основе ЦОС не решаются [2,3]. Кроме этого, входные аналоговые антиэйлайзинговые фильтры (ограничители спектра), как правило, являются неотъемлемой частью различных АЦП [4,5] и влияют на их погрешности.

Известно значительное количество архитектур фильтров второго порядка, обеспечивающих выделение заданного спектра входных сигналов в задачах приборостроения, связи и автоматики [6-16], в том числе реализующих разные принципы работы [11, 15, 2, 17, 3].

В настоящее время теория аналоговых ARC фильтров, в т.ч. для задач АЦП преобразования, развивается в направлении использования новых активных элементов (АЭ) [18-20] (мультимодальных операционных усилителей [21-26], разных модификаций токовых конвейеров [27-29, 16] и усилителей с токовой обратной связью [30-33]). Ведутся активные исследования в области перестраиваемых фильтров [1, 4, 3], а также в направлении поиска архитектур, обеспечивающих

минимизацию влияния площади усиления АЭ на основные параметры ARCф [34].

Однако не все новые АЭ, которых сегодня насчитывается более 150 типов [2, 18-20, 3], доступны в виде корпусированных микросхем или кристаллов. В тоже время классические ОУ, выпускаемые большими тиражами ведущими микроэлектронными фирмами, являются наиболее распространенными и дешевыми АЭ, широко применяемыми в прецизионных ARCф [35, 36, 5, 37-42]. Так, на международном рынке микроэлектронных изделий представлено более 2 000 наименований операционных усилителей. В этой связи поиск новых архитектур ARCф на ОУ [11, 15] по-прежнему представляет интерес. Во многих случаях такие ARCф могут быть успешно реализованы в базе новых активных элементов [18, 19, 3].

В космическом приборостроении достаточно актуальной является задача проектирования ARCф для работы в условиях низких температур [43], когда требуется обеспечить малое энергопотребление. Для этого нужны специальные архитектурные решения [43].

Цель настоящей статьи состоит в исследовании свойств новой схемы универсального звена второго порядка, в котором уменьшается влияние площади усиления (GB) применяемых ОУ на амплитудно-частотные характеристики ARCф. Это позволяет расширить диапазон рабочих частот фильтра или, при прочих равных условиях, снизить потребляемую мощность путём применения микромощных ОУ.

## II. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ARC-ФИЛЬТР ВТОРОГО ПОРЯДКА

Для уменьшения влияния GB операционных усилителей на амплитудно-частотные характеристики фильтра второго порядка перспективно использовать схему рис. 1 [44], которая содержит три операционных усилителя (A1, A2, A3) и частотоподающие пассивные элементы – резисторы R1-R8 и конденсаторы C1, C2.

Свойства схемы рис. 1, на основе которой реализуются полосовые фильтры (ПФ), фильтры низких (ФНЧ) и высоких (ФВЧ) частот, определяются коэффициентами его передаточной функции  $F(p)$ , которая может быть представлена следующей формулой

$$F(p) = \frac{pb_1}{p^2 + pa_1 + a_0} = M \frac{pd_p \omega_p}{p^2 + pd_p \omega_p + \omega_p^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  – частота полюса,  $M$  – коэффициент передачи фильтра на частоте полюса,  $d_p$  – затухание полюса,  $a_0$ ,  $a_1$  и  $b_1$  – коэффициенты передаточной функции  $F(p)$ ,  $p$  – комплексная переменная Лапласа,  $Q_p = 1/d_p$  – добротность полюса.

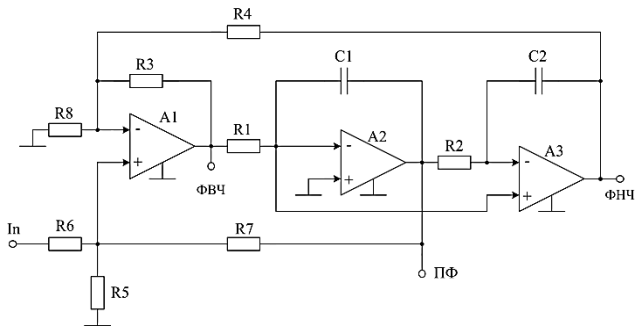


Рис. 1. Модифицированная схема универсального KHN-фильтра второго порядка [44]

К числу важнейших параметров полосовых фильтров относятся добротность и коэффициент передачи на частоте квазирезонанса [6].

Для нахождения параметров передаточной функции предлагаемой схемы рис. 1 [44] воспользуемся методом сигнальных графов [45]. Для этого обозначим в схеме рис. 2а узлы и составим её сигнальный граф (рис. 2б).

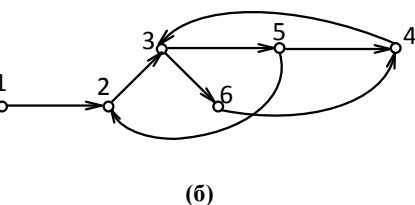
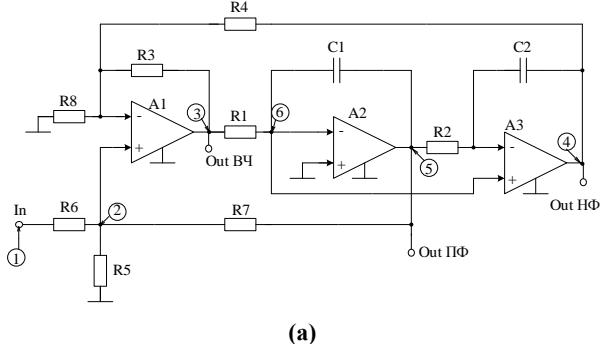


Рис. 2. Универсальный ARCф (а) и его сигнальный граф (б)

Найдем передаточную функцию схемы рис. 2а со входа 1 на выход 5, что соответствует полосовому фильтру. При этом можно показать, что передачи ветвей графа рис. 2б определяются следующими формулами:

$$\gamma_{12} = \beta_0 = \frac{R_5 // R_7}{R_6 + R_5 // R_7}; \quad \gamma_{52} = \beta_1 = \frac{R_6 // R_5}{R_7 + R_5 // R_6};$$

$$\gamma_{23}(p) = \frac{1 + k_1 + k_2}{\frac{p}{GB_1}(1 + k_1 + k_2) + 1}$$

$$\gamma_{35}(p) = \frac{-\frac{1}{p\tau_1}}{\frac{p}{GB_2}(1 + \frac{1}{p\tau_1}) + 1}$$

$$\gamma_{36}(p) = \frac{\frac{p}{GB_2}}{\frac{p}{GB_2}(1 + \frac{1}{p\tau_1}) + 1}$$

$$\gamma_{54}(p) = \frac{-\frac{1}{p\tau_2}}{\frac{p}{GB_3}(1 + \frac{1}{p\tau_2}) + 1}$$

$$\gamma_{64}(p) = \frac{1 + p\tau_2}{\frac{p}{GB_3}(p\tau_2 + 1) + p\tau_2}$$

$$\gamma_{43}(p) = \frac{-k_2}{\frac{p}{GB_1}(1 + k_1 + k_2) + 1}$$

где  $k_1 = \frac{R_3}{R_8}$ ;  $k_2 = \frac{R_3}{R_4}$ ;  $\tau_1 = R_1 C_1$ ;  $\tau_2 = R_2 C_2$ .

В результате передачу с входа полосового фильтра на его выход OutПФ можно найти по формуле Мейсона

$$F_{15}(s) = \frac{\gamma_{12}\gamma_{23}\gamma_{35}}{1 - \gamma_{23}\gamma_{35}\gamma_{52} - \gamma_{35}\gamma_{54}\gamma_{43} - \gamma_{43}\gamma_{36}\gamma_{64}}$$

Подставляя в последнюю формулу передачи ветвей графа и сравнивая полученное выражение с формулой (1) находим идеализированные параметры рассматриваемой схемы рис. 2а:

- коэффициент передачи на частоте полюса

$$M = \frac{R_7}{R_6}, \quad (2)$$

- частота полюса

$$\omega_p = \sqrt{\frac{k_2}{\tau_1 \tau_2}}, \quad (3)$$

- затухание полюса

$$d_p = (1 + k_1 + k_2) \frac{\beta_1}{\sqrt{k_2}} \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}. \quad (4)$$

Коэффициент усиления реального ОУ зависит от частоты. Во многих случаях скорректированный ОУ

можно представить передаточной функцией первого порядка

$$F_{OA}(p) = \mu \frac{\omega_{oa}}{p + \omega_{oa}} = \frac{GB}{p + \omega_{oa}}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициента усиления ОУ на постоянном токе (на нулевой частоте),  $\omega_{oa}$  – частота среза ОУ (частота, на которой  $\mu$  уменьшается до уровня  $0,707\mu$ ),  $GB$  – площадь усиления ОУ.

Анализ схемы на рис. 2 с учетом ограниченной полосы пропускания ОУ (5) показал, что коэффициенты знаменателя её передаточной функции (1) определяются следующими выражениями:

$$a_1 = \frac{\frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{\tau_1} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1\tau_2}}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{k_2}{GB_1\tau_1} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}} - \frac{\omega_p^2 \left( \frac{1}{GB_3} + \frac{1}{GB_2} + \frac{1+k_1+k_2}{GB_1} \right) + \frac{k_2}{GB_2\tau_1\tau_2}}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{k_2}{GB_1\tau_1} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}}, \quad (6)$$

$$a_0 = \frac{\frac{k_2}{\tau_1\tau_2}}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{k_2}{GB_1\tau_1} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}}. \quad (7)$$

где  $GB_1, GB_2, GB_3$  – площади усиления ОУ А1, А2 и А3 соответственно.

Выполним далее аналогичный анализ широко применяемой схемы рис. 3а, которая известна как универсальный КНН-фильтр [10,25].

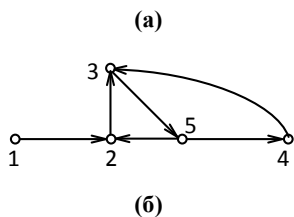
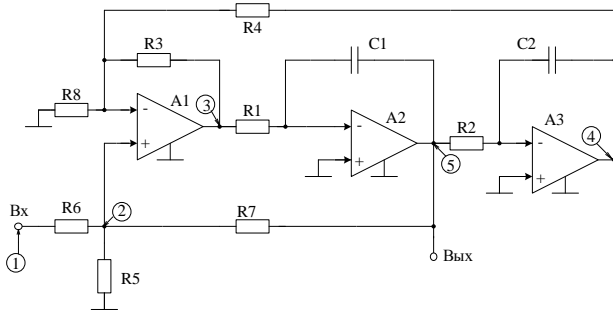


Рис. 3. Схема классического КНН-фильтра (а) и её граф (б)

Для схемы рис. 3а коэффициенты передаточной функции, аналогичные формулам (6) – (7), определяются уравнениями:

$$a_1 = \frac{\frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{\tau_1} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1\tau_2}}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}} - \frac{\omega_p^2 \left( \frac{1}{GB_3} + \frac{1}{GB_2} + \frac{1+k_1+k_2}{GB_1} \right)}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}}, \quad (8)$$

$$a_0 = \frac{\frac{k_2}{\tau_1\tau_2}}{1 + \frac{1}{GB_2\tau_1} + \frac{1}{GB_2\tau_2} + \frac{\beta_1(1+k_1+k_2)}{GB_3\tau_1}}. \quad (9)$$

Следует также заметить, что из формул (6) – (9) при  $GB \rightarrow \infty$ , находятся идеализированные параметры схем фильтров (2) – (4). Эти же формулы справедливы и для схем фильтров, работающих на низких частотах, где влияние площадей усиления ОУ пренебрежимо мало.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 4 показаны результаты моделирования новой схемы фильтра рис. 1 для выхода ПФ и известного универсального КНН-фильтра рис. 3а при разных частотах квазирезонанса в диапазоне от 10 до 100 кГц.

Из анализа графиков рис. 4 следует, что при однотипных ОУ в сравниваемых схемах частотный диапазон новой схемы расширяется примерно в полтора раза. При этом относительный выигрыш по частотному диапазону будет тем выше, чем меньше  $GB$  применяемых ОУ.

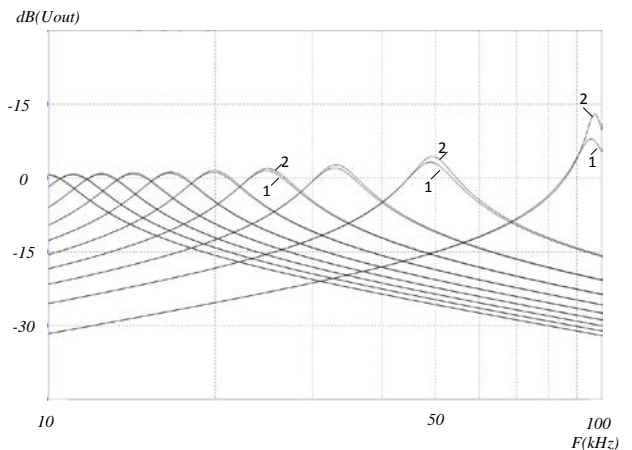


Рис. 4. АЧХ новой схемы (1) и схемы КНН-фильтра (2)

Аналогичные результаты могут быть получены для ФНЧ- и ФВЧ-выходов фильтра. Однако, при выводе основных уравнений для данных вариантов ARCF

следует учесть влияние  $GB1$ ,  $GB2$ ,  $GB3$  на коэффициент  $b_1$  в формуле (1).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая схема универсального фильтра второго порядка уменьшает влияние площади усиления  $GB$  операционных усилителей на амплитудно-частотные характеристики. В зависимости от реализуемой добротности и частотных свойств ОУ частотный диапазон рассмотренного полосового фильтра оказывается примерно в 1,5 раза больше, чем в широко используемом классическом КХН-фильтре. Причем этот эффект достигается без каких-либо дополнительных элементов – за счет введения единственной новой связи между элементами известной КХН-фильтра (соединения неинвертирующего входа ОУ А2 с неинвертирующим входом ОУ А3).

В исследованной схеме фильтра могут использоваться микроомные операционные усилители, что позволяет рекомендовать её для применения в низкотемпературных аналого-цифровых интерфейсах автоматики и систем связи. Перспективно также применение предлагаемого схемотехнического решения при реализации ARC-фильтров на новых классах активных элементов, в том числе на мультидифференциальных операционных усилителях.

#### ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 16-19-00122.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Spiridon S., Op't Eynde F. Low power CMOS fully differential programmable low pass filter // Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Optimization Of Electrical And Electronic Equipment. 2006. P. 21–25.
- [2] Kuntman H. H., Uygur A. New possibilities and trends in circuit design for analog signal processing // 2012 International Conference on Applied Electronics, Pilsen, 2012. P. 1–9.
- [3] Sánchez-Sinencio E. Analog filter design: Current design techniques and trends // 2017 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), Austin, TX, 2017. P. 1–76. DOI: 10.1109/CICC.2017.7993716
- [4] Boiano C., Guazzoni P., Zetta L., Guazzoni C., Pagano A.A. 16-channel programmable antialiasing amplifier // 2010 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), Knoxville, TN, 2010. P. 1389–1391. DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5873999
- [5] Денисенко Д.Ю., Иванов Ю.И., Прокопенко Н.Н. Выбор параметров аналоговых ограничителей спектра для цифровых систем обработки сигналов с учетом допусков и температурной нестабильности пассивных компонентов // Радиотехника. 2017. № 1. С. 148–153.
- [6] Huelsman L.P. and Allen P.E., Introduction to the Theory and Design of Active Filters. McGraw-Hill: New York, 1980. 429 p.
- [7] Букашкин С.А., Власов В.П., Змий Б.Ф., Калякин А.И., Крутччинский С.Г., Куфлевский Е.И., Ланнэ А.А., Масленников В.В., Меньшиков А.М., Михалев П.Г., Петраков В.А., Сироткин А.П., Славский Г.Н., Стыцько В.П. Справочник по расчету и проектированию ARC-схем. М.: Радио и связь, 1984. 368 с.
- [8] Moschytz G.S., Horn P. Active filter design handbook. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1981. 316 p.
- [9] Капустян В.И. Активные RC-фильтры высокого порядка. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
- [10] Lam H.Y.-F. Analog and Digital Filters: Design and Realization, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1979. 592 p.
- [11] Ananda Mohan P.V. VLSI analog filters: active RC, OTA-C, and SC. New York: Birkhäuser: Springer Science+Business Media, 2013. 620 p. DOI: 10.1007/978-0-8176-8358-0
- [12] Schubert T. F., Kim E.M. Fundamentals of Electronics, Book 3. Active Filters and Amplifier Frequency Response. Morgan & Claypool Publishers, 2016. 292 p. DOI: 10.2200/S00712ED1V03Y201603DCS049
- [13] Dimopoulos H.G. Analog Electronic Filters: Theory, Design and Synthesis. Springer, Netherlands, 2012. 498 pp. DOI: 10.1007/978-94-007-2190-6
- [14] Иванов Ю.И. Универсальный активный RC-фильтр. Пат. № 2149499, опубли. 20.05.2000, Бюл. № 14.
- [15] Fortunato M. A new filter topology for analog high-pass filters // TI Analog Applications Journal. 2008. P. 18–24.
- [16] Коротков А.С., Тутьшкин А.А. Токовые конвейеры: развитие, схемотехника, применение // Зарубежная радиоэлектроника. 2002. № 11. С. 64–78.
- [17] Коротков А.С. Интегральные аналоговые фильтры // Известия ТРТУ. Избирательные системы с обратной связью. Вып. № 2. Таганрог, 1995. С. 47–50.
- [18] Bielek D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active elements for analog signal processing: classification, review, and new proposals // Radioengineering, 2008. V. 17, № 4, P. 15–32.
- [19] Senani R., Bhaskar D.R., Singh V.K., Sharma R.K. Sinusoidal Oscillators and Waveform Generators using Modern Electronic Circuit Building Blocks // Springer International Publishing, Switzerland, January 2016. 622 p. DOI: 10.1007/978-3-319-23712-1
- [20] Kumngern M. DDTA and DDCCTA: New active elements for analog signal processing // 2012 IEEE International Conference on Electronics Design, Systems and Applications (ICEDSA), Kuala Lumpur, 2012. P. 141–145. DOI: 10.1109/ICEDSA.2012.6507784
- [21] Stornelli V., Pantoli L., Leuzzi G., Ferri G. Fully differential DDA-based fifth and seventh order Bessel low pass filters and buffers for DCR radio systems // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2013. V. 75. № 2. P. 305–310. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10470-013-0051-9>
- [22] Soltan A., Soliman A. M. A CMOS differential difference operational mirrored amplifier // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2009. V. 63. № 9. P. 793–800. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2008.06.004>
- [23] Sackinger E., Guggenbuhl W. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier // IEEE Journal of Solid-State Circuits, Apr 1987. V. 22. № 2. P. 287–294. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715
- [24] Sackinger E., Guggenbuhl W. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier // IEEE Journal of Solid-State Circuits, Apr 1987. V. 22. № 2. P. 287–294. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715
- [25] Yamacli S., Ozcan S., Kuntman H. Resistorless KHN biquad using an DDA (difference difference amplifier) and two CCCIs (controlled current conveyor) // Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design. V. 1. P. I/181–I/184 DOI: 10.1109/ECCTD.2005.1522940

- [26] Yesil A., Kacar F., Minaei S. New differential difference stage and Its application to band-pass filter at 10.7 MHz with high quality factor // *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, September 2017. V. 79. P. 74–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2017.05.022>
- [27] Senani R., Bhaskar D.R., Singh A.K. *Current Conveyors: Variants, Applications and Hardware Implementations* // Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 560 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08684-2
- [28] Ghallab Y. H., Badawy W., Kaler K. V. I. S., Abou El-Ela M., El-Said M. H. A new second-order active universal filter with single input and three outputs using operational floating current conveyor // *The 14th International Conference on Microelectronics*, 2002. P. 42–45. DOI: 10.1109/ICM-02.2002.1161492
- [29] Ghallab Y. H., Abou El-Ela M., Elsaid M. A novel universal voltage-mode filter with three inputs and single output using only two operational floating current conveyor // *IEEE 12th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Tehran, 2000. P. 95–98. DOI: 10.1109/ICM.2000.916422
- [30] Horng J.-W. New configuration for realizing universal voltage-mode filter using two current feedback amplifiers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Oct 2000. V. 49. № 5. P. 1043–1045. DOI: 10.1109/19.872927
- [31] Liu S.I. Universal filter using two current-feedback amplifiers // *J. Electronics Letters*, 13 Apr 1995. V. 31. № 8. P. 629–630. DOI: 10.1049/el:19950425
- [32] Liu S.-I., Wu D.-Sh. New current-feedback amplifier-based universal biquadratic filter // *IEEE J. Transactions on Instrumentation and Measurement*, Aug 1995. V. 44. № 4. P. 915–917. DOI: 10.1109/19.392891
- [33] Liu S.-I. High input impedance filters with low component spread using current-feedback amplifiers // *J. Electronics Letters*, 22 Jun 1995. V. 31. № 13. P. 1042–1043. DOI: 10.1049/el:19950725
- [34] Denisenko D.Yu., Ivanov Yu.Iv., Prokopenko N.N. Topological Features of the Active RC-Filter Schemes with the Extended Frequency Operating Range // *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Proceedings. National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, March 14–16, 2018*. P. 1–6.
- [35] Denisenko D.Yu., Гришко И.К., Иванов Ю.И. Система автоматической настройки аналоговых активных RC-фильтров // *Информационные технологии, системный анализ и управление. ИТСАУ-2016; Сб. трудов XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, 16-19 ноября 2016 г. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. Т. 1. С. 120–122.*
- [36] Макарова Ю., Бугров В. Поиское проектирование активных антиалиасинговых фильтров // *Современная электроника*, 2017. № 1. С. 76–80.
- [37] Куфлевский Е.И., Гура В.Д., Иванов Ю.И., Лысенко Г.В., Макаренко Б.Ф. Опыт разработки прецизионных активных фильтров в гибридно-пленочном исполнении // *Тезисы доклада на X московской НТК, поев. Дню радио. М.: Радио и связь, 1984. С. 81.*
- [38] Куфлевский Е.И., Иванов Ю.И. Схемотехника и реализация микрорелектронного фильтра нижних частот // *Полупроводниковая электроника в технике связи: сб. статей / Под ред. И.Ф. Николаевского. М.: Радио и связь, 1990. Вып. 28. С. 63–67.*
- [39] Иванов Ю.И. Синтез экономичных звеньев АРС-фильтров с учетом ограничений гибридно-пленочной технологии // *Труды 6 Всероссийской НТК с международным участием “Актуальные проблемы твердотельной электроники и микрорелектроники”, Дивноморск, 1999. С. 68.*
- [40] Денисенко Д.Ю., Денисенко М.Е., Иванов Ю.И., Финаев В.И. Аналоговые и дискретно-аналоговые перестраиваемые интеграторы // *ИВД. 2015. №4-1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3388> (дата обращения: 01.04.2018).*
- [41] Иванов Ю.И., Накоряков А.В. Частотные свойства низкочувствительных активных RC-фильтров второго порядка // *Проблемы современной аналоговой микросхемотехники: сб. материалов VI Международного научно-практического семинара. В 3-х ч. Ч. 1. Функциональные узлы аналоговых интегральных схем и сложных функциональных блоков / под ред. Н.Н. Прокопенко. Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. С. 149–155.*
- [42] Sallen R.P. and Key E.L. A Practical Method of Designing RC Active Filters // *IRE Trans. Circuit Theory*. V. CT-2. March 1955. P. 78–85. DOI: 10.1109/TCT.1955.6500159
- [43] Ma D., Geng X., Dai F. F., Cressler J. D. A 6th order Butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from  $-180^{\circ}\text{C}$  to  $120^{\circ}\text{C}$  // *2009 IEEE Aerospace conference, Big Sky, MT, 2009. P. 1–8. DOI: 10.1109/AERO.2009.4839524*
- [44] Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н. Активный RC-фильтр Заявка на патент РФ № 2018108897, заяв.: 14.03.18.
- [45] Сигорский В.П., Петренко А.И. *Основы теории электронных схем. Киев.:Вища школа, 1971. 568 с.*

## Low-Sensitivity Active RC-filter of the Second Order with an Extended Frequency Range

D.Yu. Denisenko<sup>1</sup>, N.N. Prokopenko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru)

<sup>2</sup>Institute for design problems in microelectronics RAS, Zelenograd

**Abstract - At present, the theory of RC-filters most actively develops in the direction of tunable filters and filters on switched capacitors. In this frame, the new types of active elements, including multi-differential operational amplifiers**

**and various modifications of current conveyors, are also considered. The search for architectures that minimize the effect of the areas of amplification of active components on the main parameters of the active RC-filter continues.**

However, not all the new active elements, which number exceeds 150 variants today, are available in the form of serial microcircuits. At the same time, the classic operational amplifiers are produced in large numbers, including in the not compact version for "systems in the case". Operational amplifiers are the most common active elements. So, on the international market of microelectronic products, more than 2 000 names of operational amplifiers are presented. In this connection, the search for new architectures of the active RC-filter on operational amplifiers is still of interest. At the same time, it should be noted that in many cases, the architecture of active RC filters based on operational amplifiers can be successfully implemented on the basis of new active elements. The paper proposes a new structure of a universal low-sensitivity active RC-filter of the second order with an extended frequency range. The active RC-filter circuit is implemented on three operational amplifiers and is recommended for use as a universal link in the construction of bandpass filters, as well as low and high-frequency filters. It is shown that due to the introduction of a single new connection in the circuit of the known KHN-filter in the transfer function of the active

RC-filter under consideration, additional coefficients appear that depend on the amplification areas of the operational amplifiers. In the final analysis, this reduces the influence of the frequency properties of operational amplifiers on their real characteristics. Computer simulation of the proposed active RC-filter showed that for the case of a bandpass filter the frequency range of operation is approximately 1.5 times greater than in the widely used KHN-filter. And this effect is achieved without the introduction of any additional active and passive elements. In this case, the relative gain on the frequency range will be the higher, the smaller the amplification area of the operational amplifiers used. In the investigated filter scheme, micro-power operational amplifiers can be used, which allows recommending its use in low-temperature analog-to-digital interfaces.

**Keywords** — universal active RC-filter, antialiasing filter, bandpass filter, operational amplifier, the effect of gain area, frequency characteristics, frequency range, KHN-filter

#### SUPPORT

The research has been carried out at the expense of the Grant of the Russian Science Foundation (project No. 16-19-00122).

#### REFERENCES

- [1] Spiridon S., Op't Eynde F. Low power CMOS fully differential programmable low pass filter //Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Optimization Of Electrical And Electronic Equipment. 2006. P. 21–25.
- [2] Kuntman H. H., Uygur A. New possibilities and trends in circuit design for analog signal processing // 2012 International Conference on Applied Electronics, Pilsen, 2012. P. 1–9.
- [3] Sánchez-Sinencio E. Analog filter design: Current design techniques and trends //2017 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), Austin, TX, 2017. P. 1–76. DOI: 10.1109/CICC.2017.7993716
- [4] Boiano C., Guazzoni P., Zetta L., Guazzoni C., Pagano A.A. 16-channel programmable antialiasing amplifier // 2010 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record

- (NSS/MIC), Knoxville, TN, 2010. P. 1389–1391. DOI: 10.1109/NSSMIC.2010.5873999
- [5] Denisenko D.Yu., Ivanov Yu.I., Prokopenko N.N. Vybor parametrov analogovykh ogranichiteley spektra dlya tsifrovyykh sistem obrabotki signalov s uchetom dopuskov i temperaturnoy nestabil'nosti passivnykh komponentov (Selection of parameters for analogue spectrum limiters for digital signal processing systems taking into account tolerances and temperature instability of passive components) // Radiotekhnika. 2017. № 1. S.148–153. (in Russian)
- [6] Huelsman L.P. and Allen P.E., Introduction to the Theory and Design of Active Filters. McGraw-Hill: New York, 1980. 429 p.
- [7] Bukashkin S.A., Vlasov V.P., Zmiy B.F., Kalyakin A.I., Krutchinskiy S.G., Kuflevskiy E.I., Lanne A.A., Maslennikov V.V., Men'shikov A.M., Mikhalev P.G., Petrakov V.A., Sirotkin A.P., Slavskiy G.N., Styts'ko V.P. Spravochnik po raschetu i proektirovaniyu ARC-skhem (Guide to the calculation and design of ARC-schemes). M.: Radio i svyaz', 1984. 368 s. (in Russian)
- [8] Moschytz G.S., Horn P. Active filter design handbook. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA, 1981. 316 p.
- [9] Kapustyan V.I. Aktivnye RC-fil'try vysokogo poriyadka (Active RC filters are of high order). M.: Radio i svyaz', 1985. 248 s. (in Russian)
- [10] Lam H.Y.-F. Analog and Digital Filters: Design and Realization, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1979. 592 p.
- [11] Ananda Mohan P.V. VLSI analog filters: active RC, OTA-C, and SC. New York: Birkhäuser: Springer Science+Business Media, 2013. 620 p. DOI: 10.1007/978-0-8176-8358-0
- [12] Schubert T. F., Kim E.M. Fundamentals of Electronics, Book 3. Active Filters and Amplifier Frequency Response. Morgan & Claypool Publishers, 2016. 292 p. DOI: 10.2200/S00712ED1V03Y201603DCS049
- [13] Dimopoulos H.G. Analog Electronic Filters: Theory, Design and Synthesis. Springer, Netherlands, 2012. 498 pp. DOI: 10.1007/978-94-007-2190-6
- [14] Ivanov Yu.I. Universal'nyy aktivnyy RC-fil'tr (Universal active RC filter). Pat. № 2149499, opubl. 20.05.2000, Byul. № 14. (in Russian)
- [15] Fortunato M. A new filter topology for analog high-pass filters //TI Analog Applications Journal. 2008. P. 18–24.
- [16] Korotkov A.S., Tutyshkin A.A. Tokovye konveyery: razvitiye, skhemotekhnika, primeneniye (Current conveyors: development, circuitry, application) // Zarubezhnaya radioelektronika. 2002. № 11. C. 64–78. (in Russian)
- [17] Korotkov A.S. Integral'nye analogovye fil'try (Integral analog filters) // Izvestiya TRTU. Izbiratel'nyesistemy s obratnoy svyaz'yu. Vyp. № 2. Taganrog, 1995. S. 47–50. (in Russian)
- [18] Biolk D., Senani R., Biolkova V., Kolka Z. Active elements for analog signal processing: classification, review, and new proposals // Radioengineering, 2008. V. 17, № 4, P. 15–32.
- [19] Senani R., Bhaskar D.R., Singh V.K., Sharma R.K. Sinusoidal Oscillators and Waveform Generators using Modern Electronic Circuit Building Blocks // Springer International Publishing, Switzerland, January 2016. 622 p. DOI: 10.1007/978-3-319-23712-1
- [20] Kumngern M. DDTA and DDCCTA: New active elements for analog signal processing // 2012 IEEE International Conference on Electronics Design, Systems and Applications (ICEDSA), Kuala Lumpur, 2012. P. 141–145. DOI: 10.1109/ICEDSA.2012.6507784

- [21] Stornelli V., Pantoli L., Leuzzi G., Ferri G. Fully differential DDA-based fifth and seventh order Bessel low pass filters and buffers for DCR radio systems // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 2013. V. 75. № 2. P. 305–310. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10470-013-0051-9>
- [22] Soltan A., Soliman A. M. A CMOS differential difference operational mirrored amplifier // *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2009. V. 63. № 9. P. 793–800.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2008.06.004>
- [23] Sackinger E., Guggenbuhl W. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Apr 1987. V. 22. № 2. P. 287–294. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715
- [24] Sackinger E., Guggenbuhl W. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier // *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Apr 1987. V. 22. № 2. P. 287–294. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715
- [25] Yamacli S., Ozcan S., Kuntman H. Resistorless KHN biquad using an DDA (difference difference amplifier) and two CCCII (controlled current conveyor) // *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design*. V. 1. P. I/181–I/184 DOI: 10.1109/ECCTD.2005.1522940
- [26] Yesil A., Kacar F., Minaei S. New differential difference stage and its application to band-pass filter at 10.7 MHz with high quality factor // *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, September 2017. V. 79. P. 74–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2017.05.022>
- [27] Senani R., Bhaskar D.R., Singh A.K. *Current Conveyors: Variants, Applications and Hardware Implementations* // Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 560 p. DOI: 10.1007/978-3-319-08684-2
- [28] Ghallab Y. H., Badawy W., Kaler K. V. I. S., Abou El-Ela M., El-Said M. H. A new second-order active universal filter with single input and three outputs using operational floating current conveyor // *The 14th International Conference on Microelectronics*, 2002. P. 42–45. DOI: 10.1109/ICM-02.2002.1161492
- [29] Ghallab Y. H., Abou El-Ela M., Elsaid M. A novel universal voltage-mode filter with three inputs and single output using only two operational floating current conveyor // *IEEE 12th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Tehran, 2000. P. 95–98. DOI: 10.1109/ICM.2000.916422
- [30] Horng J.-W. New configuration for realizing universal voltage-mode filter using two current feedback amplifiers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Oct 2000. V. 49. № 5. P. 1043–1045. DOI: 10.1109/19.872927
- [31] Liu S.-I. Universal filter using two current-feedback amplifiers // *J. Electronics Letters*, 13 Apr 1995. V. 31. № 8. P. 629–630. DOI: 10.1049/el:19950425
- [32] Liu S.-I., Wu D.-Sh. New current-feedback amplifier-based universal biquadratic filter // *IEEE J. Transactions on Instrumentation and Measurement*, Aug 1995. V. 44. № 4. P. 915–917. DOI: 10.1109/19.392891
- [33] Liu S.-I. High input impedance filters with low component spread using current-feedback amplifiers // *J. Electronics Letters*, 22 Jun 1995. V. 31. № 13. P. 1042–1043. DOI: 10.1049/el:19950725
- [34] Denisenko D.Yu., Ivanov Yu.Iv., Prokopenko N.N. Topological Features of the Active RC-Filter Schemes with the Extended Frequency Operating Range // *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Proceedings. National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia, March 14–16, 2018. P. 1–6.
- [35] Denisenko D.Yu., Grishko I.K., Ivanov Yu.I. Sistema avtomaticheskoy nastroyki analogovykh aktivnykh RC-fil'trov (System for automatic adjustment of analog active RC filters) // *Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie*. ITSAU-2016; Sb. trudov KhIV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, 16-19 noyabrya 2016 g. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016. T. 1. S. 120–122. (in Russian)
- [36] Makarova Yu., Bugrov V. Poiskovoe proektirovanie aktivnykh antialiasingovykh fil'trov (Search design of active antialiasing filters) // *Sovremennaya elektronika*, 2017. № 1. S. 76–80. (in Russian)
- [37] Kuflevskiy E.I., Gura V.D., Ivanov Yu.I., Lysenko G.V., Makarenko B.F. Opyt razrabotki pretsizionnykh aktivnykh fil'trov v gibridno-plenochnom ispolnenii (Experience in the development of precision active filters in hybrid-film design) // *Tezisy doklada na X moskovskoy NTK, poev. Dnyu radio*. M.: Radio i svyaz', 1984. S. 81. (in Russian)
- [38] Kuflevskiy E.I., Ivanov Yu.I. Skhemotekhnika i realizatsiya mikroelektronnoy fil'tra nizhnikh chastot (Circuitry and implementation of low-pass microelectronic filter) // *Poluprovodnikovaya elektronika v tekhnike svyazi: sb. statey / Pod red. I.F. Nikolaevskogo*. M.: Radio i svyaz', 1990. Vyp. 28. S. 63–67. (in Russian)
- [39] Ivanov Yu.I. Sintez ekonomichnykh zven'ev ARC-fil'trov s uchetom ogranicheniy gibridno-plenochnoy tekhnologii (Synthesis of economical links of ARC-filters taking into account the limitations of hybrid-film technology) // *Trudy 6 Vserossiyskoy NTK s mezhdunarodnym uchastiem "Aktual'nye problemy tverdotel'noy elektroniki i mikroelektroniki"*, Divnomorsk, 1999. S. 68. (in Russian)
- [40] Denisenko D.Yu., Denisenko M.E., Ivanov Yu.I., Finaev V.I. Analogovye i diskretno-analogovye perestraivaemye integratory (Analog and discrete analog reconfigurable integrators) // *IVD*. 2015. №4-1. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3388> (access date: 01.04.2018). (in Russian)
- [41] Ivanov Yu.I., Nakoryakov A.V. Chastotnye svoystva nizkochuvstvitel'nykh aktivnykh RC-fil'trov vtorogo poryadka (Frequency characteristics of low-sensitivity active RC filters of the second order) // *Problemy sovremennoy analogovoy mikroskhemotekhniki: sb. materialov VI Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar. V 3-kh ch. Ch. 1. Funktsional'nye uzly analogovykh integral'nykh skhem i slozhnykh funktsional'nykh blokov / pod red. N.N. Prokopenko*. Shakhty: Izd-vo YuRGUES, 2007. S. 149–155. (in Russian)
- [42] Sallen R.P. and Key E.L. A Practical Method of Designing RC Active Filters // *IRE Trans. Circuit Theory*. V. CT-2. March 1955. P. 78–85. DOI: 10.1109/TCT.1955.6500159
- [43] Ma D., Geng X., Dai F. F., Cressler J. D. A 6th order Butterworth SC low pass filter for cryogenic applications from –180°C to 120°C // *2009 IEEE Aerospace conference*, Big Sky, MT, 2009. P. 1–8. DOI: 10.1109/AERO.2009.4839524
- [44] Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. Aktivnyy RC-fil'tr (Active RC Filter). Zayavka na patent RF № 2018108897, zayav.: 14.03.18. (in Russian)
- [45] Sigorskiy V.P., Petrenko A.I. *Osnovy teorii elektronnykh skhem (Fundamentals of the theory of electronic circuits)*. Kiev.: Vishcha shkola, 1971. 568 s. (in Russian)