

26. Kas'yanov A.O., Sumatokhin K.V. Rezul'taty chislennogo modelirovaniya polyarizatorov na osnove mikropoloskovykh difraktsionnykh reshetok meandrovogo tipa [Pass-through and reflective diffraction gratings composed of TFH-printed re-emitters], pp. 98-99.
27. Kas'yanov A.O. Preobrazovanie polyarizatsii elektromagnitnykh voln s pomoshch'yu pachatnykh difraktsionnykh reshetok v mikrovolnovom diapazone [Transformation of polarization of electromagnetic waves using printed diffraction gratings in the microwave range], *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2022, No. 1, pp. 11-31.

Статью рекомендовал к опубликованию: д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Касьянов Александр Олегович** – Южный федеральный университет, e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем, д.т.н.; профессор.

**Kasyanov Alexander Olegovich** – Southern Federal University; e-mail: kasyanovao@sfedu.ru; Rostov-on-Don, Russia; the department of radio engineering and telecommunication systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.38

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-192-206

**Д.Ю. Денисенко, Н.Н. Прокопенко, Ю.И. Иванов**

**СЕМЕЙСТВО АКТИВНЫХ RC-ФИЛЬТРОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА  
(ФНЧ, ФВЧ, ПФ) С НЕЗАВИСИМОЙ ПОДСТРОЙКОЙ ОСНОВНЫХ  
ПАРАМЕТРОВ\***

*Рассматривается банк схемотехнических решений активных RC-фильтров второго порядка – фильтр нижних частот, фильтр верхних частот и полосовые фильтры, в которых обеспечивается независимая настройка основных параметров - частоты полюса, добротности полюса и коэффициента передачи. С этих позиций сформулированы требования к трем специальным передаточным функциям многополюсника частотозадающей RC-цепи, которая содержит два резистора и два конденсатора. С помощью выбора коэффициентов числителя первой передаточной функции реализуется тип необходимого фильтра (ФНЧ, ФВЧ, ПФ). Коэффициенты второй передаточной функции выбираются таким образом, чтобы они влияли только на частоту полюса. Следует отметить, что в зависимости от набора коэффициентов полинома числителя передаточной функции, разработанные схемы обладают свойством понижения частоты полюса или повышения частоты полюса. При этом выбор параметров третьей передаточной функции обеспечивает необходимое затухание полюса. В введении приведено описание обобщенной архитектуры звеньев активных RC-фильтров второго порядка, которая позволяет реализовать алгоритм поэтапной настройки основных параметров и может быть положена в основу синтеза многих других модификаций активных RC-фильтров. Для корректной независимой настройки должна соблюдаться следующая последовательность: частота полюса, вторым этапом идет настройка добротности полюса, и третьим этапом - масштабный коэффициент передачи. Рассмотрены этапы синтеза данного класса активных RC-фильтров, приведены коэффициенты передаточных функций представленных схем 12 полосовых фильтров, фильтра верхних частот и фильтра нижних частот подтвержденные 14 патентами РФ.*

*Активные RC-фильтры; фильтр низких частот; фильтр высоких частот; полосовой фильтр; частота полюса; добротность полюса; коэффициент передачи.*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10109-П).

D.Y. Denisenko, N.N. Prokopenko, Yu.I. Ivanov

**A FAMILY OF SECOND-ORDER ACTIVE RC FILTERS (LPF, HPF, BPF)  
WITH INDEPENDENT ADJUSTMENT OF THE MAIN PARAMETERS**

*A bank of circuit design solutions for active RC filters of the second order is considered - a low-pass filter, a high-pass filter and band-pass filters, in which independent tuning of the main parameters - the pole frequency, the quality factor of the pole and the transmission coefficient is provided. From these positions, the requirements for three special transfer functions of a multipole frequency-setting RC circuit, which contains two resistors and two capacitors, are formulated. By choosing the coefficients of the numerator of the first transfer function, the type of the required filter (LPF, HPF, BPF) is implemented. The coefficients of the second transfer function are chosen so that they affect only the frequency of the pole. It should be noted that, depending on the set of coefficients of the transfer function numerator polynomial, the developed circuits have the property of lowering the pole frequency or increasing the pole frequency. In this case, the choice of parameters of the third transfer function provides the necessary attenuation of the pole. Using the The introduction describes a generalized architecture of second-order active RC filters, which allows implementing an algorithm for step-by-step tuning of the main parameters and can be used as the basis for the synthesis of many other modifications of active RC filters. For correct independent adjustment, the following sequence must be observed: the frequency of the pole, the second stage is the adjustment of the quality factor of the pole, and the third stage is the scaling factor. The stages of synthesis of this class of active RC filters are considered, the coefficients of the transfer functions of the presented circuits of 12 band-pass filters, a high-pass filter and a low-pass filter, confirmed by 14 patents of the Russian Federation, are given.*

*Active RC-filters; low pass filter; high pass filter; band pass filter; pole frequency; pole Q factor; transmission ratio.*

**Введение.** В известных схемах ФНЧ, ФВЧ, ПФ второго порядка [1–4] при настройке одного параметра, например, частоты полюса ( $\omega_p$ ), изменяется другой параметр – затухание полюса ( $d_p$ ) или коэффициент передачи ( $M$ ).

На рис. 1 представлена обобщенная архитектура звеньев второго порядка [5], в которой реализуется независимая подстройка  $\omega_p$ ,  $M$  и  $d_p$ . Данная структура включает: входной (ОУ1) и выходной (ОУ2) усилители, частотозадающую RC-цепь (ЧЦ). Здесь  $f_{23}(p)$ ,  $f_{63}(p)$  и  $f_{53}(p)$  – передаточные функции частотозадающей RC-цепи от узла  $i$  ( $i=2,5,6$ ) к узлу 3. С помощью выбора коэффициентов числителя передаточной функции  $f_{23}(p)$  реализуется тип необходимого фильтра. Коэффициенты передаточной функции  $f_{63}(p)$  выбираются таким образом, чтобы они влияли на частоту полюса, а коэффициенты числителя передаточной функции  $f_{53}(p)$  – только на затухание полюса. В рассматриваемой структуре фильтра сопротивление резистора  $R_{10}$  влияет только на коэффициент передачи фильтра  $M$ . Рассмотрим более подробно этапы синтеза данного класса АРСФ.

В общем виде передаточная функция частотозадающей цепи (ЧЦ) с различными её входами на выход имеет следующий вид [6–8]:

$$f(p) = \frac{p^2 + pd_0\omega_0 + \omega_0^2}{p^2 + pd_u\omega_u + \omega_u^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_0, \omega_u$  – частота нуля и полюса ЧЦ,  $d_0, d_u$  – затухание нуля и полюса ЧЦ.

Введём логические переменные  $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ , принимающие два значения «0» или «1» и показывающие наличие или отсутствие соответствующих коэффициентов в числителе передаточной функции (1). Тогда

$$f_{23}(p) = \frac{\alpha_2 p^2 + \alpha_1 p d_0 \omega_0 + \alpha_0 \omega_0^2}{p^2 + p d_u \omega_u + \omega_u^2} = \frac{g_{23}(p)}{D(p)}. \quad (2)$$

где  $g_{23}(p)$  и  $D(p)$  – полиномы числителя и знаменателя передаточной функции частотозадающей RC-цепи.

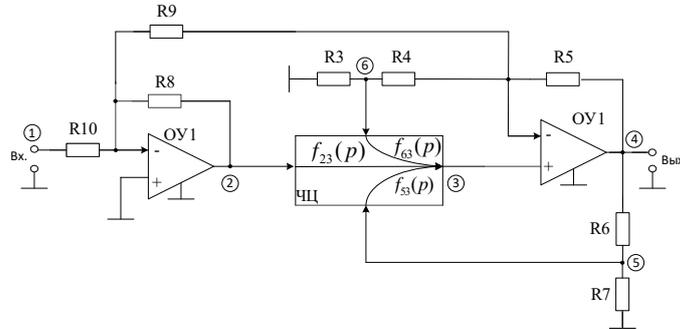


Рис. 1. Обобщенная структура звеньев АРСФ второго порядка с независимой подстройкой параметров

При этом существует три вида комбинации коэффициентов  $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ , которые позволяют реализовать три типа фильтров – ФВЧ:  $\alpha_2 = 1, \alpha_1 = 0, \alpha_0 = 0$ ; ПФ:  $\alpha_2 = 0, \alpha_1 = 1, \alpha_0 = 0$ ; ФНЧ:  $\alpha_2 = 0, \alpha_1 = 0, \alpha_0 = 1$ .

Таким образом, передаточные функции  $f_{23}(p)$  от узла 2 к узлу 3 для разных типов АРСФ могут быть представлены в следующем виде

$$\text{ФВЧ: } f_{23}(p) = \frac{p^2}{p^2 + p d_u \omega_u + \omega_u^2}, \quad (3)$$

$$\text{ПФ: } f_{23}(p) = \frac{p d_0 \omega_0}{p^2 + p d_u \omega_u + \omega_u^2}, \quad (4)$$

$$\text{ФНЧ: } f_{23}(p) = \frac{\omega_u^2}{p^2 + p d_u \omega_u + \omega_u^2}. \quad (5)$$

На следующем этапе синтеза АРСФ рассмотрим передаточную функцию  $f_{63}(p)$  от узла 6 к узлу 3 частотозадающей цепи:

$$f_{63}(p) = \frac{g_{63}(p)}{D(p)}. \quad (6)$$

Набор коэффициентов полинома числителя  $g_{63}(p)$  в формуле (6) позволяет сделать зависимой частоту полюса звена второго порядка не только от параметров элементов ЧЦ, но и от величины коэффициентов обратных связей операционных усилителей. При этом существует четыре варианта набора коэффициентов  $g_{63}(p)$  (в зависимости от конкретной схемы включения частотозадающей RC-цепи):

1.  $g_{63}(p) = p^2$ ,
2.  $g_{63}(p) = p^2 + p d_u \omega_u$ ,

3.  $g_{63}(p) = \omega_u^2$ ,
4.  $g_{63}(p) = pd_u \omega_u + \omega_u^2$ .

При этом реализованные схемы по первому и второму варианту обладают свойством понижения частоты полюса, а по третьему и четвертому варианту – с повышением частоты полюса.

Для независимой регулировки затухания полюса  $d_0$  необходимо, чтобы функция передачи  $f_{53}(p)$  от узла 5 к узлу 3 частото задающей RC-цепи имела вид:

$$f_{53}(p) = \frac{pd_0 \omega_0}{p^2 + pd_u \omega_u + \omega_u^2} = \frac{g_{53}(p)}{D(p)}, \quad (7)$$

где  $g_{53}(p)$  – полином числителя передаточной функции.

Следует отметить, что коэффициенты знаменателей передаточных функций ЧЦ не зависят от входа и имеют одинаковые выражения. При этом для канонических цепей, содержащих минимальное число реактивных элементов на порядок, справедливо равенство частоты нуля и частоты полюса, то есть  $\omega_0 = \omega_p$ .

В соответствии с рис. 1 передачи ветвей графа  $\gamma_{ij}$  от узла  $i$  к узлу  $j$  (где узел  $j$  – исток,  $i$  – сток), с учетом передач ветвей частото задающей RC-цепи  $f_{23}(p)$ ,  $f_{63}(p)$  и  $f_{53}(p)$  определяются как

$$\begin{aligned} \gamma_{12}(p) &= -\frac{R_8}{R_{10}}; \quad \gamma_{23}(p) = \frac{g_{23}(p)}{D(p)}; \quad \gamma_{34}(p) = 1 + \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_9}; \quad \gamma_{32}(p) = -\frac{R_8}{R_9}; \\ \gamma_{45}(p) &= \frac{R_7}{R_6 + R_7}; \quad \gamma_{53}(p) = f_{53}(p) = \frac{g_{53}(p)}{D(p)}; \quad \gamma_{36}(p) = \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \quad \gamma_{63}(p) = f_{63}(p) = \frac{g_{63}(p)}{D(p)}. \end{aligned} \quad (8)$$

По формуле Мейсона [9–11] общая передаточная функция от первого узла в четвертый, учитывая передачи ветвей графа (8), имеет вид:

$$F_{14}(p) = \frac{-\frac{R_8}{R_{10}} g_{23}(p) \left(1 + \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_9}\right)}{D(p) + g_{23}(p) \frac{R_8}{R_9} - \left(1 + \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_9}\right) \left(-\frac{R_7}{R_6 + R_7}\right) g_{53}(p) - g_{63}(p) \left(-\frac{R_3}{R_3 + R_4}\right)}. \quad (9)$$

В уравнении (9) тип реализуемой передаточной функции фильтра (ФНЧ, ФВЧ или ПФ) определяется набором коэффициентов полинома  $g_{23}(p)$ , а выбором коэффициентов полиномов числителей  $g_{53}(p)$  и  $g_{63}(p)$  в предлагаемой структуре можно обеспечить независимую настройку частоты и затухания полюса звена путём изменения сопротивления резисторов  $R_3 - R_{10}$ .

Цель и новизна настоящей статьи состоит в рассмотрении синтезированного, на основе описанной структуры рис. 1, нового подкласса активных RC-фильтров с названными выше свойствами, защищенные патентами РФ [12–25]. Во всех разработанных схемах АРСФ [12–25] независимая настройка параметров осуществляется в следующей последовательности: частота полюса  $\omega_p$ , добротность полюса  $d_p$  и затем масштабный коэффициент передачи  $M$ .

**Полосовые фильтры второго порядка.** В табл. 1 показаны звенья ПФ и их основные параметры, на основе которых могут быть созданы практические схемы фильтров. Впервые данные схемотехнические решения были представлены в [14–25], где приведены результаты компьютерного моделирования амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик при перестройки параметров.

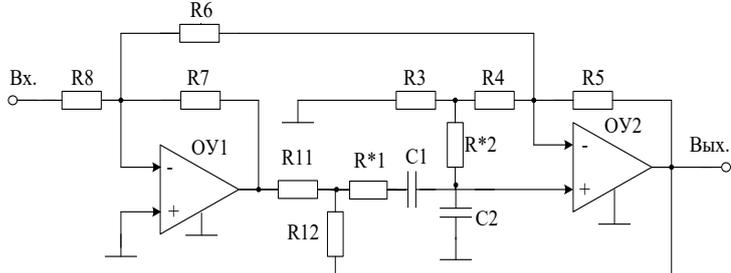
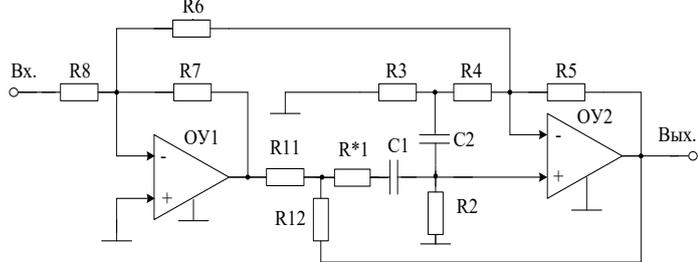
Передаточные функции этих звеньев в общем виде определяются выражением

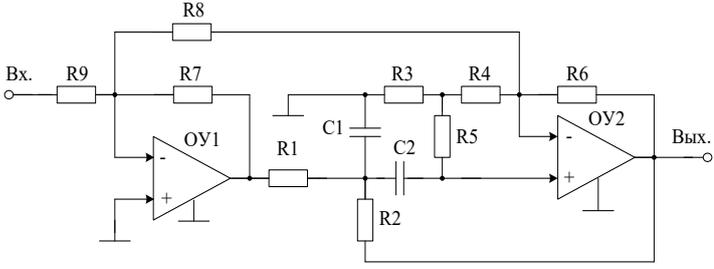
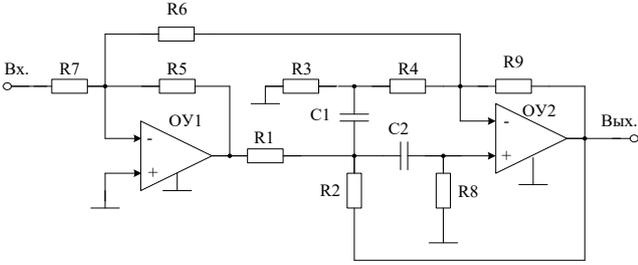
$$F_{14}(p) = M \frac{pd_p \omega_p}{p^2 + pd_p \omega_p + \omega_p^2},$$

а формулы её коэффициентов для каждой схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Схемы ПФ второго порядка с независимой настройкой параметров**

Но- мер звена ПФ	Схема звена ПФ [14–25]	
1.		
M		$\frac{\gamma_1 \alpha \beta \frac{1}{R_1 C_2}}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{1-k}{\tau_2} + \frac{1}{R_1 C_2} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1 - \beta)]}$
$\omega_p$		$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
$d_p$		$\sqrt{1 + \frac{R_4}{R_3}} \times \left( \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} + (1-k) \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} (1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1 - \beta)) \right)$
Примечание		$R_1 = R^*_1 + R_{11} \parallel R_{12}; R_2 = R^*_2 + R_3 \parallel R_4; \gamma_1 = \frac{R_7}{R_6};$ $\gamma_2 = \frac{R_7}{R_8}; k = \frac{R_3}{R_3 + R_4}; \alpha = \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_6}; \tau_1 = R_1 C_1;$ $\tau_2 = R_2 C_2; \beta = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}.$
2.		

	M	$-\frac{\gamma_1 \alpha \beta}{1-k} \frac{1}{R_1 C_2}$ $\frac{1}{\tau_1 + \frac{1}{1-k} \left[ \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{R_1 C_2} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1-\beta)] \right]}$
	$\omega_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
	$d_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \times \left( \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} + \frac{1}{(1-k)} \left[ \sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_2}} + \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} [1 + \beta \gamma_2 - \alpha(1-\beta)] \right] \right)$
	Примечание	$R_1 = R^*_1 + R_{11} \parallel R_{12}; \gamma_1 = \frac{R_7}{R_6}; \gamma_2 = \frac{R_7}{R_8}; k = \frac{R_3}{R_3 + R_4};$ $\alpha = \frac{R_5}{(R_3 + R_4) \parallel R_6}; \tau_1 = R_1 C_1; \tau_2 = R_2 C_2; \beta = \frac{R_{12}}{R_{11} + R_{12}}.$
3.	M	
	M	$-\frac{R_7 \left( 1 + \frac{R_6}{R_3 + R_4} \right)}{R_9 \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1}{R_5} \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right) + 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_7}{R_8} - \left( 1 + \frac{R_6}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_1}{R_2} \right)}$
	$\omega_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2}} \sqrt{\frac{1}{R_5} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$
	$d_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4}} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2 R_5}}{\sqrt{R_1 + R_2}} \times \left[ \left( \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \right) \frac{1}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \right.$ $\left. + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + \frac{R_7}{R_8} \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} - \left( 1 + \frac{R_6}{R_3 + R_4} \right) \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \frac{1}{R_2} \right]$
4.	M	

	M	$\frac{\frac{R_5}{R_7} \left(1 + \frac{R_9}{R_3 + R_4}\right)}{-\frac{R_1}{R_8} \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) + 1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_5}{R_6} - \left(1 + \frac{R_9}{R_3 + R_4}\right) \frac{R_1}{R_2}}$
	$\omega_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2}}} \sqrt{\frac{1}{R_8} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}$
	$d_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2 R_8}}{\sqrt{R_1 + R_2}}} \times \left[ \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + \left(\sqrt{\frac{C_1}{C_2}} + \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}\right) \frac{1}{R_8} + \frac{R_5}{R_6} \frac{1}{R_1} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} - \left(1 + \frac{R_9}{R_3 + R_4}\right) \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} \frac{1}{R_2} \right]$
5.		
	M	$-\frac{R_1 R_5 R_6 C_1 \beta}{R_1 R_6 R_7 \beta (C_1 + C_2) + C_3 R_6 R_7 (R_1 + R_2) - \beta (K C_2 R_1 R_6 R_7 + R_1 R_6)}$
	$\omega_p$	$\sqrt{\beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_3 R_1 R_2 (C_1 + C_2)}}$
	$d_p$	$\frac{\sqrt{R_1 (C_1 + C_2)}}{\sqrt{R_2 C_3}} \sqrt{\beta} + \frac{\sqrt{C_3} (R_1 + R_2)}{\sqrt{\beta} \sqrt{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}} - \sqrt{\beta} \frac{K C_2 \sqrt{R_1}}{\sqrt{C_3 R_2 (C_1 + C_2)}} - \frac{R_7 C_2 \sqrt{R_1}}{R_6 \sqrt{C_3 R_2 (C_1 + C_2)}}$
	Примечание	$\beta = 1 + \frac{R_3 + R_4}{R_3}, K = 1 + \frac{R_8}{R_5    (R_3 + R_4)}$
6.		
	M	$-\frac{R_5 R_6 C_2 \beta}{R_7 R_2 (R_3 + R_4) (R_1 R_6 C_2 + R_2 R_6 C_3 + R_2 R_6 C_2 + R_5 R_6 C_1 - R_2 R_6 C_1 \beta + R_5 R_6 C_2)}$

	$\omega_p$	$\sqrt{R_4} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1 C_3 R_2 (C_1 + C_2) (R_3 + R_4)}}$
	$d_p$	$\frac{(R_1 R_6 C_3 + R_2 R_6 C_3 + R_2 R_6 C_2 + R_2 R_6 C_1 - R_2 R_6 C_1 \beta + R_2 R_5 C_2)}{\sqrt{R_4 R_1 C_3 R_2 (C_1 + C_2) R_6}}$ $** \frac{\sqrt{R_1 C_3 R_2 (C_1 + C_2) (R_3 + R_4)}}{\sqrt{R_3 R_1 C_3 R_2 (C_1 + C_2) R_6}}$
	Примечание	$\beta = 1 + \frac{R_8}{R_6    (R_3 + R_4)}$
7.		
	M	$\frac{\frac{R_5}{R_7} \left( 1 + \frac{R_8}{R_3 + R_4} \right)}{\frac{C_2}{C_1} + 1 + \frac{R_5}{R_6} + \frac{R_4}{R_4 + R_3} \frac{R_1}{R_2}}$
	$\omega_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_4 + R_3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
	$d_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4} \left( \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \left( 1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} + \frac{R_4}{R_4 + R_3} \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \right)}$
8.		
	M	$\frac{\frac{R_5}{R_7} \left( 1 + \frac{R_8}{R_3 + R_4} \right)}{\frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{C_2}{C_1} + 1 + \frac{R_5}{R_6} + \frac{R_1}{R_2}}$
	$\omega_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_4 \sqrt{R_2 C_2 R_1 C_1}}}$
	$d_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4} \times \left( \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \left( 1 + \frac{R_5}{R_6} \right) \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \right)}$

9.		
	М	$-\frac{R_5 R_6 \tau_1}{R_6 R_7 \tau_2 + R_1 R_6 C_2 - R_5 \tau_1}$
	$\omega_p$	$\sqrt{\beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}$
	$d_p$	$\frac{\tau_2 R_6 + R_1 R_6 C_2 - \tau_1 R_5}{\sqrt{\beta} \sqrt{\tau_1 \tau_2} R_6}$
Примечание	$\tau_2 = C_2 R_2, \tau_1 = C_1 R_1, \beta = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$	
10.		
	М	$\frac{R_5 R_6 \tau_1}{\tau_1 R_6 (\gamma R_6 - R_5) + \tau_2 R_6 R_8 + R_1 C_2 R_6 R_8}$
	$\omega_p$	$\sqrt{\gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}$
	$d_p$	$\frac{\tau_1 (\gamma R_6 - R_5) + \tau_2 R_6 + R_1 C_2 R_6}{\sqrt{\gamma} \sqrt{\tau_1 \tau_2} R_6}$
Примечание	$= \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \tau_2 = C_2 R_2, \tau_1 = C_1 R_1, \gamma = \frac{R_9}{R_9 + R_{10}},$ $= 1 + \frac{R_5}{R_5 \parallel R_6 \parallel R_8}$	
11.		
	М	$\frac{R_5 R_6 (R_3 + R_4 + R_8) \tau_1}{R_7 (R_3 + R_4) (R_1 C_2 R_6 + R_6 \tau_2 - R_5 \tau_1) - R_7 R_8 \tau_1 (R_5 + R_6)}$

	$\omega_p$	$\sqrt{R_4} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2 (R_3 + R_4)}}$
	$d_p$	$\frac{R_3 + R_4}{C_1 R_2} + \frac{R_3 + R_4}{\tau_1} - \frac{R_8 (R_3 + R_4 + R_8)}{\tau_2 R_6} - \frac{R_8}{\tau_2} \frac{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}{\sqrt{R_4} \sqrt{(R_3 + R_4)}}$
	Примечание	$\tau_1 = C_1 R_1, \tau_2 = C_2 R_2$
12.		
	M	$-\frac{R_6 \tau_1 (R_3 + R_4 + R_5)}{(R_3 + R_4)(R_7 \tau_2 + R_7 C_2 R_7) - R_5 R_7 \tau_1 - \tau_1 R_7 (R_3 + R_4 + R_5)}$
	$\omega_p$	$\sqrt{R_4} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_1 \tau_2 (R_3 + R_4)}}$
	$d_p$	$\left( \frac{R_3 + R_4}{C_1 R_2} + \frac{R_3 + R_4}{\tau_1} - \frac{(R_3 + R_4 + R_5)}{\tau_2} - \frac{R_5}{\tau_2} \right) \frac{\sqrt{\tau_1 \tau_2}}{\sqrt{R_4} \sqrt{(R_3 + R_4)}}$
	Примечание	$\tau_1 = C_1 R_1, \tau_2 = C_2 R_2, \alpha = \frac{R_8}{R_9 + R_8}, \gamma = 1 + \frac{R_6}{R_7}$

**Фильтры низких частот второго порядка.** Для реализации ФНЧ с независимой подстройкой основных параметров необходимо, чтобы передаточная функция  $F_{14}(p)$  (в соответствии с обобщенной структурной схемой на рис. 1) имела вид

$$F_{14}(p) = M \frac{\omega_p^2}{p^2 + p d_p \omega_p + \omega_p^2}.$$

Пример построения такого ФНЧ [12] и его основные параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

**ФНЧ второго порядка с независимой настройкой параметров**

1.		
	M	$-\frac{R_3}{R_7} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} + \frac{R_5}{R_6} \right)$

	$\omega_p$	$\sqrt{1 + \frac{R_3}{R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
	$d_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \times \left( \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} - \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} \left( \frac{R_5}{R_4} + \frac{R_5}{R_6} \right) \right)$

**Фильтры высоких частот второго порядка.** В соответствии с обобщенной структурной схемой на рис. 1 передаточная функция ФВЧ  $F_{14}(p)$

$$F_{14}(p) = M \frac{p^2}{p^2 + pd_p \omega_p + \omega_p^2} .$$

Пример построения ФВЧ [13] с независимой подстройкой основных параметров представлен в табл. 3.

Таблица 3

**ФВЧ второго порядка с независимой настройкой параметров**

1.		
	M	$-\frac{R_3}{R_7} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} + \frac{R_5}{R_6} \right)$
	$\omega_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}$
	$d_p$	$\sqrt{\frac{R_4}{R_3 + R_4}} \times \left( \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} - \sqrt{\frac{R_2 C_2}{R_1 C_1}} \left( \frac{R_5}{R_4} + \frac{R_5}{R_6} \right) \right)$

**Заключение.** Рассмотрено семейство активных RC-фильтров, включающее 14 схем ФНЧ, ФВЧ, ПФ второго порядка с независимой подстройкой основных параметров (частоты полюса, добротности полюса и масштабного коэффициента передачи), и их обобщенная структурная схема, которая может быть положена в основу синтеза многих других модификаций АРСФ.

Установлены требования к параметрам трех специальных передаточных функций многополюсника частотоподающей RC-цепи обобщенной схемы, при выполнении которых настройка частоты полюса не влияет на добротность полюса и коэффициент передачи или добротность полюса настраивается независимо от частоты полюса и коэффициента передачи. В качестве примеров построения АРСФ рассматриваемого класса приведены уравнения для основных параметров 14 схем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Славский Г.Н.* Активные RC- и RCL-фильтры и избирательные усилители. – М.: Связь. 1966. – 216 с.
2. *Moschytz G.S., Horn P.* Active filter design handbook: for use with programmable pocket calculators and minicomputers. – Chichester England, New York, J. Wiley, 1981. – 316 p.
3. *Sallen R.P., Key E.L.* A Practical Method of Designing RC Active Filters. IRE Trans // Circuit Theory. – 1955. – P. 78-85.
4. *Huelsman L.P., Allen P.E.* Introduction to the Theory and Design of Active Filters. – McGraw-Hill. New York, 1980. – 429 p.
5. *Denisenko D.Y., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Ivanov Y.I.* Generalized Structure of Active RC Filters with Independent Tuning of Pole Frequency, Pole Q-Factor and Transfer Ratio // Proceedings of 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium. – 2021. – P. 1-5. – <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581023>.
6. *Jung S., Song I., Cressler J.D.* Systematic methodology for applying Mason's signal flow graph to analysis of feedback circuits // 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2014. – P. 2421-2424. – <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2014.6865661>.
7. *Sheng Z., Jishi S., Shuibao Y., Xi C.* Research on Integrated Technology of RC Active Filter Optimization // 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. – 2010. – P. 1177-1179. – <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.597>.
8. *Ezzedine H., Billonnet L., Jarry B., Guillon P.* Design method and optimization of noise performances for different types of planar microwave active filters // Proceedings of the IEEE - Russia Conference. 1999 High Power Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications. MIA-ME'99. – 1999. – P. 1143-1148. – <https://doi.org/10.1109/MIAME.1999.827830>.
9. *Parmann L.D.* Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – 439 p.
10. *Shuhong Xu.* Study on uncertain decision factors of logistics distribution using Mason theory // 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. – 2011. – P. 2691-2694. – <https://doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5778217>.
11. *Lawrence P.H., Phillip E.A.* Introduction to the Theory and Design of Active Filters. – McGraw-Hill, New York, 1980. – 429 p.
12. Патент РФ № 2656728. ARC-фильтр нижних частот с независимой настройкой основных параметров / *Денисенко Д.Ю., Иванов Ю.И., Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В.* Дата заявки: 27.06.17. Дата публикации: 06.06.18. – 18 с. – URL: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2694135>.
13. Патент РФ № 2694135. ARC-фильтр верхних частот с независимой подстройкой основных параметров / *Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Прокопенко Н.Н.* Дата заявки: 11.09.2018. Дата публикации: 06.06.18. – 18 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2694135C1\\_20190709.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2694135C1_20190709.pdf).
14. Патент РФ № 2694134. Полосовой ARC-фильтр на двух операционных усилителях с повышением частоты полюса и независимой подстройкой основных параметров / *Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В., Прокопенко Н.Н., Свизев Г.А.* Дата заявки: 11.09.18. Дата публикации: 09.07.19. – 18 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2694134C1\\_20190709.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2694134C1_20190709.pdf).
15. Патент РФ № 2688237. Полосовой ARC-фильтр на двух операционных усилителях с понижением частоты полюса и независимой подстройкой основных параметров / *Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В., Прокопенко Н.Н., Жебрун Е.А.* Дата заявки: 11.09.2018. Дата публикации: 21.05.19. – 17 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2688237C1\\_20190521.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2688237C1_20190521.pdf).
16. Патент РФ № 2701095. Низкочувствительный полосовой фильтр с независимой подстройкой основных параметров // *Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В., Игнашин А.А., Прокопенко Н.Н.* Дата заявки: 11.03.2019. Дата публикации: 24.09.19. – 14 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701095C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701095C1_20190924.pdf).
17. Патент РФ № 2704530. Широкополосный полосовой фильтр с независимой подстройкой частоты полюса, затухания полюса и коэффициента передачи // *Денисенко Д.Ю., Бугакова А.В., Жебрун Е.А., Прокопенко Н.Н.* Дата заявки: 07.03.2019. Дата публикации: 29.10.19. – 14 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2704530C1\\_20191029.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2704530C1_20191029.pdf).
18. Патент РФ № 2697944. Полосовой фильтр второго порядка с независимой подстройкой основных параметров / *Денисенко Д.Ю., Бутырлагин Н.В., Свизев Г.А., Прокопенко Н.Н.* Дата заявки: 25.02.2019. Дата публикации: 21.08.19. – 13 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2697944C1\\_20190821.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2697944C1_20190821.pdf).

19. Патент РФ № 2701038. Полосовой фильтр на двух операционных усилителях с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Овсепян Е.В., Тимов А.Е., Прокопенко Н.Н. Дата заявки: 27.02.2019. Дата публикации: 24.09.19. – 15 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701038C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701038C1_20190924.pdf).
20. Патент РФ № 2718709. Полосовой фильтр с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 22.11.2019. Дата публикации: 14.04.2020. – 12 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2718709C1\\_20200414.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2718709C1_20200414.pdf).
21. Патент РФ № 2718830. Полосовой фильтр второго порядка с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 25.11.2019. Дата публикации: 14.04.2020. – 15 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2718830C1\\_20200414.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2718830C1_20200414.pdf).
22. Патент РФ № 2722602. Активный полосовой фильтр второго порядка с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 10.12.2019. Дата публикации: 02.06.2020. – 14 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2722602C1\\_20200602.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2722602C1_20200602.pdf).
23. Патент РФ № 2720558. Полосовой фильтр на двух операционных усилителях с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 11.12.2019. Дата публикации: 12.05.2020. – 14 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2720558C1\\_20200512.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2720558C1_20200512.pdf).
24. Патент РФ № 2722752. Полосовой фильтр с независимой подстройкой частоты полюса, затухания полюса и коэффициента передачи / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 11.12.2019. Дата публикации: 03.06.2020. – 14 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2722752C1\\_20200603.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2722752C1_20200603.pdf).
25. Патент РФ № 2721404. Активный RC-фильтр с независимой подстройкой основных параметров / Денисенко Д.Ю., Прокопенко Н.Н., Тимов А.Е. Дата заявки: 12.12.2019. Дата публикации: 19.05.2020. – 13 с. – URL: [https://patents.s3.yandex.net/RU2721404C1\\_20200519.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2721404C1_20200519.pdf).

## REFERENCES

1. Slavsky G.N. Aktivnyye RC- i RCL- fil'try i izbiratel'nyye usiliteli [Active RC and RCL filters and selective amplifiers]. Moscow: Communication. 1966. 216 p.
2. Moschytz G.S., Horn P. Active filter design handbook: for use with programmable pocket calculators and minicomputers. Chichester England, New York, J. Wiley, 1981, 316 p.
3. Sallen R.P., Key E.L. A Practical Method of Designing RC Active Filters. IRE Trans, *Circuit Theory*, 1955, pp. 78-85.
4. Huelsman L.P., Allen P.E. Introduction to the Theory and Design of Active Filters. McGraw-Hill. New York, 1980, 429 p.
5. Denisenko D.Y., Prokopenko N.N., Pakhomov I.V., Ivanov Y.I. Generalized Structure of Active RC Filters with Independent Tuning of Pole Frequency, Pole Q-Factor and Transfer Ratio, *Proceedings of 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium*, 2021, pp. 1-5. Available at: <https://doi.org/10.1109/EWDTS52692.2021.9581023>.
6. Jung S., Song I., Cressler J.D. Systematic methodology for applying Mason's signal flow graph to analysis of feedback circuits, *2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2014, pp. 2421-2424. Available at: <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2014.6865661>.
7. Sheng Z., Jishi S., Shuibao Y., Xi C. Research on Integrated Technology of RC Active Filter Optimization, *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, pp. 1177-1179. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.597>.
8. Ezzedine H., Billonnet L., Jarry B., Guillon P. Design method and optimization of noise performances for different types of planar microwave active filters, *Proceedings of the IEEE - Russia Conference. 1999 High Power Microwave Electronics: Measurements, Identification, Applications. MIA-ME'99*, 1999, pp. 1143-1148. Available at: <https://doi.org/10.1109/MIAME.1999.827830>.
9. Parmann L.D. Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective. Kluwer Academic Publishers, 2001, 439 p.
10. Shuhong Xu. Study on uncertain decision factors of logistics distribution using Mason theory, *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011, pp. 2691-2694. Available at: <https://doi.org/10.1109/ICEICE.2011.5778217>.
11. Lawrence P.H., Phillip E.A. Introduction to the Theory and Design of Active Filters. McGraw-Hill, New York, 1980, 429 p.

12. Patent RF No. 2656728. *Denisenko D.Yu., Ivanov Yu.I., Prokopenko N.N., Bugakova A.V.* ARC-fil'tr nizhnikh chastot s nezavisimoy nastroykoy osnovnykh parametrov [ARC low-pass filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 27.06.17. Publication Date: 06.06.18, 18 p. Available at: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll/ru?ty=29&docid=2694135>.
13. Patent RF No. 2694135. *Denisenko D.Yu., Butyrlagin N.V., Prokopenko N.N.* ARC-fil'tr verkhnikh chastot s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [High-pass ARC filter with independent tuning of the main parameters]. Application Date: 11.09.2018. Publication Date: 06.06.18, 18 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2694135C1\\_20190709.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2694135C1_20190709.pdf).
14. Patent RF No. 2694134. *Denisenko D.Yu., Bugakova A.V., Prokopenko N.N., Svizev G.A.* Polosovoy ARC-fil'tr na dvukh operatsionnykh usilitelyakh s povysheniyem chastoty polyusa i nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Bandpass ARC filter on two operational amplifiers with pole frequency increase and independent tuning of the main parameters]. Application Date: 11.09.18. Publication Date: 09.07.19, 18 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2694134C1\\_20190709.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2694134C1_20190709.pdf).
15. Patent RF No. 2688237. *Denisenko D.Yu., Bugakova A.V., Prokopenko N.N., Zhebrun E.A.* Polosovoy ARC-fil'tr na dvukh operatsionnykh usilitelyakh s ponizheniyem chastoty polyusa i nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Bandpass ARC filter on two operational amplifiers with pole frequency reduction and independent tuning of the main parameters]. Application Date: 11.09.2018. Publication Date: 21.05.19, 17 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2688237C1\\_20190521.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2688237C1_20190521.pdf).
16. Patent RF № 2701095. *Denisenko D.Yu., Bugakova A.V., Ignashin A.A., Prokopenko N.N.* Nizkochuvstvitel'nyy polosovoy fil'tr s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Low-sensitivity band-pass filter with independent tuning of the main parameters]. Application Date: 11.03.2019. Publication Date: 24.09.19, 14 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701095C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701095C1_20190924.pdf).
17. Patent RF № 2704530. *Denisenko D.Yu., Bugakova A.V., Zhebrun E.A., Prokopenko N.N.* Shirokopolosnyy polosovoy fil'tr s nezavisimoy podstroykoy chastoty polyusa, zatukhaniya polyusa i koeffitsiyenta peredachi [Broadband bandpass filter with independent adjustment of the pole frequency, pole attenuation and transmission coefficient]. Application Date: 07.03.2019. Publication Date: 29.10.19, 14 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2704530C1\\_20191029.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2704530C1_20191029.pdf).
18. Patent RF № 2697944. *Denisenko D.Yu., Butyrlagin N.V., Svizev G.A., Prokopenko N.N.* Polosovoy fil'tr vtorogo poryadka s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Second-order band-pass filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 25.02.2019. Publication Date: 21.08.19, 13 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2697944C1\\_20190821.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2697944C1_20190821.pdf).
19. Patent RF № 2701038. *Denisenko D.Yu., Ovsepyan E. V., Titov A. E., Prokopenko N.N.* Polosovoy fil'tr na dvukh operatsionnykh usilitelyakh s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov, [Band-pass filter on two operational amplifiers with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 27.02.2019. Publication Date: 24.09.19, 15 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2701038C1\\_20190924.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2701038C1_20190924.pdf).
20. Patent RF № 2718709. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N., Titov A.E.* Polosovoy fil'tr s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Bandpass filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 22.11.2019. Publication Date: 14.04.2020, 12 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2718709C1\\_20200414.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2718709C1_20200414.pdf).
21. Patent RF № 2718830. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N. N., Titov A.E.* Polosovoy fil'tr vtorogo poryadka s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Second-order band-pass filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 25.11.2019. Publication Date: 14.04.2020, 15 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2718830C1\\_20200414.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2718830C1_20200414.pdf).
22. Patent RF № 2722602. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N., Titov A.E.* Aktivnyy polosovoy fil'tr vtorogo poryadka s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Second-order active band-pass filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 10.12.2019. Publication Date: 02.06.2020, 14 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2722602C1\\_20200602.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2722602C1_20200602.pdf).
23. Patent RF № 2720558. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N., Titov A.E.* Polosovoy fil'tr na dvukh operatsionnykh usilitelyakh s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Bandpass filter on two operational amplifiers with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 11.12.2019. Publication Date: 12.05.2020, 14 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2720558C1\\_20200512.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2720558C1_20200512.pdf).

24. Patent RF № 2722752. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N., Titov A.E.* Polosovoy fil'tr s nezavisimoy podstroykoy chastoty polyusa, zatukhaniya polyusa i koeffitsiyenta peredachi [Band-pass filter with independent adjustment of the pole frequency, pole attenuation and transmission coefficient]. Application Date: 11.12.2019. Publication Date: 03.06.2020, 14 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2722752C1\\_20200603.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2722752C1_20200603.pdf).
25. Patent RF № 2721404. *Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N., Titov A.E.* Aktivnyy RC-fil'tr s nezavisimoy podstroykoy osnovnykh parametrov [Active RC filter with independent adjustment of the main parameters]. Application Date: 12.12.2019. Publication Date: 19.05.2020, 13 p. Available at: [https://patents.s3.yandex.net/RU2721404C1\\_20200519.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2721404C1_20200519.pdf).

Статью рекомендовала к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Л.В. Черкесова.

**Денисенко Дарья Юрьевна** – Южный федеральный университет; e-mail: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com); г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент. Донской государственный технический университет; управление научных исследований; м.н.с.

**Иванов Юрий Иванович** – e-mail: [ivanov.taganrog@gmail.com](mailto:ivanov.taganrog@gmail.com); тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Прокопенко Николай Николаевич** – Донской государственный технический университет; e-mail: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru); г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79185182266; кафедра информационные системы и радиотехника; д.т.н.; профессор; г.н.с.

**Denisenko Daria Yuriyovna** – Southern Federal University; e-mail: [d.u.ivanova@gmail.com](mailto:d.u.ivanova@gmail.com); Taganrog, Russia; phone: +78634361789; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor. Don State Technical University; management of scientific researches; junior researcher.

**Ivanov Yuriy Ivanovich** – e-mail: [ivanov.taganrog@gmail.com](mailto:ivanov.taganrog@gmail.com); phone: +78634361789; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Prokopenko Nikolay Nikolayevich** – Don State Technical University; e-mail: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru); Rostov-on-Don, Russia; phone: +79185182266; information systems and radio engineering; dr. of eng. sc.; professor; chief researcher.

УДК 621.396.67

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-206-212

**Ю.В. Юханов, И.А. Алшимайсаве**

### **5G ДВУХДИАПАЗОННАЯ ПРЯМОУГОЛЬНАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА С ДВУМЯ ТРАВЛЕНИЯМИ И ВЕРХНИМ ШЕСТИГРАННЫМ ВЫРЕЗОМ НА КОНЦЕ CPW FED**

*Во всем мире беспроводная или удаленная связь стала фундаментальной и незаменимой. Каждый день миллиарды пользователей получают доступ к звонкам, Интернету и социальным сетям. Многие электрические устройства, в том числе антенны, используются в сложных сетях и системах, поддерживающих такой массивный обмен информацией. Электрическое устройство, известное как антенна, отправляет или принимает информацию в космос. Антенна является ключевым компонентом многих систем, в том числе радио- и телевизионной передачи, приемников связи, радаров, сотовых телефонов, гаджетов с поддержкой Bluetooth и спутниковой связи. Быстрое распространение беспроводных технологий и персональной связи увеличило спрос на многодиапазонные антенны, которые могут работать на нескольких частотах и подходят для различных приложений. В этой статье представлена двухдиапазонная прямоугольная микрополосковая патч-антенна с*