

УДК 621.38

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-147-152

Комплексные полосовые фильтры на базе комплексных задержек, реализуемых на переключаемых конденсаторах и двух операционных усилителях

Ю.А. Гребенко, Аунг Ко Мин

Работа посвящена разработке методов расчета комплексных фильтров на переключаемых конденсаторах. Аналоговые и цифровые комплексные фильтры описаны в технической литературе достаточно подробно. В последние годы появились исследования, посвященные расчету и реализации комплексных фильтров на переключаемых конденсаторах. В ряде публикаций для построения комплексных фильтров использованы базовые звенья специального вида, названные комплексной задержкой. Применение комплексных задержек позволяет упростить расчет структурной схемы фильтра и обеспечить перестройку центральной частоты полосового комплексного фильтра путем синхронного изменения параметров комплексных задержек.

Описана новая схема комплексной задержки, выполняемая на двух операционных усилителях. Рассмотрена методика расчета комплексных полосовых фильтров на базе комплексных задержек, реализуемых с использованием переключаемых конденсаторов. В качестве примера разработана принципиальная схема комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта 3-го порядка. Расчет проводили в Z -области. Полученная передаточная функция реализована в виде двух моделей. Первая модель выполнена на базе аналоговых комплексных задержек и сумматоров. Вторая модель сделана на базе сумматоров и комплексных задержек, содержащих операционные усилители и переключаемые конденсаторы. Схемотехническое моделирование комплексных фильтров проводили в среде MicroCap. Частотная характеристика комплексного фильтра рассчитана с использованием первой модели. Во временной области смоделировано преобразование импульсного сигнала, как первой, так и второй моделью. Выходные сигналы обоих фильтров совпали. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода расчета комплексных фильтров на переключаемых конденсаторах.

Ключевые слова: комплексный полосовой фильтр, переключаемый конденсатор, комплексная задержка.

Для цитирования: Гребенко Ю.А., Аунг Ко Мин. Комплексные полосовые фильтры на базе комплексных задержек, реализуемых на переключаемых конденсаторах и двух операционных усилителях // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 147—152. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-147-152.

Complex Bandpass Filters Involving Complex Delays Constructed on the Basis of Switched Capacitors and Two Operational Amplifiers

Yu.A. Grebenko, Aung Ko Min

The article deals with development of methods for designing complex filters on the basis of switched capacitors. Analog and digital complex filters are described in the technical literature in sufficient detail. In recent years, investigations devoted to designing and implementing complex filters on the basis of switched capacitors have emerged. In a number of articles, basic sections of a special type, called a complex delay, were used to construct complex filters. The use of complex delays makes it possible to simplify the design calculation of the filter structural diagram. In addition, it opens the possibility of tuning the bandpass complex filter band center by simultaneously changing the parameters of complex delays. A new complex delay scheme implemented on two operational amplifiers is described. A procedure for designing complex bandpass filters on the basis of complex delays implemented with the use of switched capacitors is considered. As an example, the basic circuit of a complex bandpass filter with a 3rd order Butterworth low-pass prototype has been developed. The calculation was carried out in the Z domain. The resulting transfer function was implemented in the form of two models. The first model is implemented on the basis of analog complex delays and adders. The second model is constructed on the basis of adders and complex delays containing operational amplifiers and switched capacitors. The schematic modeling of complex filters was carried out in the MicroCap software environment. The complex filter's frequency response was calculated using the first model. The transformation of an impulse signal in the time domain was simulated using both the first and the second models. The output signals of both filters were identical with each other. The simulation results have confirmed the efficiency of the proposed method for designing complex filters on the basis of switched capacitors.

Key words: complex bandpass filter, switched capacitor, complex delay.

For citation: Grebenko Yu.A., Aung Ko Min. Complex Bandpass Filters Involving Complex Delays Constructed on the Basis of Switched Capacitors and Two Operational Amplifiers. MPEI Vestnik. 2018;6:147—152. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-6-147-152.

Введение

Фильтры на переключаемых конденсаторах известны уже несколько десятилетий, и интерес к их разработке не ослабевает. Ежегодно появляются новые научные исследования [1 — 4].

Расчет фильтров на переключаемых конденсаторах целесообразно проводить в Z-области с помощью методик расчета цифровых фильтров [5]. Метод расчета комплексных цифровых фильтров описан в [6] и предполагает использование цифровых модулей, названных авторами комплексными задержками.

Комплексная задержка обеспечивает умножение отсчета комплексного сигнала на коэффициент $e^{j\Phi_0}$ и задержку на тактовый интервал, где Φ_0 — смещение по оси цифровых частот в радианах.

Комплексная задержка может быть реализована с использованием элементов задержки на переключаемых конденсаторах. Схема комплексной задержки на переключаемых конденсаторах, реализуемая на четырех операционных усилителях (ОУ), предложена в [7 — 9].

Представлена новая схема комплексной задержки на переключаемых конденсаторах, реализуемая на двух ОУ (рис. 1). На ней номиналы конденсаторов выбраны таким образом, чтобы обеспечивались следующие соотношения:

$$\frac{C_1}{C_0} = \cos \Phi_0; \quad \frac{C_2}{C_0} = \sin \Phi_0.$$

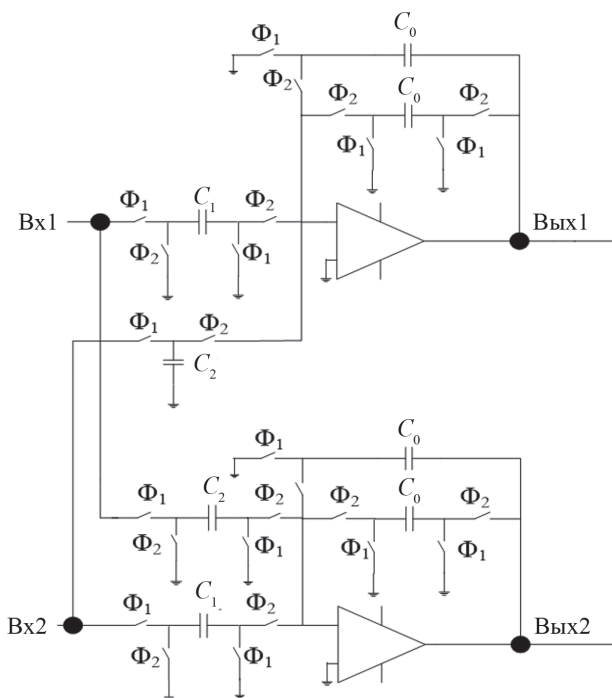


Рис. 1. Комплексная задержка на переключаемых конденсаторах

Методика расчета полосового комплексного фильтра на переключаемых конденсаторах

Предлагается следующая последовательность расчета.

1. Разрабатывается структурная схема фильтра нижних частот (ФНЧ) на элементах задержки с с граничной частотой полосы пропускания, равной половине полосы пропускания полосового фильтра.

2. В соответствии с описанной в [6] методикой она преобразуется в структурную схему комплексного полосового фильтра на комплексных задержках.

3. Составляется принципиальная схема фильтра с реализацией комплексных задержек на переключаемых конденсаторах в соответствии со схемой рис. 1.

Приведем пример расчета.

Выберем НЧ-прототип фильтра и зададим параметры комплексного фильтра. Допустим, что выбран НЧ-прототип Баттерворта третьего порядка:

$$T(s) = \frac{1}{s+1} \frac{1}{s^2+s+1}.$$

Зададим параметры комплексного полосового фильтра. Пусть коэффициент передачи на центральной частоте T_0 равен 1, нормированная цифровая центральная частота $w_0 = 0,2$, полоса пропускания $\Delta w = 0,2$.

Проведем расчет в соответствии с предложенной методикой.

Определим параметры ФНЧ. Коэффициент передачи на нулевой частоте должен быть равен значению $T_0 = 1$, а граничная частота полосы пропускания $w_n = \Delta w/2 = 0,1$. Рассчитаем передаточную функцию цифрового ФНЧ, используя метод обобщенного билинейного преобразования. В случае расчета ФНЧ замена переменных имеет вид

$$s = \gamma \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}},$$

где $\gamma = \text{ctg}(\pi w_n) = 3,0777$.

$$T(z) = \frac{1}{\left[\left(\gamma \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)^2 + \left(\gamma \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) + 1 \right]} \frac{1}{\left[\left(\gamma \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right)^2 + 1 \right]} =$$

$$= \frac{0,07380172 + 0,14760344z^{-1} + 0,07380172z^{-2}}{1 - 1,25051643z^{-1} + 0,54572332z^{-2}} \times$$

$$\times \frac{0,24523728 + 0,24523728z^{-1}}{1 - 0,50952545z^{-1}} =$$

$$= \frac{A_1 + A_2z^{-1} + A_3z^{-2}}{1 + B_1z^{-1} + B_2z^{-2}} \frac{A_4 + A_5z^{-1}}{1 + B_3z^{-1}}.$$

Данной передаточной функции можно поставить в соответствие структурную схему, изображенную на рис. 2.

Путем схемотехнического моделирования в среде Micro-Cap получена АЧХ ФНЧ при величине задержки, равной 0,1 мкс. Она приведена на рис. 3 и идентична исходным параметрам ФНЧ.

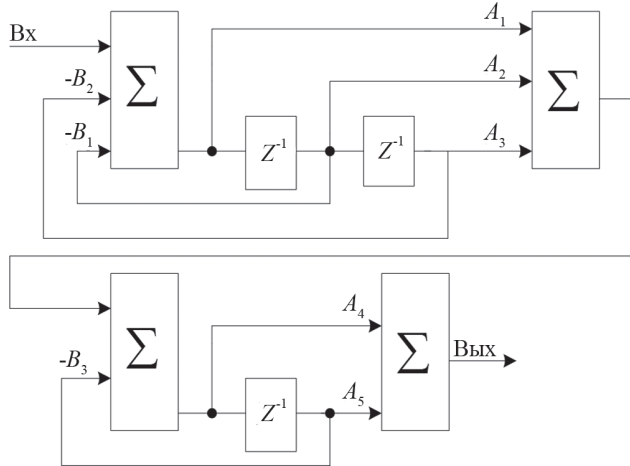


Рис. 2. Последовательная структурная схема ФНЧ

В соответствии с методикой, описанной в [6], преобразуем структурную схему цифрового ФНЧ (рис. 2) в структурную схему цифрового комплексного фильтра на базе комплексных задержек. Полученная схема полосового комплексного фильтра дана на рис.4.

Модель цифрового комплексного полосового фильтра, составленная в соответствии со структурной схемой рис. 4, изображена на рис. 5.

В результате моделирования определена АЧХ, показанная на рис. 6 и соответствующая заданным параметрам комплексного фильтра.

По итогам моделирования во временной области построены составляющие выходного сигнала комплексного фильтра при подаче на один из входов импульса длительностью, равной половине периода коммутации и амплитудой 1 В (рис. 7).

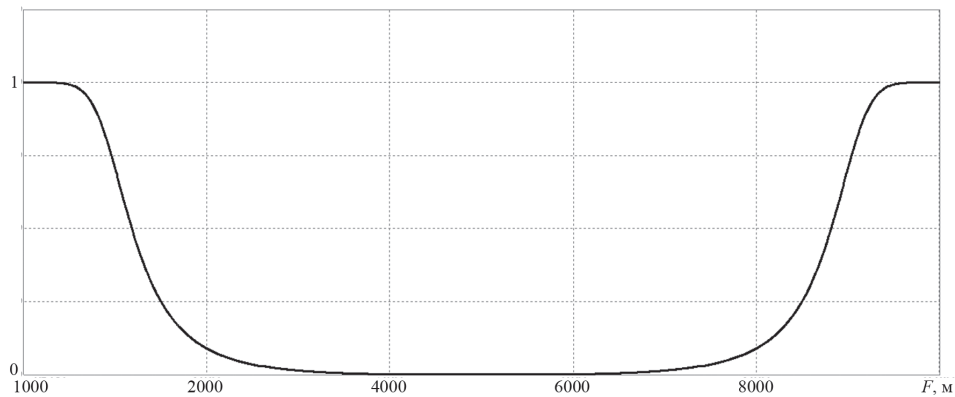


Рис. 3. АЧХ ФНЧ

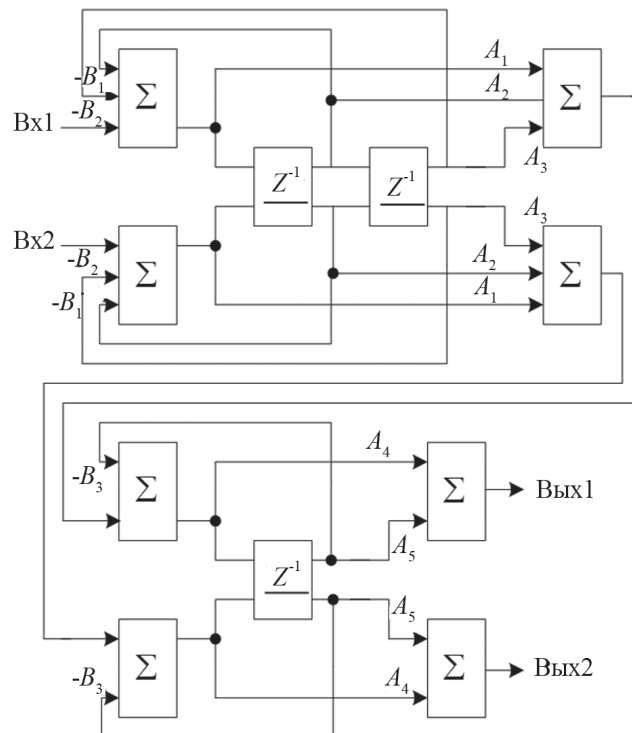


Рис. 4. Структурная схема полосового комплексного фильтра на базе комплексных задержек

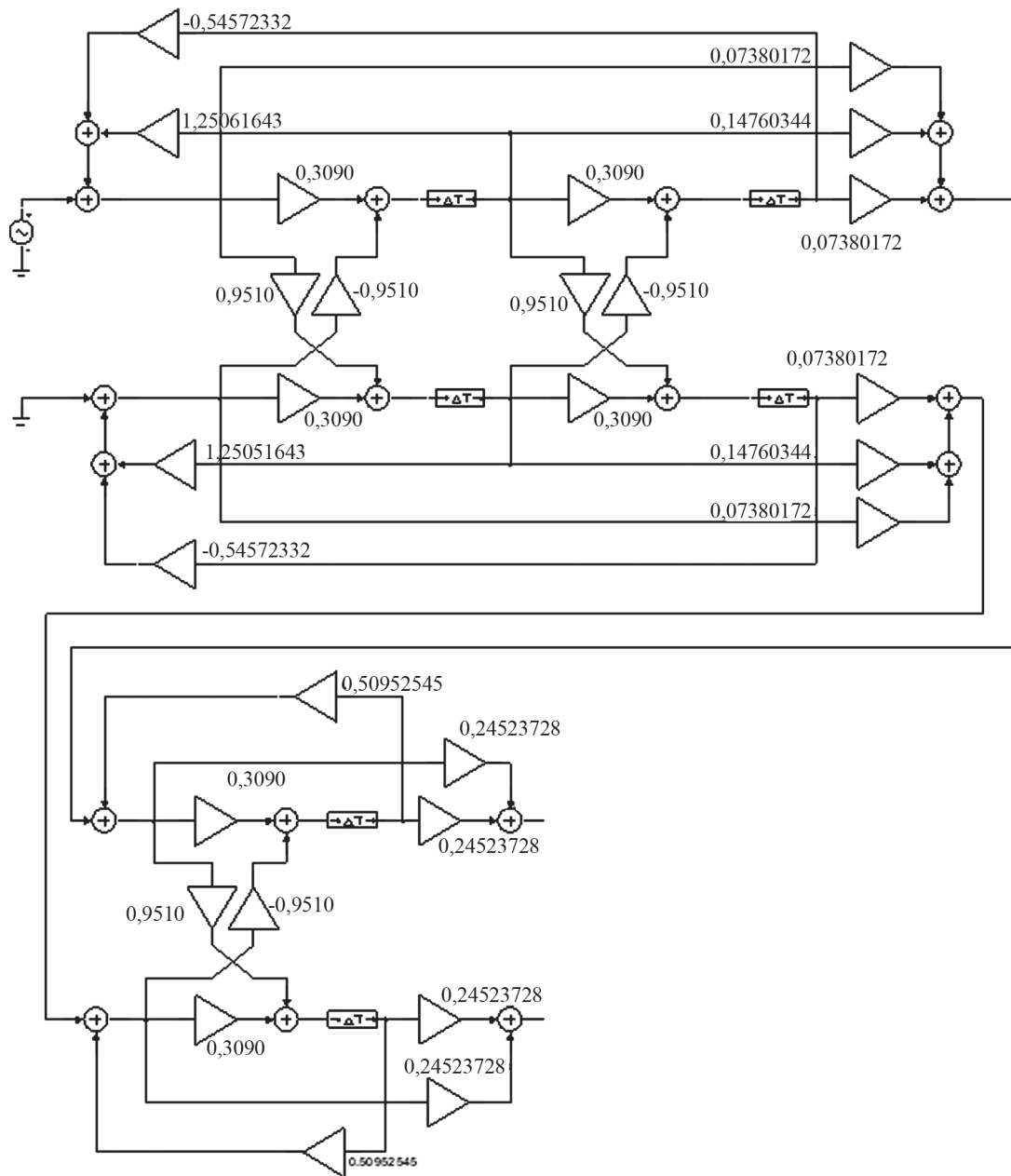


Рис. 5. Модель комплексного полосового фильтра

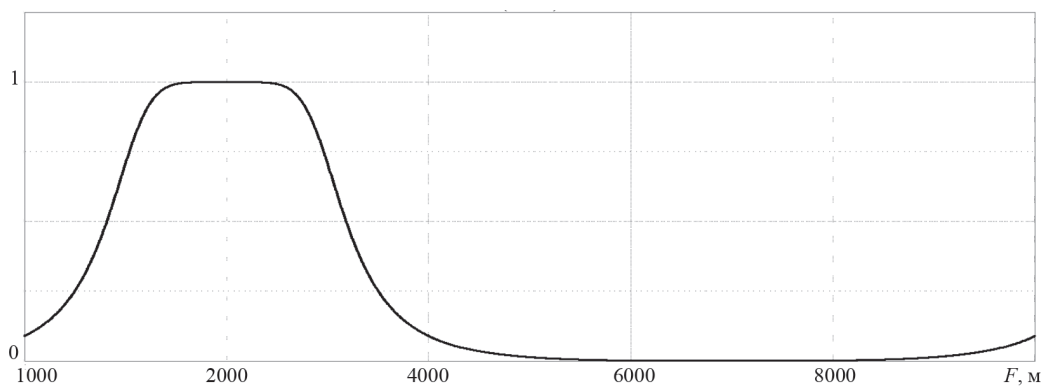


Рис. 6. АЧХ комплексного полосового фильтра

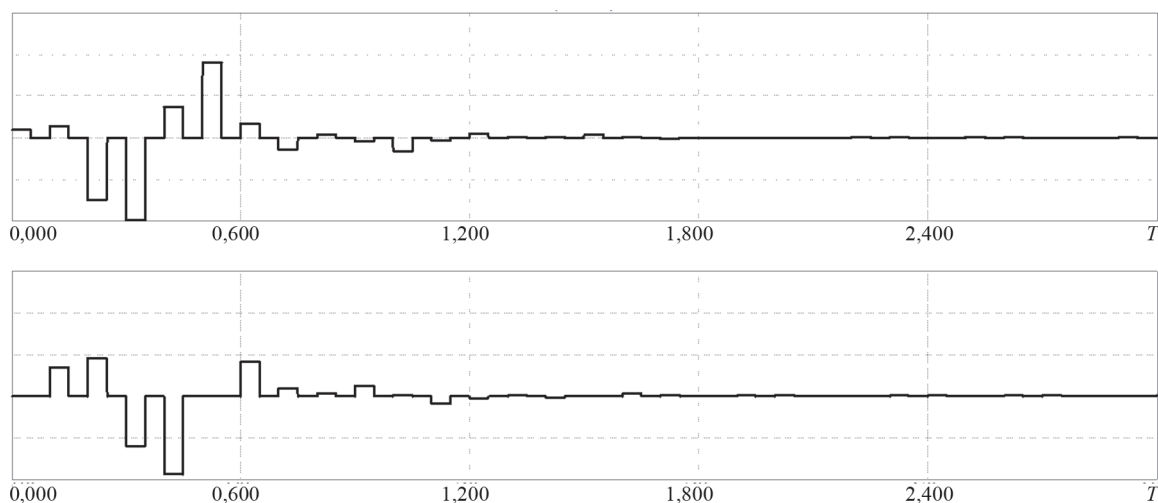


Рис. 7. Составляющие комплексного сигнала на выходах комплексного полосового фильтра

В соответствии со структурной схемой, показанной на рис. 4, была составлена модель комплексного полосового фильтра, в которой комплексные задержки реализованы на переключаемых конденсаторах по предложенной схеме (рис. 1).

При подаче на один из входов комплексного полосового фильтра импульса длительностью, равной половине периода коммутации и амплитудой 1 В, были получены сигналы на его выходах, совпадающие с сигналами, приведенными на рис. 7. Это позволяет говорить о совпадении временных и частотных характеристик модели комплексного полосового фильтра, показанной на рис. 5, и модели, в которой комплексные

задержки реализованы на переключаемых конденсаторах и двух операционных усилителях.

Таким образом, предложена новая схема комплексной задержки на переключаемых конденсаторах и показано, что на ее основе можно разрабатывать комплексные полосовые фильтры.

Пример расчета, рассмотренный в статье, и полученные результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной схемы комплексной задержки на переключаемых конденсаторах и возможность ее использования для реализации комплексных полосовых фильтров высокого порядка на переключаемых конденсаторах.

Литература

1. Горшков К.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Формирование схемных функций для дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами // Электричество. 2017. № 1. С. 47—53
2. Горшков К.С., Курганов С.А., Филаретов В.В. Формирование безызбыточных выражений схемных функций для дискретно-аналоговых цепей с переключаемыми конденсаторами // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. Ульяновск: Изд-во Ульяновского гос. техн. ун-та, 2016. С. 3—18.
3. Кушнеров А.Д., Шмуэль Б.Я. Универсальный алгебраический синтез преобразователей на переключаемых конденсаторах, основанный на обобщенных числах Фибоначчи // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 165—169.
4. Иванов В.Э., Антонов Р.А. Дискретно-аналоговый вейвлет-фильтр: проблемы и способы реализации // Информационные технологии XXI века. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского гос. ун-та, 2014. С. 24—31.
5. Гребенко Ю.А. Методы цифровой обработки сигналов в радиоприемных устройствах. М.: Издат. дом МЭИ, 2006.

References

1. Gorshkov K.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V. Formirovanie Skhemnyh Funktsiy dlya Diskretno-analogovyh Tsepey s Pereklyuchaemymi Kondensatorami. Elektrichestvo. 2017;1:47—53. (in Russian).
2. Gorshkov K.S., Kurganov S.A., Filaretov V.V. Formirovanie Bezyzbytochnykh Vyrazheniy Skhemnyh Funktsiy dlya Diskretno-analogovyh Tsepey s Pereklyuchaemymi Kondensatorami. Sintez, Analiz i Diagnostika Elektronnyh Tsepey. Ulyanovsk: Izd-vo Ulyanovskogo Gos. Tekhn. Un-ta, 2016:3—18. (in Russian).
3. Kushnerov A.D., Shmuel' B.Ya. Universal'nyy Algebraicheskiy Sintez Preobrazovateley na Pereklyuchaemym Kondensatorah, Osnovanny na Obobshchennyh Chislakh Fibonachchi. Omskiy Nauchny Vestnik. 2016;5 (149):165—169. (in Russian).
4. Ivanov V.E., Antonov R.A. Diskretno-analogovyy Veyvlet-filtr: Problemy i Sposoby Realizatsii. Informatsionnye Tekhnologii XXI Veka. Habarovsk: Izd-vo Tihookeanskogo Gos. Un-ta, 2014:24—31. (in Russian).
5. Grebenko Yu.A. Metody Tsifrovoy Obrabotki Signalov v Radiopriemnyh Ustroystvah. M.: Izdat. Dom MPEI, 2006. (in Russian).

6. Гребенко Ю.А., Акар М'о. Проектирование цифровых комплексных фильтров методом комплексной задержки // Вестник МЭИ. 2009. № 1. С. 70—72.

7. **Toropchin D.S.** Complex Switched MOS Capacitor Filters // Proc. 24th Int. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technol. 2014. Pp. 963—965.

8. **Торопчин Д.С., Богатырев Е.А.** Синтез комплексных фильтров при поддержке подсистем САПР Anadigm Designer 2 // Известия ВолгГТУ. 2015. № 6. С. 149—155.

9. **Торопчин Д.С.** Комплексные фильтры на переключаемых МОП-конденсаторах REDS // Телекоммуникационные устройства и системы. 2014. Т. 4. № 4. С. 312—316.

6. **Grebenko Yu.A., Akar M'o.** Proektirovanie Tsifrovyyh Kompleksnyh Fil'trov Metodom Kompleksnoy Zaderzhki. Vestnik MPEI. 2009;1:70—72. (in Russian).

7. **Toropchin D.S.** Complex Switched MOS Capacitor Filters. Proc. 24th Int. Crimean Conf. Microwave & Telecommunication Technol. 2014:963—965.

8. **Toropchin D.S., Bogatyrev E.A.** Sintez Kompleksnyh Fil'trov pri Podderzhke Podsystem SAPR Anadigm Designer 2. Izvestiya VolgGTU. 2015;6:149—155. (in Russian).

9. **Toropchin D.S.** Kompleksnye Fil'try na Pereklyuchaemyh MOP-kondensatorah REDS. Telekomunikatsionnye Ustroystva I Sistemy. 2014;4;4:312—316. (in Russian).

Сведения об авторах:

Гребенко Юрий Александрович — доктор технических наук, заведующий кафедрой формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: GrebenkoYA@mpei.ru

Аунг Ко Мин — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ»

Information about authors:

Grebenko Yuriy A. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: GrebenkoYA@mpei.ru

Aung Ko Min — Ph.D.-student of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.03.2018

The article received to the editor: 27.03.2018