



УДК 621.372.543.2

Ю. М. Иншаков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

А. В. Белов

ФГБНУ "Институт экспериментальной медицины"  
ул. Академика Павлова, д. 12, Санкт-Петербург, 197376, Россия

## Полосовой активный RC-фильтр с линейно перестраиваемой добротностью

**Аннотация.** Приведена методика разработки и моделирования активного полосно-пропускающего RC-фильтра второго порядка с линейно перестраиваемой добротностью и независимой перестройкой в широких пределах резонансной частоты и коэффициента передачи. Перестраиваемый активный полосно-пропускающий RC-фильтр требуется для селективной обработки электрических сигналов в радиотехнических системах и устройствах, а также в информационно-измерительных комплексах, акустической и гидроакустической аппаратуре, включая приборы для анализа шумов и вибраций, а также в эквалайзерах для выделения полезных сигналов.

Фильтр построен на основе активного корректирующего звена второго порядка с использованием перестраиваемой RC-схемы T-моста. Получены расчетные формулы для параметров фильтра: резонансной частоты, полюсной добротности и коэффициента передачи. Показано, что в схеме фильтра эти параметры могут в широких пределах независимо перестраиваться. Резонансная частота фильтра перестраивается с помощью сдвоенных переменных резисторов при сохранении постоянства добротности и коэффициента передачи. Полюсная добротность регулируется изменением сопротивления переменного резистора при сохранении коэффициента передачи и резонансной частоты. Коэффициент передачи изменяется с помощью другого переменного резистора.

Приведены выводы выражений для перестраиваемых параметров предложенной схемы полосно-пропускающего активного RC-фильтра, подтверждающие произведенные исследования, а также представлены частотные характеристики фильтра и графики перестраиваемых параметров. Реализация фильтра подтверждена моделированием с использованием программных средств MicroCap10.

**Ключевые слова:** полосовой активный RC-фильтр, резонансная частота, полюсная добротность, коэффициент передачи фильтра

**Для цитирования:** Иншаков Ю. М., Белов А. В. Полосовой активный RC-фильтр с линейно перестраиваемой добротностью // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 20–25.

Yu. M. Inshakov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

A. V. Belov

FSBSI "Institute of Experimental Medicine"

12, Academic Pavlov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

### Tunable Active Band-Pass RC-Filter

**Abstract.** This article provides a technique for design and simulation of an active second order band-pass filter with lineal tuning of Q-factor and independent tuning over a wide range of resonant frequency and transfer coefficient. The tun-

able band-pass RC-filter is required for selective processing of electric signals in radio engineering systems and devices, as well as in information measuring systems, the acoustic and hydro acoustic equipment, including devices for noise and vibration analysis. The band-pass RC-filter is required in equalizers for allocation of useful signals.

It is shown that the filter is constructed on the basis of the active second order correcting link with the use of tunable RC-circuit T-bridge. Calculation formulas for filter parameters are received, i.e. resonant frequency, polar Q-factor and transfer coefficient. It is shown that in the filter circuit these parameters can independently be tunable over a wide range. Resonant frequency of the filter is tuned by means of dual variable resistors with the Q-factor and transfer coefficient remaining constant.

Polar Q-factor is regulated by change of resistance of the variable resistor with transfer coefficient and resonant frequency remaining constant. The transfer coefficient changes by means of another variable resistor.

The conclusions of expressions for the tuned parameters of the suggested circuit of the active band-pass RC-filter confirming the research are provided, as well as the filter frequency characteristics and tunable parameter diagrams. Filter implementation is supported by simulation with the use of MicroCap10 software.

**Key words:** active band-pass RC-filter, variation of resonant frequency, polar quality factor, transfer coefficient of filter

**For citation:** Inshakov Yu. M., Belov A. V. Tunable Active Band-Pass RC-Filter. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossi. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 2, pp. 20–25. (In Russian)

**Введение.** В настоящее время актуальным является проектирование перестраиваемых полосовых активных RC-фильтров (ППАФ). Такие фильтры находят широкое применение в различной радиоэлектронной аппаратуре, например, для коррекции частотных характеристик каналов связи с целью повышения их качественных показателей. Исследованию ППАФ уделено внимание во многих публикациях [1]–[13], в которых рассмотрены схемы с использованием операционных усилителей. В этих работах отмечено, что возможность проектирования ППАФ ограничена тем обстоятельством, что их основные параметры (полосная добротность, резонансная частота и коэффициент передачи) зависят от параметров практически всех элементов схем [14]–[17]. Поэтому обычно в процессе проектирования ППАФ рассматривается несколько конкурирующих вариантов схем, из которых выбирается один, наиболее подходящий для практического применения. Например, в [18] описана схема ППАФ с независимой перестройкой резонансной частоты, полюсной добротности и коэффициента передачи. Однако существенным недостатком указанной схемы является изменение полюсной добротности в небольших пределах из-за ее нелинейной зависимости от регулируемого параметра.

**Реализация фильтра.** Настоящая статья посвящена проектированию ППАФ с изменением добротности по линейному закону и независимой перестройкой в широких пределах резонансной частоты и коэффициента передачи. Схема фильтра (рис. 1) содержит: КЗ – корректирующее звено, У2 – дифференциальный усилитель и У3 – повторитель напряжения на операционном усилителе. Узлы схемы обозначены номерами, необходимыми для определения передаточной функции фильтра.

КЗ выделено на рис. 1 штрихпунктирной линией. Оно реализовано на основе операционного уси-

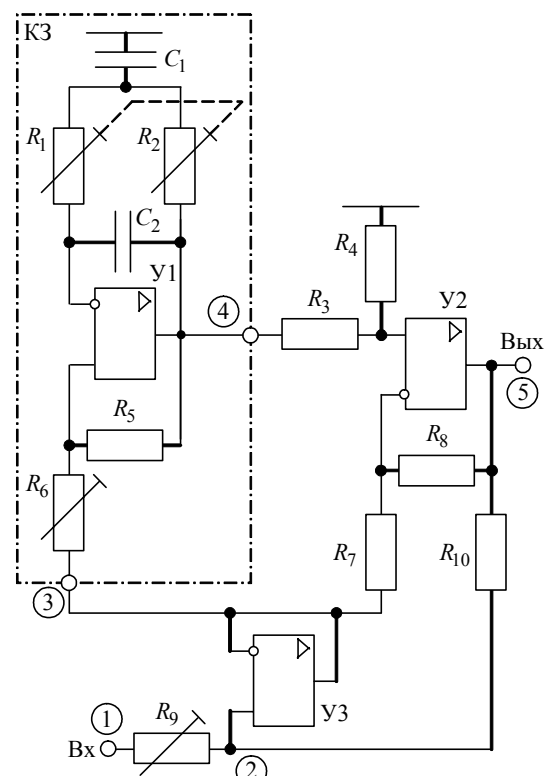


Рис. 1

лителя, в цепь отрицательной обратной связи которого включен T-образный RC-мост из резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ . Сопротивления резисторов и емкости конденсаторов выбраны равными ( $R_1 = R_2 = R_{КЗ}$  и  $C_1 = C_2 = C_{КЗ}$ ). В цепь положительной обратной связи усилителя У1 включен делитель напряжения из резисторов  $R_5$  и  $R_6$ .

Передаточная функция КЗ по напряжению определяется выражением

$$H_{34}(s) = \frac{s^2 + s\omega_0/Q_n + \omega_0^2}{s^2 + s\omega_0/Q_p + \omega_0^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} = 1/(R_{КЗ} C_{КЗ})$  – резонансная круговая частота ( $f_0$  – резонансная циклическая частота);  $Q_n = 1/3$  – добротность комплексных нулей;  $Q_p = 1/(2-\beta)$  – полюсная добротность ( $\beta = R_6/R_5$  – коэффициент полюсной добротности).

Дифференциальный усилитель У2 охвачен отрицательной обратной связью из резисторов  $R_7$  и  $R_8$ . К неинвертирующему входу У2 подключен делитель напряжения из резисторов  $R_3$  и  $R_4$ . При условии, что сопротивления всех резисторов, подключенных к У2, выбраны одинаковыми ( $R_3 = R_4 = R_7 = R_8 = R$ ), коэффициент передачи по его инвертирующему входу равен  $(-1)$ , а по неинвертирующему входу –  $(+1)$ .

На неинвертирующий вход повторителя напряжения У3 подаются сигналы через делитель из резисторов  $R_9$  и  $R_{10}$  со входа и выхода полосового фильтра (см. рис. 1).

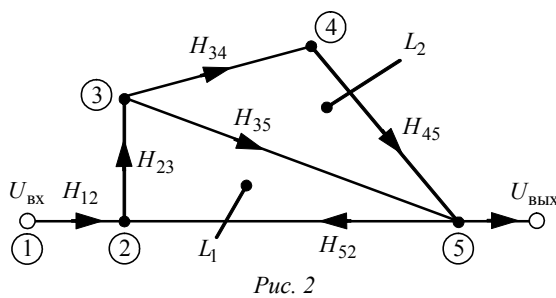
Рассмотрим направленный сигнальный граф схемы полосового фильтра (рис. 2). Коэффициенты передачи ветвей графа в соответствии со схемой (рис. 1) имеют вид

$$H_{12} = R_{10}/(R_{10} + R_9) = 1/(1 + \alpha); \quad (2)$$

$$H_{23} = 1; \quad H_{35} = -1; \quad H_{45} = 1; \quad (3)$$

$$H_{52} = R_9/(R_{10} + R_9) = \alpha/(1 + \alpha), \quad (4)$$

где  $\alpha = R_9/R_{10}$  – коэффициент перестройки полюсной добротности полосового фильтра.



Передаточная функция сигнального графа в соответствии с топологической формулой Мезона имеет вид

$$H(s) = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = \frac{H_{12}H_{23}H_{35} + H_{12}H_{23}H_{34}H_{45}}{1 - L_1 - L_2}, \quad (5)$$

где

$$L_1 = H_{23}H_{35}H_{52}; \quad L_2 = H_{23}H_{34}H_{45}H_{52} \quad (6)$$

– передачи контуров графа.

Подставив (2)–(4) в (5) и учитывая (1) и (6), найдем передаточную функцию полосового фильтра:

$$H(s) = \frac{s\omega_0(1+\beta)/(1+\alpha)}{s^2 + s\omega_0[2+\alpha-(1+2\alpha)\beta]/(1+\alpha) + \omega_0^2} = \frac{s h_m \omega_0 / Q}{s^2 + s\omega_0/Q + \omega_0^2}, \quad (7)$$

где

$$Q = (1 + \alpha)/[2 + \alpha - (1 + 2\alpha)\beta] \quad (8)$$

– полюсная добротность;

$$h_m = (1 + \beta)/[2 + \alpha - (1 + 2\alpha)\beta] \quad (9)$$

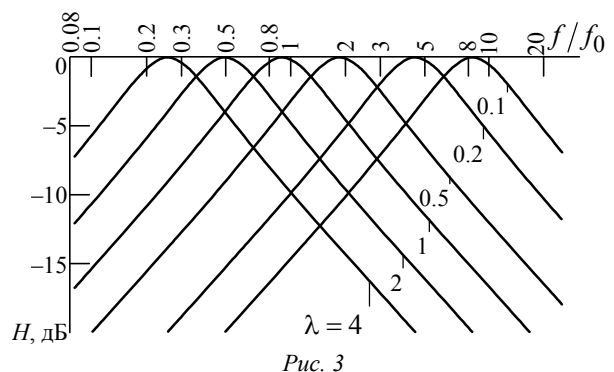
– коэффициент передачи на резонансной частоте.

Из (1), (7)–(9) следует, что параметры  $\omega_0$ ,  $Q$  и коэффициент  $h_m$  могут быть изменены регулировкой сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  и коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ .

**Результаты моделирования.** Рассмотрим необходимые соотношения пассивных компонентов схемы полосового фильтра для обеспечения независимой перестройки резонансной частоты, полюсной добротности и коэффициента передачи на резонансной частоте.

Из (1) следует, что резонансную частоту фильтра  $\omega_0$  можно перестраивать в широких пределах изменением сопротивлений сдвоенных переменных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ .

На рис. 3 показаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) полосового фильтра, перестраиваемого в 40 раз по частоте (от  $f_1 = 0.25 f_0$  до  $f_2 = 10 f_0$ ) при различных значениях коэффициента перестройки по частоте  $\lambda = R_{КЗ}/R$ . При вычислениях АЧХ были выбраны значения коэффициентов  $\alpha = \beta = 0.5$ , что обеспечило во всем диапазоне перестройки резонансной частоты фильтра постоянство полюсной добротности



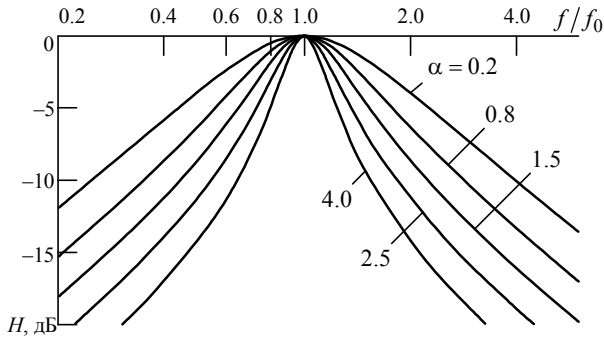


Рис. 4

$Q=1$  и коэффициента передачи на резонансной частоте  $h_m=1$  (0 дБ).

Формула (8) для полюсной добротности при фиксированном значении коэффициента  $\beta=0.5$  имеет вид

$$Q = 2(1 + \alpha)/3. \quad (10)$$

Из (10) следует, что полюсная добротность линейно зависит от коэффициента  $\alpha$  и может независимо регулироваться переменным резистором  $R_9$ . На рис. 4 приведены амплитудно-частотные характеристики полосового фильтра с перестраиваемой полюсной добротностью в пределах от  $Q_{\min}=0.8$  до  $Q_{\max}=3.3$ . При регулировании полюсной добротности было выбрано значение коэффициента  $\beta=0.5$ , что обеспечило постоянство коэффициента передачи  $h_m=1$ .

На рис. 5 представлен график линейной зависимости полюсной добротности от коэффициента  $\alpha$ , рассчитанной по (10).

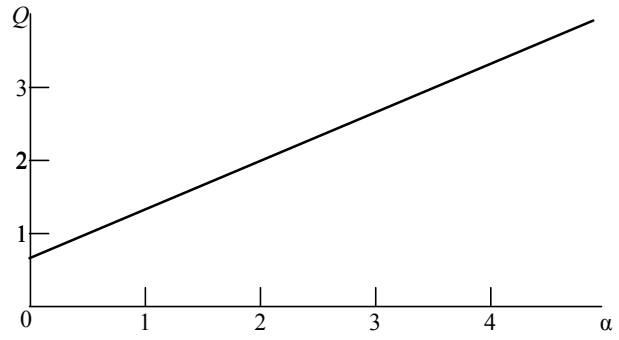


Рис. 5

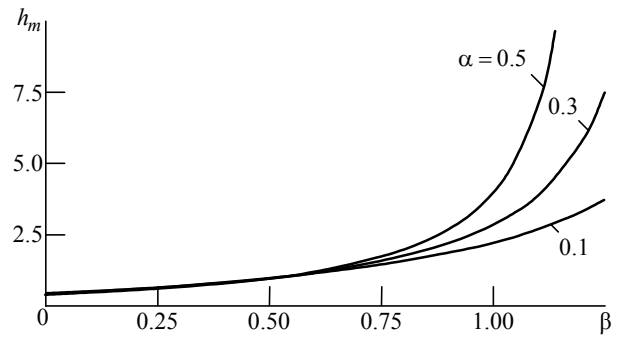


Рис. 6

На рис. 6 представлены графики зависимости коэффициента передачи  $h_m$  фильтра от коэффициента  $\beta$  при трех значениях коэффициента  $\alpha$ , рассчитанные по (9). Из рисунка следует, что диапазон регулирования коэффициента передачи фильтра ограничен предельным значением параметра  $\beta_{кр}=(2+\alpha)/(1+2\alpha)$ , при котором согласно (8) полюсная добротность увеличивается до бесконечного значения ( $Q \rightarrow \infty$ ) и в схеме фильтра возникает самовозбуждение. На рис. 7 показаны АЧХ полосового фильтра при значении параметра  $\alpha=0.5$  и различных коэффициентах  $\beta$ . Из представленных АЧХ видно, что коэффициент передачи на резонансной частоте  $h_m$  можно регулировать в широких пределах.

**Заключение.** В статье представлена новая схема ППАФ с линейной перестройкой полюсной

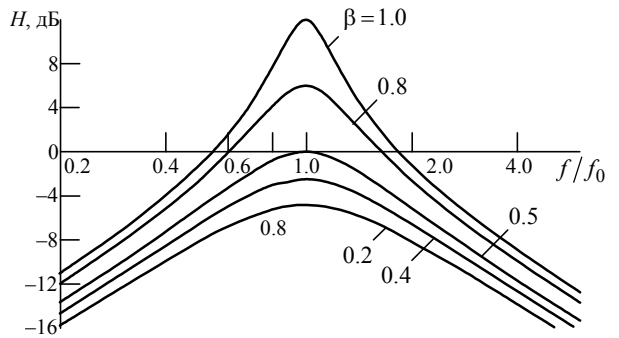


Рис. 7

добротности и независимой перестройкой в широких пределах резонансной частоты и коэффициента передачи. Предложена процедура проектирования и расчета параметров схемы фильтра. Схема фильтра реализована на основе корректирующего звена второго порядка с использованием перестраиваемой RC-схемы Т-моста. В качестве корректирующего звена могут быть использованы другие аналогичные схемы на основе, например, RC-моста Вина или схемы Саллена–Ки. Получены расчетные формулы для основных параметров фильтра: резонансной частоты, полюсной добротности и коэффициента передачи. Представлены частотные характеристики фильтра и иллюстрации перестраиваемых параметров. Реализация фильтра подтверждена моделированием с использованием программных средств MicroCap10.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kureve T. D., Mise J. A., Atsuwe B. A. Implementation of an Active RC Band-Pass Filter at Varying Quality Factors Using Matlab // Int. j. of scientific & Technology research. 2014. Vol. 3, iss. 5. P. 350–352.
2. Raut R., Swamy M. N. S. Modern Analog Filter Analysis and Design: a Practical Approach. Weinheim: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 364 p.
3. A Widely Tunable Active-RC Complex Filter for Multi-Mode Wireless Receivers with Automatic Frequency Tuning / Wanga Ruoyu, Min Lin, Hongmin Wang, Shulong Sun // IEICE Electronics Express. 2016. Vol. 13, № 18. P. 20160764.
4. Mohan P. V. A. VLSI Analog Filters/ Active RC, OTA-C and SC. New York: Springer Science Business Media, 2013. 618 p. (Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology).
5. Thede L. Practical Analog and Digital Filter Design-DSP-Book. Norwood: Artech House, 2004. 277 p.
6. Winder S. Analog and digital filter design. 2nd ed. Boston London: Elsevier Science, 2002. 458 p.
7. Active Filters. URL: <http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E22/L7-Active%20Filters.pdf> (дата обращения: 14.04.2018).
8. Zin Ma Ma Myo, Zaw Min Aung, Zaw Min Naing. Design and Implementation of Active Band-Pass Filter for Low Frequency RFID (Radio Frequency Identification) System // Proc. of the Int. Multi Conf. of Engineers and Computer Scientists. March 18–20, 2009, Hong Kong. IMECS, 2009. Vol. I. URL: <http://studylib.net/doc/18715629/design-and-implementation-of-active-band> (дата обращения: 16.04.2018).
9. Abdul Hussein Adul Zehra Abd. Design and Simulation of 4th Order Active Band-Pass Filter Using Multiple Feed Back And Sallen-Key Topologies // J. of Babylon University, Engineering Sciences. 2014. Vol. 22, № 2. P. 463–473.
10. Rana S., Dev Sharma K., Pal K. A High Q Band Pass Filter Using Two Operational Amplifiers // J. of Physical Sciences. 2007. Vol. 11. P. 133–138.
11. Soliman A. M., Huelsman K. Newcomb Filter Generation and Op Amp Realizations // J. of Circuits, Systems, and Computers. 2008. Vol. 17, № 4. P. 637–658.
12. Линейные схемы. Руководство по проектированию / пер. с англ. под ред. Х. Цумбалева. М.: Техносфера, 2011. 1128 с.
13. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: в 2 т. Т. 2 / пер. с нем. М.: Додэка-XXI, 2008. 942 с.
14. Пат. RU 2150782 С1. МПК H03N11/12 (2000.01). Полосовой ARC-фильтр с понижением частоты полюса / Ю. И. Иванов; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
15. Пат. RU 2110140 С1 МПК H03N11/04 (1995.01). Перестраиваемый активный RC-фильтр / С. В. Гришин, Ю. И. Иванов, С. Г. Крутччинский; опубл. 27.04.98.
16. Свид. на полезную модель СССР 1737706. МПК H03N 11/12. Полосовой активный RC-фильтр / А. С. Коротков, Л. П. Ниemi; опубл. 30.05.92. Бюл. № 20.
17. А. с. СССР 1688387 МКИ H03N11/12. Активный RC-фильтр / С. В. Гришин, С. Г. Крутччинский, С. В. Сердюков; опубл. 30.10.91. Бюл. № 40.
18. Иншаков Ю. М., Белов А. В. Перестраиваемый активный амплитудный RC-корректор // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 4. С. 66–70.

Статья поступила в редакцию 09 февраля 2018 г.

**Иншаков Юрий Михайлович** – кандидат технических наук (1973), доцент (1978), профессор кафедры теоретических основ электротехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – цифровая обработка сигналов; исследование цифровых и аналоговых фильтров.  
E-mail: [Inshakov40@mail.ru](mailto:Inshakov40@mail.ru)

**Белов Александр Викторович** – кандидат технических наук (1977), ведущий научный сотрудник Института экспериментальной медицины (Санкт-Петербург). Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – аналоговая обработка сигналов; исследование аналоговых фильтров.  
E-mail: [avbelov1@ya.ru](mailto:avbelov1@ya.ru)

## REFERENCES

1. Kureve T. D., Mise J. A., Atsuwe B. A. Implementation of an Active RC Band-Pass Filter at Varying Quality Factors Using Matlab. Int. j. of scientific & Technology research. 2014, vol. 3, iss. 5, pp. 350–352.
2. Raut R., Swamy M. N. S. Modern Analog Filter Analysis and Design: a Practical Approach. Weinheim, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010, 364 p.
3. Wanga Ruoyu, Min Lin, Hongmin Wang, Shulong Sun. A Widely Tunable Active-RC Complex Filter for Multi-Mode Wireless Receivers with Automatic Frequency Tuning. IEICE Electronics Express. 2016, vol. 13, no. 18, pp. 20160764.
4. Mohan P. V. A. VLSI Analog Filters, Active RC, OTA-C and SC. New York, Springer Science Business Media, 2013, 618 p. (Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology).
5. Thede L. Practical Analog and Digital Filter Design-DSP-Book. Norwood, Artech House, 2004, 277 p.
6. Winder S. Analog and digital filter design. 2nd ed. Boston London, Elsevier Science, 2002, 458 p.
7. Active Filters. Available at: <http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E22/L7-Active%20Filters.pdf> (accessed: 14 April 2018).

8. Zin Ma Ma Myo, Zaw Min Aung, Zaw Min Naing. Design and Implementation of Active Band-Pass Filter for Low Frequency RFID (Radio Frequency Identification) System. Proc. of the Int. Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. March 18–20, 2009, Hong Kong, IMECS, 2009, vol. I. Available at: <http://studylib.net/doc/18715629/design-and-implementation-of-active-band> (accessed: 16.04.2018).

9. Abdul Hussein Abdul Zehra Abd. Design and Simulation of 4th Order Active Band-Pass Filter Using Multiple Feed Back And Sallen-Key Topologies. J. of Babylon University, Engineering Sciences. 2014, vol. 22, no. 2, pp. 463–473.

10. Rana S., Dev Sharma K., Pal K. A High Q Band Pass Filter Using Two Operational Amplifiers. J. of Physical Sciences. 2007, vol. 11, pp. 133–138.

11. Soliman A. M., Huelsman K. Newcomb Filter Generation and Op Amp Realizations. J. of Circuits, Systems, and Computers. 2008, vol. 17, no. 4, pp. 637–658.

12. Linear Circuit Design Handbook; ed. by H. Zumbahlen. Burlington, Newnes/Elsevier, 2008, 1128 p.

Received February, 09, 2018

13. Tietze U., Schenk Ch. Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2002, 942 p.

14. Ivanov Yu. I. *Polosovoi ARC-fil'tr s ponizhenniem chastoty polyusa* [Bandpass ARC-Filter with Low-Frequency Field]. Patent RF, no. 2150782, 2000. (In Russian)

15. Grishin S. V., Ivanov Yu. I., Krutchinskii S. G. *Perestraivaemyi aktivnyi RC-fil'tr* [Tunable Active RC Filter]. Patent RF, no. 2110140, 1998. (In Russian)

16. Korotkov A. S., Niemi L. R. *Polosovoi aktivnyi RC-fil'tr* [Bandpass Active RC Filter]. The USSR Useful Model Certificate, no. 1737706, 1992. (In Russian)

17. Grishin S. V., Krutchinskii S. G., Serdyukov S. V. *Aktivnyi RC-fil'tr* [Active RC Filter]. AS SSSR, no. 1688387, 1991. (In Russian)

18. Inshakov Yu. M., Belov A. V. Adjustable Active Amplitude RC Corrector. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 4, pp. 66–70. (In Russian)

**Yuri M. Inshakov** – Ph.D. in Engineering (1973), Associate Professor (1978), Professor of the Department of Theoretical Bases of Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: digital signal processing, digital and analog filters research. E-mail: [Inshakov40@mail.ru](mailto:Inshakov40@mail.ru)

**Alexander V. Belov** – Ph.D. in Engineering (1977), Leading Scientist of FSBSI "Institute of Experimental Medicine". The author of 60 scientific publications. Area of expertise: analog signal processing, analog filters research. E-mail: [avbelov1@ya.ru](mailto:avbelov1@ya.ru)