

Денисенко Дарья Юрьевна, Бутырлагин Николай Владимирович,  
Прокопенко Николай Николаевич, Иванов Юрий Иванович

## **ДИСКРЕТНО-АНАЛОГОВЫЙ ФИЛЬТР НИЗКИХ ЧАСТОТ ВТОРОГО ПОРЯДКА НА ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ КОНДЕНСАТОРАХ С ОДНОЭЛЕМЕНТНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ ПОЛЮСА**

*Создан дискретно-аналоговый фильтр (ДАФ) низких частот (ФНЧ) второго порядка на переключаемых конденсаторах, в котором возможна перестройка частоты полюса путем изменения сопротивления одного частото задающего резистора при постоянных значениях других параметров ДАФ. Приведены основные математические выражения для расчета коэффициентов передачи ФНЧ на нулевой частоте, коэффициентов передачи ФНЧ на частоте полюса, частоты полюса и затухания полюса. Выполнено компьютерное моделирование предлагаемого ДАФ в среде MicroCap, которое подтверждает возможность их одноэлементной перестройки.*

*Дискретно-аналоговый фильтр, фильтр низких частот, передаточная функция второго порядка, резисторы обратной связи, буферный усилитель, компьютерное моделирование.*

Denisenko Daria Yurievna, Butyrlagin Nikolay Vladimirovich,  
Prokopenko Nikolay Nikolaevich, Ivanov Yuri Ivanovich

## **DISCRETE-ANALOG LOW-FREQUENCY FILTER OF THE SECOND ORDER ON SWITCHABLE CAPACITORS WITH SINGLE-ELEMENT TUNE OF THE POLE FREQUENCY**

*A discrete-analog low-frequency filter (LPF) of the second order on switchable capacitors has been created, in which it is possible to adjust the pole frequency by changing the resistance of one frequency-setting resistor at constant values of other DAF parameters. The basic mathematical expressions for calculating the low-pass filter transmission coefficients at zero frequency, low-pass filter transmission coefficients at the pole frequency, pole frequency and pole attenuation are given. A computer simulation of the proposed DAF has been carried out in the MicroCap environment, which confirms the possibility of their single-element rearrangement.*

*Discrete-analog filter, low-pass filter, second-order transfer function, feedback resistors, buffer amplifier, computer simulation.*

### **Введение**

Дискретно-аналоговые фильтры (ДАФ) на переключаемых конденсаторах широко используются в цепях частотной селекции и обработки аналоговых сигналов в науке и технике [1-9]. Микросхемы фильтров на переключаемых конденсаторах выпускаются многими микроэлектронными предприятиями [10-12].

Основная цель и оригинальность статьи состоит в исследовании ДАФ низких частот на переключаемых конденсаторах [13] с подстройкой частоты полюса путем изменения отношения сопротивлений дополнительных резисторов в цепи общей обратной связи при фиксированной частоте коммутации электронных ключей и без изменения емкостей переключаемых конденсаторов.

**Функциональная схема дискретно-аналогового фильтра с резистивным сумматором**

На рис. 1 приведены схема дискретно-аналогового фильтра [13], в котором входной сигнал  $u_{вх}$  суммируется с выходным сигналом ДАФ с помощью резисторов общей обратной связи  $R_1$ ,  $R_2$  и буферного усилителя БУ.

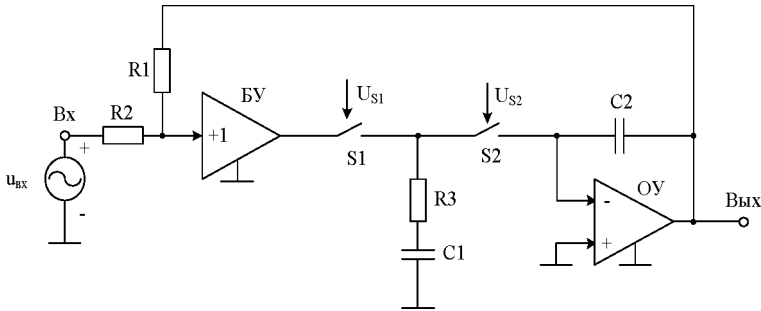


Рис. 1. Дискретно-аналоговый фильтр на переключаемых конденсаторах [13]

При последовательном и периодическом замыкании электронных ключей, а также при частоте переключения электронных ключей  $f_c$ , намного превышающей частоту полюса  $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$  для звена второго порядка, в результате математического анализа схем на рис. 1 можно показать, что этими схемами реализуется передаточная функция фильтра нижних частот второго порядка

$$F(p) = \frac{M_0 \omega_p^2}{p^2 + p d_p \omega_p + \omega_p^2}, \quad (1)$$

где  $M_0$  - коэффициент передачи ФНЧ на нулевой частоте,  
 $\omega_p$  - частота полюса,  
 $d_p$  - затухание полюса.

Основные параметры фильтров на рис. 1 находятся по следующим формулам:

- коэффициент передачи ФНЧ на нулевой частоте ДАФ

$$M_0 = -\frac{R_1}{R_2}, \quad (2)$$

- коэффициент передачи ФНЧ на частоте полюса для первой модификации ДАФ

$$M_{\omega_p} = -\frac{\frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{R_2}{R_2 + R_1}}}{2 \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}}, \quad (3)$$

- частота полюса для первой модификации ДАФ

$$\omega_p = \frac{\tau}{T} \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2}} \sqrt{\frac{R_1}{R_2 + R_1}} \quad (4)$$

– затухание полюса для первой модификации ДАФ

$$d_p = 2 \sqrt{1 + \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}} \quad (5)$$

В формулах (2-5)  $f_s$  – частота переключения электронных ключей, а  $T = 1/f_s$  – период их переключения,  $\tau$  – длительность замкнутого состояния ключей в течении периода, которая может находиться в диапазоне от 0 до  $T/2$ ,  $R_1, R_2$  – сопротивления первого  $R_1$ , второго  $R_2$  резисторов обратной связи,  $R_3$  – сопротивление частото задающего резистора  $R_3$ ,  $C_1, C_2$  – емкости первого  $C_1$  и второго  $C_2$  частото задающих конденсаторов соответственно.

На рис. 2 показаны последовательности импульсов  $Us_1$  и  $Us_2$ , управляющих электронными ключами в схемах ДАФ (рис. 1).

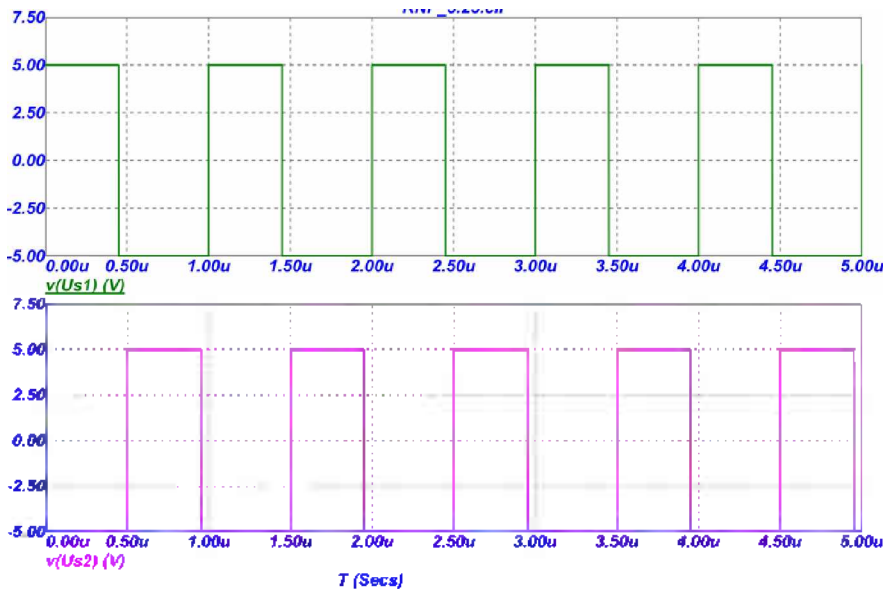


Рис. 2. Последовательности импульсов ( $Us_1, Us_2$ ), управляющих электронными ключами в схемах фильтров на рис. 1

На рис. 3 показана реакция схемы ДАФ (рис. 1) (их выходное напряжение  $v(\text{Out}_1)$ ) на входной синусоидальный сигнал  $v(\text{In})$  с амплитудой 1В

и частотой равной 11250 Гц, равной частоте полюса  $f_p$  фильтра, а также с частотой переключения электронных ключей 1МГц (их периоде 1мксек. В соответствии с формулой (3) на этой частоте при выбранных параметрах элементов коэффициент передачи ДАФ равен  $M_{\omega_p} = -3,535$ . Результаты моделирования схемы ДАФ на рис. 1 при частотах входного сигнала 11,25 Гц и 112500 Гц приведены в [13].

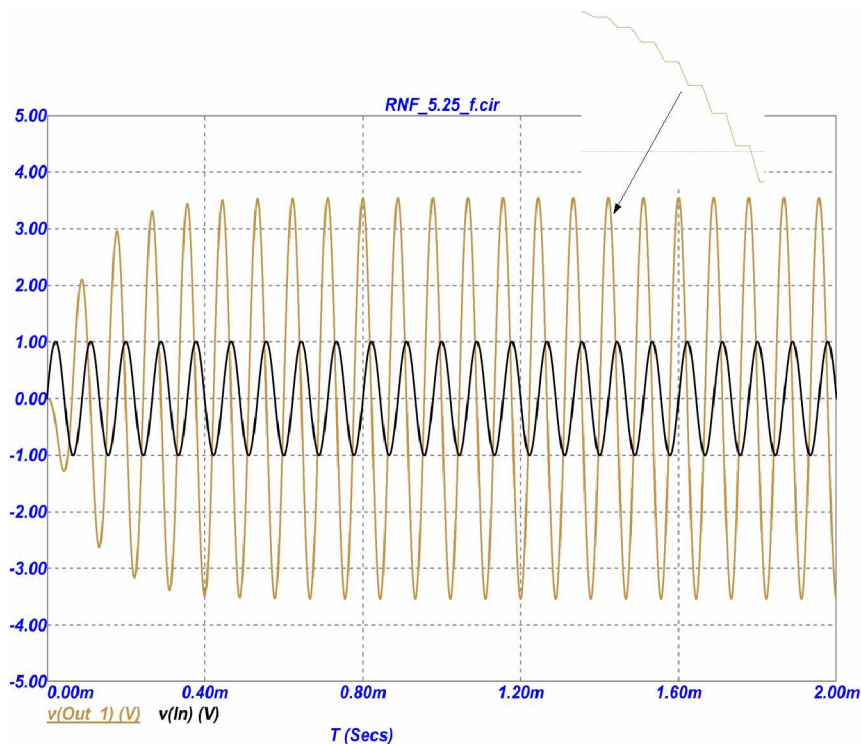


Рис. 3 Осциллограммы входных и выходных сигналов схемы ДАФ в среде Micro-Cap при частоте входного сигнала 11250 Гц

### Выводы

Разработан дискретно-аналоговый фильтр второго порядка на переключаемых конденсаторах, обладающий свойствами фильтра низких частот. ДАФ имеет близкий к единице коэффициент передачи на очень низких частотах ( $M_0 = -1$  согласно формуле (2) при  $R1=R2$ ) и близкий к нулю

коэффициент передачи на повышенных частотах, а также обладает возможностью одноэлементной перестройки частоты полюса с помощью изменения сопротивления резистора R3.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10023, <https://rscf.ru/en/project/23-79-10023/>).**

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Hiroo Wakaumi*, "A Switched-Capacitor Low-Pass Filter with Dynamic Switching Bias OP Amplifiers", *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* Vol. 2, No. 6, pp. 100-106 (2017).
2. *Tony Chan Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin*. *Analog Integrated Circuit Design*. - 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. 2011, 822 p.
3. *Design of analog CMOS integrated circuits / Behzad Razavi*, professor of electrical engineering, University of California, Los Angeles. – Second edition, McGraw-Hill Education, New York, 2017, 803p.
4. *CMOS Analog Circuit Design / Phillip E. Allen*, Professor Emeritus, Georgia Institute of Technology. - Third Edition, Oxford University Press, Inc., 2012, 783 p.
5. *Microelectronic circuits / Adel S. Sedra*, University of Waterloo, *Kenneth C. Smith*, University of Toronto. — Seventh edition. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2014, 1824 pages. — (The Oxford series in electrical and computer engineering).
6. *Hugo Alexandre de Andrade Serra, Nuno Paulino*, "Design of Switched-Capacitor Filter Circuits using Low Gain Amplifiers", Springer, 2015, 101 p.
7. *Sanjay Tumati*, "Design of Large Time-Constant Switched-Capacitor Filters for Biomedical Applications", A Thesis, Texas A&M University, December 2004.
8. *Paolo Vinella*, "Switched Capacitor: working principles and real IC-device application", Politecnico di Torino, URL: [https://areeweb.polito.it/didattica/corsidde/01NVD/Studmat/Miniproiect14/Vinella\\_SwCap\\_R\\_14.pdf](https://areeweb.polito.it/didattica/corsidde/01NVD/Studmat/Miniproiect14/Vinella_SwCap_R_14.pdf) (дата обращения: 20.05.2024).
9. *Seidel M.*, "Switched-capacitor networks for image processing: analysis, synthesis, response bounding, and implementation", 1994
10. Texas Instruments, URL: <https://www.ti.com/> (дата обращения: 20.05.2024).
11. Maxim, URL: <https://eshop.analog.com/en/app/home> (дата обращения: 20.05.2024).
12. Linear Technology, URL: <https://www.analog.com/en/index.html> (дата обращения: 20.05.2024).

13. *Денисенко Д.Ю., Кузнецов Д.В., Алферова И.А., Пахомов И.В.* Дискретно-аналоговый фильтр второго порядка на переключаемых конденсаторах с двумя электронными ключами : заявка на патент РФ № 2024108217, заявл. 28.03.24.

**Денисенко Дарья Юрьевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник «Управления научных исследований» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +7 9896350979, email: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com).

**Бутырлагин Николай Владимирович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник «Управления научных исследований» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +7 9034320799, email: [nbutvrlagin@mail.ru](mailto:nbutvrlagin@mail.ru).

**Прокопенко Николай Николаевич**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и радиотехника» Донской государственной технической университет, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000 телефон: +7 928 120 19 84, email: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru).

**Иванов Юрий Иванович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Систем автоматического управления» Южного Федерального Университета, Института радиотехнических систем и управления, , 347922, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44. телефон: +79061833631, email: [yiiivanov@sfedu.ru](mailto:yiiivanov@sfedu.ru).

**Denisenko Daria Yur'evna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), senior researcher, Department of Scientific Research of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79896350979, email: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com).

**Butyrlagin Nikolay Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), senior researcher at the Directorate of Scientific Research, Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, sq. Gagarina 1, 344000, phone: +7 9034320799, email: [nbutvrlagin@mail.ru](mailto:nbutvrlagin@mail.ru).

**Prokopenko Nikolay Nikolayevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Information Systems and Radio Engineering» of Don State Technical University, Russia, Gagarin's sq., 1, 344010 Rostov-on-Don; phone: +7 928 120 19 84, email: [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru).

**Ivanov Yuri Ivanovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems, Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Russia, Taganrog st. Nekrasovsky, 44, 347922, phone: +79061833631, email: [ivanov.taganrog@mail.ru](mailto:ivanov.taganrog@mail.ru).