
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

РАДИОТЕХНИКА, В ТОМ ЧИСЛЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА ТЕЛЕВИДЕНИЯ (05.12.04)

УДК 621.38

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-111-117

Комплексный полосовой фильтр на базе инвертирующих интеграторов, реализуемых на переключаемых конденсаторах

Ю.А. Гребенко, Аунг Ко Мин

Описана новая схема комплексного звена на инвертирующих интеграторах, реализуемая на двух операционных усилителях, конденсаторах и ключах. Рассмотрена методика расчета комплексных полосовых фильтров на базе комплексных звеньев, выполненных с использованием переключаемых конденсаторов. В качестве примера разработаны две принципиальные схемы комплексного полосового фильтра с НЧ-прототипом Баттерворта третьего порядка. Первая схема создана на базе операционных усилителей и RC -элементов, вторая — на основе операционных усилителей, конденсаторов и ключей. Схемотехническое моделирование комплексных фильтров проведено в среде Micro-Cap. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) комплексного фильтра рассчитаны как для первой, так и для второй схем. Во втором случае удалось снять АЧХ только на отдельных частотах, АЧХ обоих фильтров практически совпали. Во временной области промоделировано преобразование импульсного сигнала. Выходные сигналы обоих фильтров совпали. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного метода расчета комплексных фильтров на переключаемых конденсаторах.

Ключевые слова: комплексный полосовой фильтр, комплексное звено, переключаемый конденсатор, инвертирующий интегратор.

Для цитирования: Гребенко Ю.А., Аунг Ко Мин. Комплексный полосовой фильтр на базе инвертирующих интеграторов, реализуемых на переключаемых конденсаторах // Вестник МЭИ. 2020. № 3. С. 111—117. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-111-117.

Complex Band-pass Filter Based on Inverting Integrator, Implemented on Switchable Capacitors

Yu.A. Grebenko, Aung Ko Min

A new scheme of a complex section with the use of inverting integrators implemented on two operational amplifiers, capacitors and switches is described. A procedure for calculating complex band-pass filters based on complex sections implemented using switched capacitors is considered. As an example, two basic schemes of a complex band-pass filter with a low-frequency Butterworth prototype of the 3rd order are developed. The first scheme is implemented on the basis of operational amplifiers and RC elements, and the second scheme contains operational amplifiers, capacitors and switches. The circuit solutions of the complex filters were simulated in the Micro-Cap software environment. Amplitude-frequency responses (AFRs) of complex filter were calculated for both the first and the second schemes. The frequency responses of both filters were found to be almost identical with each other. Conversion of an impulse signal was simulated in the time domain. Both filters produced the same output signals. The simulation results have confirmed the efficiency of the proposed method for calculating complex filters on switched capacitors.

Key words: complex band-pass filter, complex section, switched capacitor, inverting integrator.

For citation: Grebenko Yu.A., Aung Ko Min. Complex Band-pass Filter Based on Inverting Integrator, Implemented on Switchable Capacitors. Bulletin of MPEI. 2020;3:111—117. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-3-111-117.

Введение

Фильтры на переключаемых конденсаторах известны несколько десятилетий. Интерес к их разработке не ослабевает, ежегодно появляются актуальные научные работы [1 — 7].

Комплексные фильтры на переключаемых конденсаторах стали исследоваться сравнительно недавно [8, 9]. При этом рассматривались различные варианты схем комплексных задержек, и расчет проходил в Z -области. Известен и другой подход к расчету фильтров на переключаемых конденсаторах, использующий преобразование аналоговых схем в схемы на переключаемых конденсаторах [10]. Он применен в настоящей статье для расчета комплексных полосовых фильтров на переключаемых конденсаторах.

Метод расчета полосовых комплексных аналоговых фильтров на базе инвертирующих интеграторов описан в [3] и состоит из этапов:

- создания схемы фильтра нижних частот (ФНЧ) на инвертирующих интеграторах с полосой пропускания, равной половине полосы пропускания полосового фильтра;
- преобразования схемы ФНЧ на инвертирующих интеграторах в схему комплексного полосового фильтра на комплексных звеньях в соответствии с описанной в [3] методикой.

Проиллюстрируем данную последовательность действий примером.

Пример

Для расчета следует выбрать НЧ-прототип фильтра и задать параметры комплексного фильтра. Допустим, взят НЧ-прототип Баттерворта третьего порядка:

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

Зададим параметры комплексного полосового фильтра. Пусть коэффициент передачи на центральной частоте $T_0 = 1$, центральная частота $\omega_0 = 4000$ рад/с, полоса пропускания $\Delta\omega = 2000$ рад/с.

Проведем расчет в соответствии с предложенной методикой. Найдем параметры ФНЧ. Коэффициент передачи на нулевой частоте выберем равным значению $T_0 = 1$. Граничная частота полосы пропускания ФНЧ составляет половину полосы пропускания комплексного полосового фильтра, т. е. $\omega_n = 1000$ рад/с. Получим передаточную функцию аналогового ФНЧ, используя замену переменных в передаточной функции НЧ-прототипа:

$$T(p) = \frac{1}{\left[\left(\frac{p}{\omega_n} \right)^2 + \frac{p}{\omega_n} + 1 \right]} \frac{1}{\left[\frac{p}{\omega_n} + 1 \right]}. \quad (1)$$

Передаточная функция инвертирующего интегратора имеет вид:

$$K(p) = -\frac{1}{pT}.$$

Найдем функцию $p = -1/pT$ и подставим в (1). Выберем $T = 1/\omega_n$ и после преобразований получим:

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

Поставим данную передаточную функцию в структурную схему, показанную на рис. 1.

Принципиальная схема инвертирующего интегратора изображена на рис. 2.

С учетом того, что $\omega_n = 1000$ рад/с и $R_1 = 100$ кОм:

$$C = T/R = 10 \text{ нФ}.$$

Модель ФНЧ, составленная в соответствии со структурной схемой рис. 1, дана на рис. 3.

Путем схемотехнического моделирования в среде Micro-Cap получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ФНЧ, приведенная на рис. 4. Она соответствует исходным параметрам ФНЧ.

В соответствии с методикой [3] преобразуем структурную схему аналогового ФНЧ (см. рис. 1) в структурную схему аналогового комплексного фильтра на базе комплексных звеньев (рис. 5).

Передаточная функция комплексного звена может быть определена путем смещения частотной характеристики инвертирующего интегратора и вместе со смещенной на величину ω_0 вправо частотной характеристикой имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{K(p)}{1 + jA\left(-\frac{1}{pT}\right)} &= -\frac{1}{(p - j\omega_0)T} = -\frac{1}{pT - j\omega_0 T} = \\ &= \frac{\left(-\frac{1}{pT}\right)}{1 + jA\left(-\frac{1}{pT}\right)} = \frac{K(p)}{1 + jAK(p)}, \end{aligned}$$

где $A = \omega_0 T = \omega_0/\omega_n$.

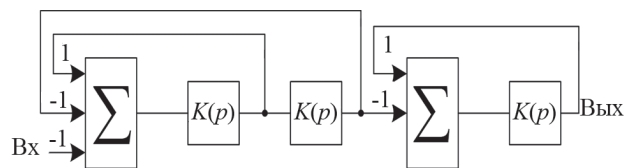


Рис. 1. Структурная схема ФНЧ на базе идентичных звеньев

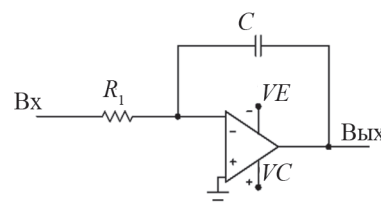


Рис. 2. Принципиальная схема инвертирующего интегратора

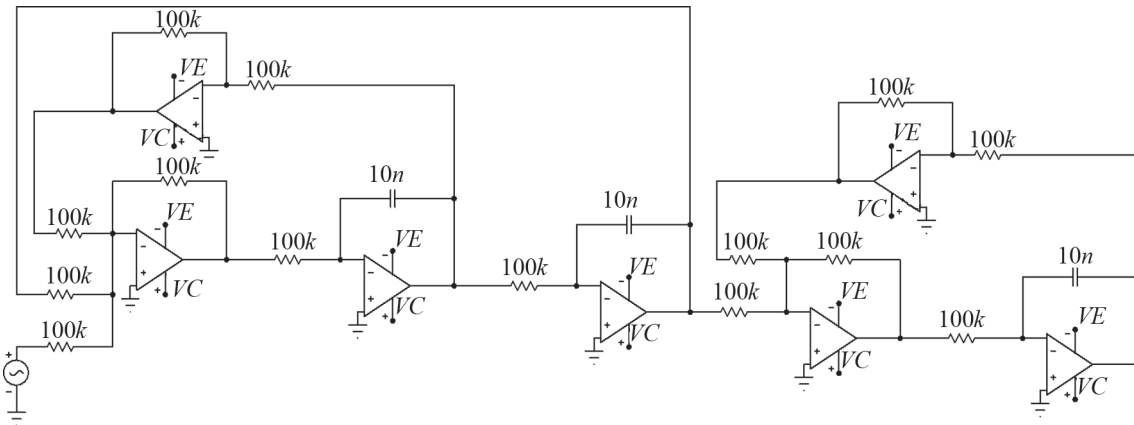


Рис. 3. Принципиальная схема ФНЧ на базе инвертирующих интеграторов

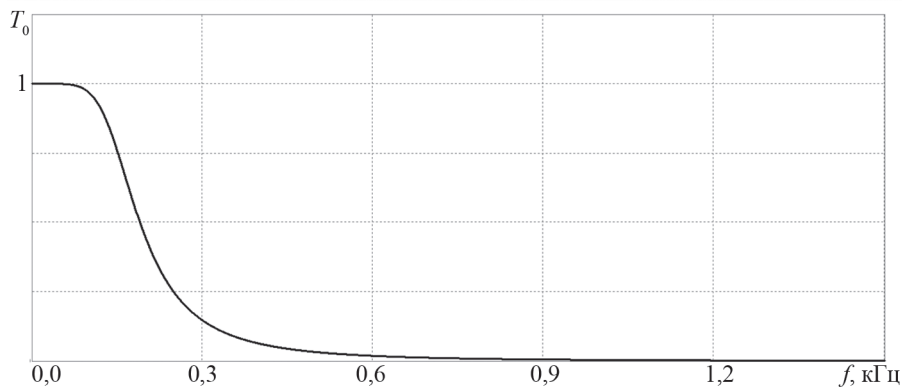


Рис. 4. АЧХ ФНЧ

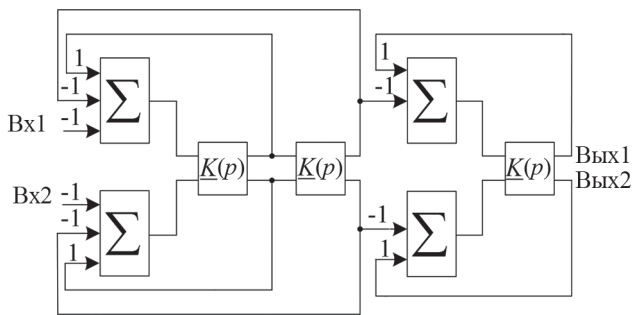


Рис. 5. Структурная схема полосового комплексного фильтра на базе идентичных комплексных звеньев

Данной передаточной функции можно поставить в соответствие структурную схему комплексного звена, изображенную на рис. 6.

Принципиальная схема, соответствующая такой структурной схеме, дана на рис. 7.

При $R_1 = 100 \text{ кОм}$ и $A = 4$ $R_2 = R_1/A = 25 \text{ кОм}$.

Модель аналогового комплексного полосового фильтра, составленная в соответствии со структурной схемой рис. 5, показана на рис. 8.

Составим принципиальную схему комплексного звена на переключаемых конденсаторах, используя замену резисторов переключаемыми конденсаторами. При этом номиналы конденсаторов, заменяющих резисторы, выбраны так, чтобы обеспечивались следующие соотношения:

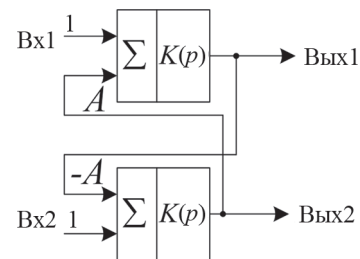


Рис. 6. Структурная схема комплексного звена на базе инвертирующих интеграторов

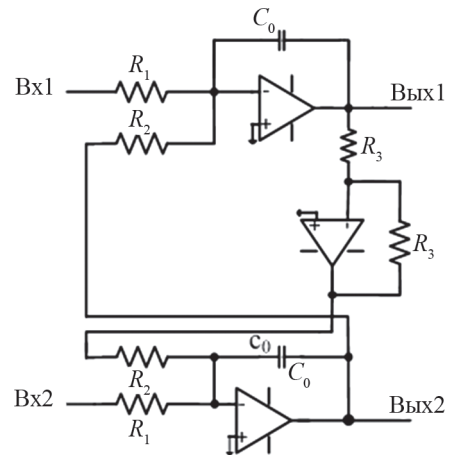


Рис. 7. Принципиальная схема комплексного звена на инвертирующих интеграторах

$$C_1 = \frac{1}{F_n R_1}; C_2 = \frac{1}{F_n R_2},$$

где F_n — частота переключения (1 МГц).

Преобразование схемы комплексного аналогового звена в схему комплексного звена на переключаемых конденсаторах отражено на рис. 9.

Сумматоры реализуем на переключаемых конденсаторах. Модель комплексного полосового фильтра с

комплексными звеньями, реализованными на переключаемых конденсаторах, показана на рис. 10.

АЧХ комплексного полосового фильтра на переключаемых конденсаторах можно снять по точкам. В результате моделирования получены точки АЧХ, практически совпадающие с АЧХ аналогового комплексного полосового фильтра на базе инвертирующих интеграторов (рис. 11).

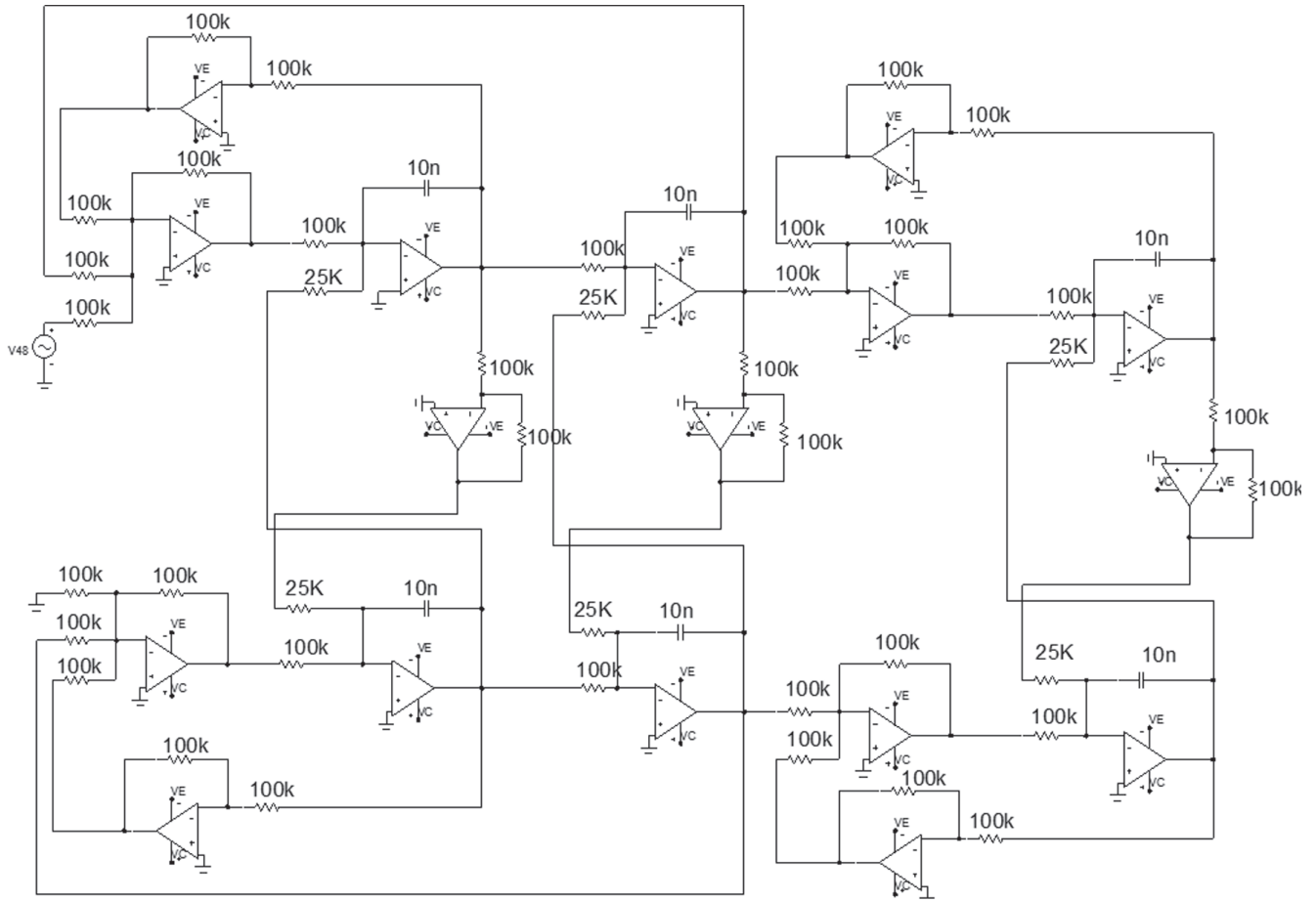


Рис. 8. Модель аналогового полосового комплексного фильтра

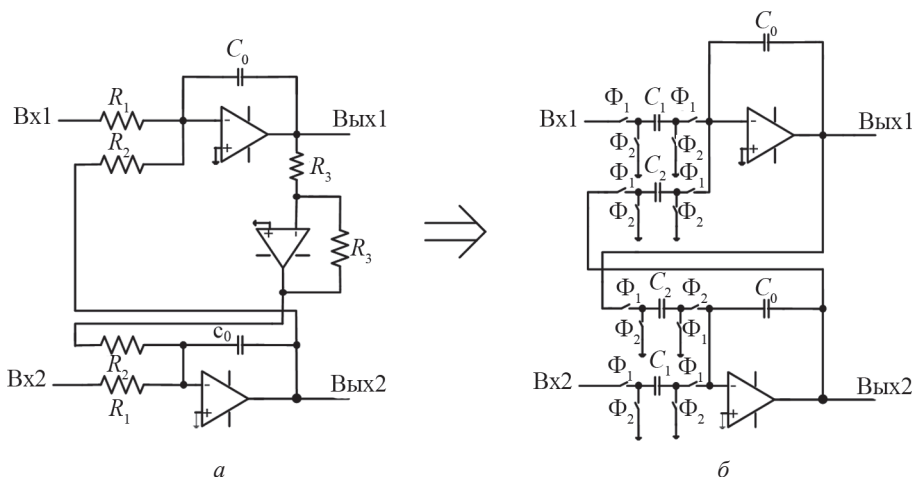


Рис. 9. Аналоговое комплексное звено (а) и комплексное звено на переключаемых конденсаторах (б)

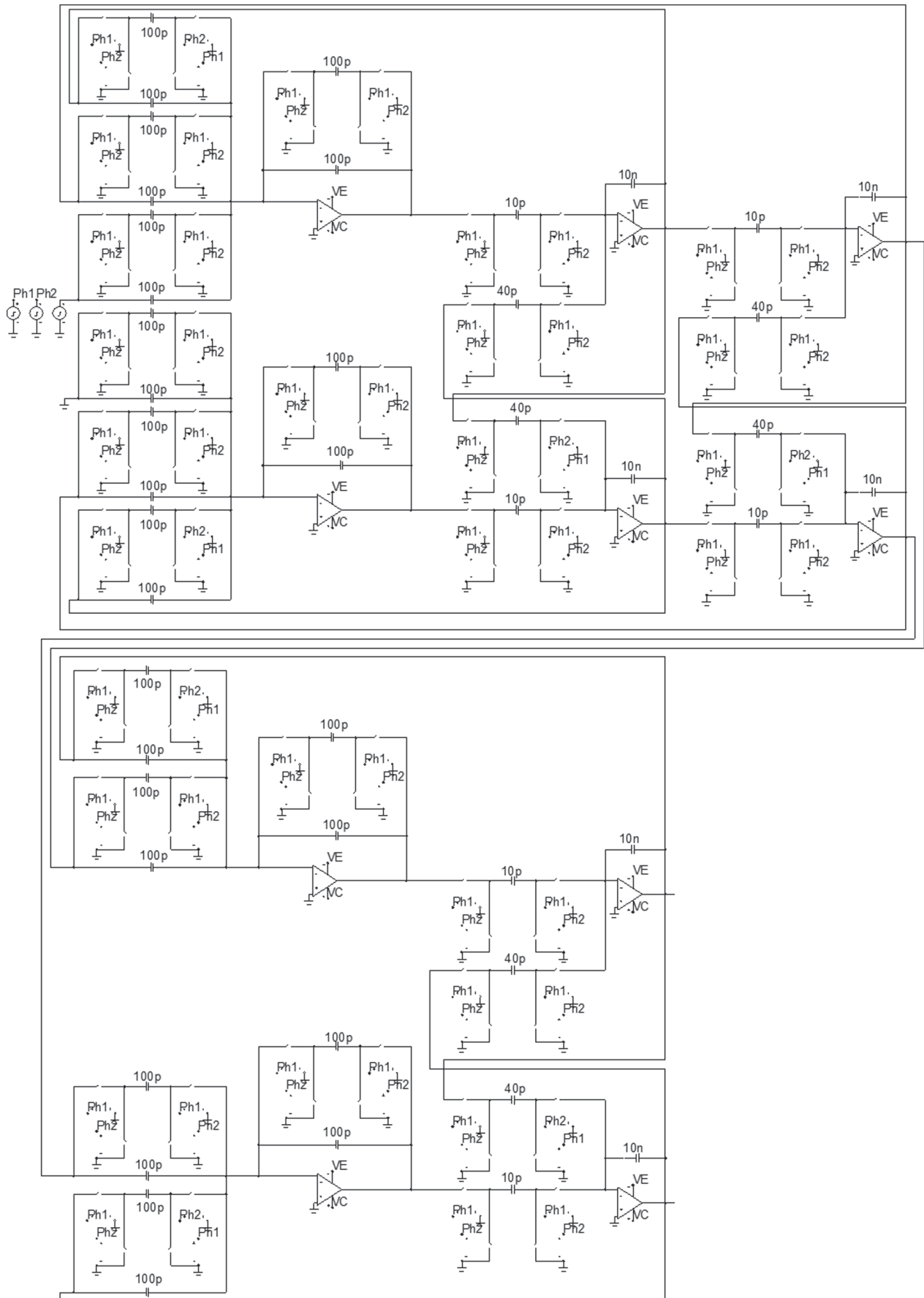


Рис. 10. Модель комплексного полосового фильтра на переключаемых конденсаторах

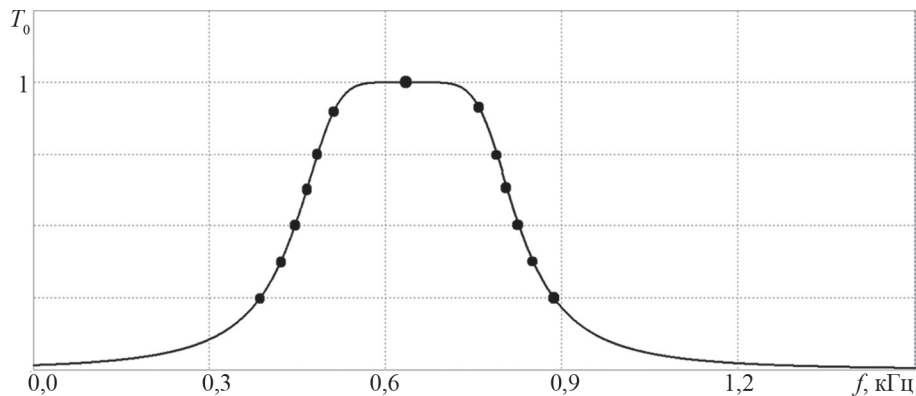


Рис. 11. АЧХ аналогового комплексного полосового фильтра и отсчеты АЧХ комплексного фильтра на переключаемых конденсаторах

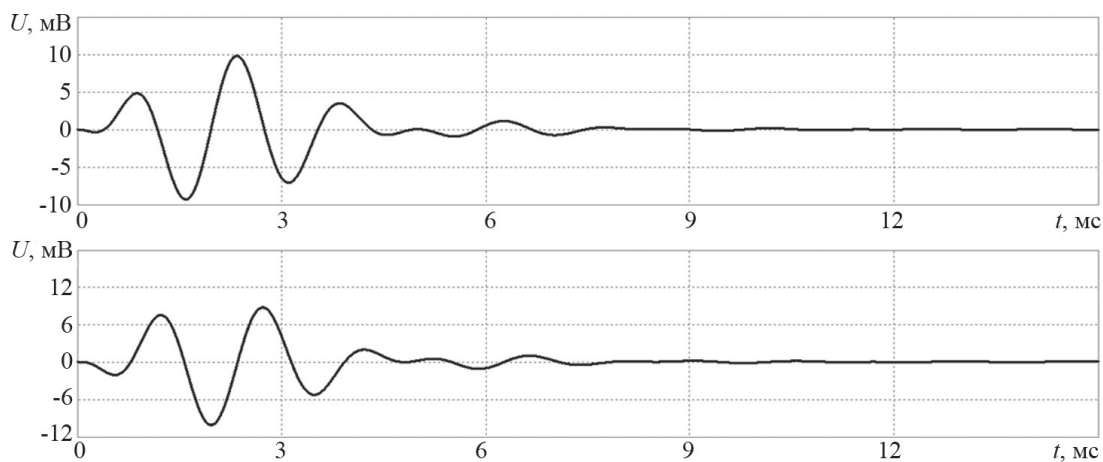


Рис. 12. Составляющие комплексного сигнала на выходах аналогового комплексного полосового фильтра

В результате моделирования во временной области выявлены составляющие выходного сигнала комплексного аналогового фильтра на инвертирующих интеграторах при подаче на один из входов импульса длительностью 5 мкс (рис. 12). Это позволяет говорить о совпадении временных и частотных характеристик моделей комплексных фильтров, показанных на рис. 8, 10.

Заключение

Предложена новая схема комплексного звена на переключаемых конденсаторах, полученная путем пре-

образования схемы аналогового комплексного звена на инвертирующих интеграторах.

Показано, как на ее основе можно разрабатывать комплексные полосовые фильтры высокого порядка. Пример расчета и приведенные результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенного подхода.

Модуль инвертирующего интегратора на переключаемых конденсаторах входит в библиотеку модулей программируемых аналоговых интегральных схем фирмы Anadigm, что позволит реализовывать комплексные фильтры на переключаемых конденсаторах в виде интегральных схем.

Литература

1. 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.
2. 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.

References

1. Kushnerov A.D., Shmuel' B.Ya. Universal'nyy Algebraicheskiy Sintez Preobrazovateley na Pereklyuchayemykh Kondensatorakh, Osnovanny na Obobshchennykh Chislakh Fibonachchi. Omskiy Nauchny Vestnik. 2016; 5 (149):165—169. (in Russian).
2. Ivanov V.E., Antonov R.A. Diskretno-analogovyy Veyvlet-fil'tr: Problemy i Sposoby Realizatsii. Informatsionnye Tekhnologii XXI Veka. Khabarovsk: Izd-vo Tikhookeanskogo Gos. Un-ta, 2014:24—31. (in Russian).

3. **Гребенко Ю.А., Чжо Зей Я.** Комплексные активные RC-фильтры на идентичных звеньях // Радиотехника. 2008. № 2. С. 61—64.

4. **Гребенко Ю.А.** Системотехническое проектирование аналоговых устройств обработки сигналов. М.: Радио и связь, 1992.

5. **Jianhui Wu, Zushuai Xie, Tianji Yu, Chao Chen.** A Wide Tuning Range Gm-C Complex Filter with Master-slave Automatic Frequency Tuning Based Switched-capacitor // J. Microelectronics. 2018. V. 81. Pp. 200—207.

6. **Petraglia A., Barúqui F.A.P., Pereira J.S.** Switched-capacitor Decimation Filter Design Using Time-multiplexing and Polyphase Decomposition of Transfer Functions with Low Denominator Orders // J. Microelectronics. 2009. V. 40. Pp. 1673—1680.

7. **Libin G., Torsten L., Hamilton T.Ju.** A Reconfigurable Dual-output Buck-boost Switched-capacitor Converter Using Adaptive Gain and Discrete Frequency Scaling Control // J. Microelectronics. 2018. V. 73. Pp. 59—74.

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

9. **Гребенко Ю.А., Аунг К.М.** Комплексные полосовые фильтры на базе комплексных задержек, реализуемых на переключаемых конденсаторах и двух операционных усилителях // Вестник МЭИ. 2018. № 6. С. 147—152.

10. **Торопчин Д.С., Богатырев Е.А., Филатов В.А.** Основы теории и схемотехники SC-устройств на базе программируемых интегральных схем. М.: Изд-во МЭИ, 2018.

3. **Grebenko Yu.A., Chzho Zey Ya.** Kompleksnyye Aktivnyye RC-fil'try na Identichnykh Zven'yakh. Radio-tekhnika. 2008;2:61—64. (in Russian).

4. **Grebenko Yu.A.** Sistemotekhnicheskoe Proektirovanie Analogovykh Ustroystv Obrabotki Signalov. M.: Radio i Svyaz', 1992. (in Russian).

5. **Jianhui Wu, Zushuai Xie, Tianji Yu, Chao Chen.** A Wide Tuning Range Gm-C Complex Filter with Master-slave Automatic Frequency Tuning Based Switched-capacitor. J. Microelectronics. 2018;81:200—207.

6. **Petraglia A., Barúqui F.A.P., Pereira J.S.** Switched-capacitor Decimation Filter Design Using Time-multiplexing and Polyphase Decomposition of Transfer Functions with Low Denominator Orders. J. Microelectronics. 2009;40:1673—1680.

7. **Libin G., Torsten L., Hamilton T.Ju.** A Reconfigurable Dual-output Buck-boost Switched-capacitor Converter Using Adaptive Gain and Discrete Frequency Scaling Control. J. Microelectronics. 2018;73:59—74.

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

9. **Grebenko Yu.A., Aung K.M.** Kompleksnyye Polosovyye Fil'try na Baze Kompleksnykh Zaderzhek, Realizuemyykh na Pereklyuchaemykh Kondensatorakh i Dvukh Operatsionnykh Usilitelyakh. Vestnik MEI. 2018;6:147—152. (in Russian).

10. **Toropchin D.S., Bogatyrev E.A., Filatov V.A.** Osnovy Teorii i Skhemotekhniki SC-ustroystv na Baze Programmiruemykh Integral'nykh Skhem. M.: Izd-vo MEI, 2018. (in Russian).

Сведения об авторах:

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

Аунг Ко Мин — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: akmin53@gmail.com

Information about authors:

Grebenko Yuriy A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor 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, e-mail: akmin53@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 07.06.2019

The article received to the editor: 07.06.2019