

Д.И. Бакшун, С.П. Тарасов, И.И. Турулин

**МЕТОДИКА РЕАЛИЗАЦИИ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ УПРАВЛЯЕМОГО РЕКУРСИВНОГО ФИЛЬТРА
С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НА ПРИМЕРЕ
АППРОКСИМАЦИИ ОКНА ХАННА**

Рассмотрена методика реализации рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в виде окна Ханна с возможностью управления длительностью (в отсчетах или тактах) КИХ, в том числе в процессе фильтрации, на основе одновременной последовательной компенсации отсчетов из рекурсивной части. Выполнен краткий обзор существующего решения для управления длительностью прямоугольной импульсной характеристики и предложены способы реализации импульсных характеристик более сложной формы на примере окна Ханна. Предложенный авторами метод позволяет добиться устойчивости фильтра при изменении длительности импульсной характеристики во времени. Разработана структура модуля для реализации фильтра на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Рассмотренная в статье, структура рекурсивного фильтра имеет существенно меньшую вычислительную сложность по сравнению с классической структурой КИХ-фильтра, и применять её можно во встраиваемых системах с ограниченными вычислительными ресурсами. Меньшая вычислительная сложность достигается за счет применения в качестве КИХ функцию, аппроксимирующую окно Ханна, которая представляет собой полином третьей степени. Фильтрация выполняется за счет двух независимых фильтров, один из которых настроен на длительность КИХ до ее изменения, а другой – после с последующим суммированием результата. Такой подход базируется на принципе линейности системы, который позволяет комбинировать выходные сигналы фильтров без потери их свойств. Управление длительностью задержки выполняется на основе возможности двухпортовой RAM-памяти одновременно производить запись и чтение. При изменении длительности КИХ вычисление коэффициентов фильтра выполняется во время фильтрации, за счет чего устраняются обрывы между участками выходного сигнала до и после изменения длительности КИХ. Предусмотрена защита от ввода нового параметра длительности КИХ до завершения компенсации переходного процесса вследствие предыдущего изменения длительности КИХ. После завершения процедуры компенсации фильтр, настроенный на длительность КИХ до ее изменения, прекращает свою работу.

Рекурсивный; ПЛИС; КИХ-фильтр; окно Ханна; конечная импульсная характеристика; КИХ; устойчивость; управляемый; компенсация.

D.I. Bakshun, S.P. Tarasov, I.I. Turulin

**METHODOLOGY OF REALIZATION ON PLIS OF A CONTROLLED RECURSIVE
FILTER WITH A FINITE IMPULSE RESPONSE IN THE FORM
OF AN APPROXIMATION OF THE HANN WINDOW**

The paper considers the methodology of realization of recursive filter with finite impulse response (FIR) in the form of Hahn window with the possibility of controlling the duration (in counts or cycles) of FIR, including in the process of filtering, based on simultaneous sequential compensation of samples from the recursive part. A brief review of the existing solution for controlling the duration of a rectangular pulse characteristic is performed and the methods of realization of impulse response of more complex shape on the example of a Hahn window are proposed. The method proposed by the authors allows to achieve stability of the filter when the duration of the impulse characteristic changes in time. The structure of the module for realization of the filter on the basis of Field-Programmable Gate Array (FPGA) is developed. The recursive filter structure considered in this paper has significantly lower computational complexity compared to the classical FIR filter structure, and it can be used in embedded systems with limited computational resources. The lower computational complexity is achieved by using the function approximating the Hahn window, which is a third-degree polynomial, as the FIR. Filtering is accomplished by using two independent filters, one tuned to the duration of the FIR before its change and the other tuned to the duration of the FIR afterwards with the result summarized. This approach is based on the principle of linearity of the system, which allows combining the output signals of the filters without losing their properties. The control of the delay duration is performed based on the ability of the dual-ported RAM memory to simultaneously write and read. When changing the FIR duration, the calculation

of filter coefficients is performed during filtering, thus eliminating interruptions between the output signal sections before and after changing the FIR duration. There is a protection against entering a new parameter of the FIR duration before the transient compensation due to the previous change of the FIR duration is completed. After the compensation procedure is completed, the filter tuned to the FIR duration before it was changed is terminated.

Recursive; FPGA; FIR-filter; Hahn window; finite impulse response; FIR; stability; controlled; compensation.

Введение. Фильтрация сигналов является одной из самых востребованных задач в области цифровой обработки сигналов, где решения проблем снижения вычислительной сложности и повышению быстродействия являются актуальными.

Для минимизации затрат на выполнение базовых математических операций, таких как сложение и умножение, широко применяются рекурсивные фильтры. Эти фильтры отличаются низким порядком при сохранении требуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и обычно обладают бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) [1–4]. Однако существуют и рекурсивные фильтры с конечной импульсной характеристикой (РКИХ) [5–7], которые используют целочисленные коэффициенты или коэффициенты с фиксированной точкой. РКИХ-фильтры, в отличие от рекурсивных БИХ-фильтров, в случае симметрии импульсной характеристики (ИХ) имеют строго линейную фазочастотную характеристику (ФЧХ).

В статье предлагается методика проектирования РКИХ-фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в виде степенной аппроксимации окна Ханна с возможностью регулировки частоты среза АЧХ фильтра в реальном времени за счет изменения длительности импульсной характеристики (ИХ). Такие фильтры могут применяться в областях техники, где требуемые параметры фильтрации непостоянны, например, в технологии цифрового радиоприёма (SDR – Software-defined radio).

Обзор существующих решений. В [8] предложен подход к описанию цифровых БИХ-фильтров через пространство состояний, основанный на частотных преобразованиях АЧХ. В [9] предложен метод проектирования настраиваемого режекторного БИХ-фильтра с низкой вычислительной сложностью. Метод основан на каскадном соединении фильтра нижних частот и режекторного фильтра. Также существует методика реализации управляемого фильтра с аналогичной формой АЧХ при линейной ФЧХ, в [10] где обеспечение перестройки в процессе работы основано на компенсации суммы в интеграторе, накопленной до изменения длительности ИХ, за счет дополнительной рекурсивной цепи. В статье предложена методика реализации управляемого РКИХ-фильтра с использованием двухпортовой RAM-памяти, которая применима и для других типов ИХ. Однако при использовании данной методики возникает проблема сохранения устойчивости при введении алгоритма управления для фильтра с ИХ в виде окна Ханна [11–16] из-за зависимости значений коэффициентов фильтра от длительности ИХ, в то время как для прямоугольной ИХ коэффициенты постоянны и равны единице. Сложность заключается в том, что сумма, накопленная в интеграторах, получена путем математических операций с задержанными отсчетами входного сигнала и значениями коэффициентов до изменения длительности ИХ, а компенсация – после. В таком случае, сумма, накопленная в интеграторах, не может компенсироваться, что приведет к потере устойчивости РКИХ-фильтра (после прекращения входного воздействия фильтр не вернется в исходное состояние). Для сохранения устойчивости после изменения длительности ИХ необходимо использовать в нерекурсивной компенсирующей части значения коэффициентов до изменения длительности. Также возможна ситуация, когда длительность (здесь и далее имеется в виду длительность в отсчетах или тактах) ИХ изменится до того, как скомпенсируется сумма в интеграторе после предыдущего изменения. Эти проблемы решаются параллельным включением двух РКИХ-фильтров, коэффициенты нерекурсивной части которых вычисляются для нового и предыдущего значения длительности ИХ.

Математическая модель. В работах [11–16] был рассмотрен РКИХ-фильтр с ИХ в виде окна Ханна без возможности регулировки частоты среза АЧХ, алгоритм нерекурсивной части которого (для нечетного значения длительности ИХ) можно описать как:

$$y_i = (L - 1)(x_i + x_{i-2L-1}) - (L + 1)(x_{i-1} + x_{i-2L}) + 2(x_{i-L} + x_{i-L-1}), \quad \#(1)$$

где x_{i-1} – входной дискретный сигнал; y_i – выходной дискретный сигнал; L – длительностью ИХ.

Данные коэффициенты формируются нахождении конечной разности [17] четвертого порядка от аппроксимирующего полинома окна Ханна третьей степени.

Для простоты здесь и далее будем рассматривать только нерекурсивную часть фильтров, так как именно в ней присутствуют коэффициенты, которые зависят от параметра L . Для такой структуры фильтра характерно постоянное число блоков задержки в нерекурсивной части, которое зависит от L . Управление длительностью ИХ подразумевает, что L зависит от дискретного времени.

Для описания алгоритма работы структуры нерекурсивной части управляемого фильтра введем несколько дополнительных сигналов: $sw_i, L0_i, L1_i, c_i$.

Сигнал переключения демультимплексора. Сигнал может принимать значение ноль или единица и переключать вход демультимплексора на соответствующий выход.

$$sw_i = \begin{cases} \overline{sw_{i-1}}, & \text{при } (L0_{i-1} \neq L1_{i-1}) \wedge (c_{i-1} < stop) \\ sw_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases}. \quad \#(2)$$

Буфер задержки $b0_{i,j}$ первого канала фильтра и $b1_{i,j}$ второго канала. При изменении сигнала sw_i идет переключение входа демультимплексора на канал фильтра, для которого все значения ячеек памяти в буфере задержки равны ноль. При этом на вход другого блока задержки поступает ноль, тем самым перезаписывая отсчеты через интервал времени после того, как они считываются из памяти. Буфер задержки становится свободным (все ячейки памяти имеют значение 0), когда после изменения сигнала sw_i прошло количество тактов, равное значению параметра $stop$.

$$b0_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i \neq 0) \\ x_{i-1}, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i = 0) \\ b0_{i-1,j-1}, & \text{при } (j > 0) \end{cases} \quad \#(3)$$

$$b1_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i = 0) \\ x_{i-1}, & \text{при } (j = 0) \wedge (sw_i \neq 0) \\ b1_{i-1,j-1}, & \text{при } (j > 0) \end{cases} \quad \#(4)$$

Задержки значения сигнала L_i . Пока предыдущие отсчеты сигнала x_i в линиях задержки фильтра не скомпенсированы, $L0_i$ и $L1_i$ не меняют своего предыдущего значения.

$$L0_i = \begin{cases} L_i, & \text{при } (L0_{i-1} = L1_{i-1}) \vee (c_{i-1} = stop) \\ L0_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(5)$$

$$L1_i = \begin{cases} L0_{i-1}, & \text{при } (L0_{i-1} = L1_{i-1}) \vee (c_{i-1} = stop) \\ L1_{i-1}, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(6)$$

$$L2_i = \begin{cases} L0_i, & sw_i = 0 \\ L1_i, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(7)$$

$$L3_i = \begin{cases} L0_i, & sw_i \neq 0 \\ L1_i, & \text{иначе} \end{cases} \quad \#(8)$$

Счетчик компенсации. При изменении параметра L_i запускается счетчик, который считает до значения $stop$.

$$c_i = \begin{cases} c_{i-1} + 1, & \text{при } (L0_{i-1} \neq L1_{i-1}) \wedge (c_{i-1} < stop) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}. \quad \#(9)$$

С учетом введенных сигналов алгоритм работы нерекурсивной части фильтра:

$$y_i = (L0_i - 1)x_i - (L0_{i-1} + 1)x_{i-1} + 2(b0_{i,L2i-2} + b0_{i,L2i-1}) - \quad \#(10)$$

$$- (L2_i + 1)b0_{i,2 \cdot L2i-3} + (L2_i - 1)b0_{i,2 \cdot L2i-2} + 2(b1_{i,L3i-2} + b1_{i,L3i-1}) -$$

$$- (L3_i + 1)b1_{i,2 \cdot L3i-3} + (L3_i - 1)b1_{i,2 \cdot L3i-2}.$$

Практическая реализация. Вид структуры управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна представлен на рис. 1. Принцип работы структуры заключается в параллельной фильтрации отсчетов, которые еще не скомпенсированы, и новых входных отсчетов, к которым применяется новое значение параметра L .

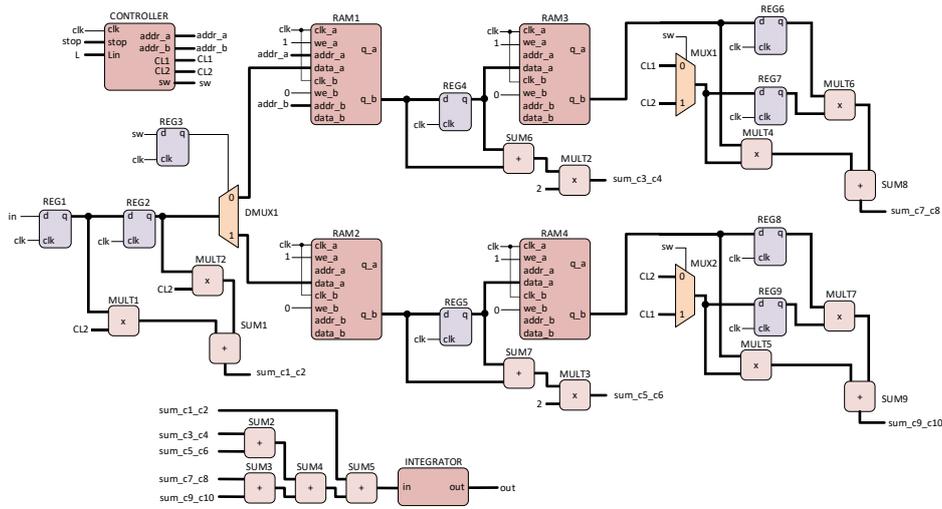


Рис. 1. Структура управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна

В MULT1 и MULT2 выполняется перемножение выходных сигналов регистров REG1 и REG2 на первые два коэффициента нерекурсивной части. Демультимплексор DMUX1 переключает сигнал, задержанный на 1 такт (сигнал с выхода REG2), на запись в RAM в которой значения во всех ячейках памяти равны нулю. Второй выход DMUX1 подтянут к нулю. В рамках представленной схемы, компоненты RAM1, RAM3 и RAM2, RAM4 представляют собой две параллельные управляемые задержки, которые можно описать с помощью (3) и (4) соответственно. Принципы работы с блоками RAM-памяти в ПЛИС достаточно подробно описана в [18]. Внутреннее строение блока INTEGRATOR представляет собой каскадное подключение четырех цифровых интеграторов [19]. Принципы работы логических элементов, представленных на рис. 1, достаточно подробно описана в [20–22].

Результат моделирования работы фильтра, полученный с помощью инструмента waveform в программе Quartus Prime. Для наглядности, в качестве входного сигнала использовались единичные значения в начале входной последовательности при $L = 8$ и в момент изменения параметра L на 6.

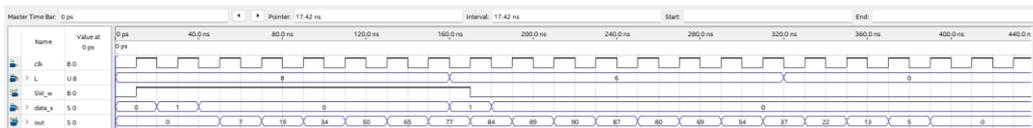


Рис. 2. Результат моделирования структуры управляемого РКИХ-фильтра с ИХ в виде окна Ханна в программе Quartus Prime

По результатам моделирования построен график, изображенный на рис. 3.

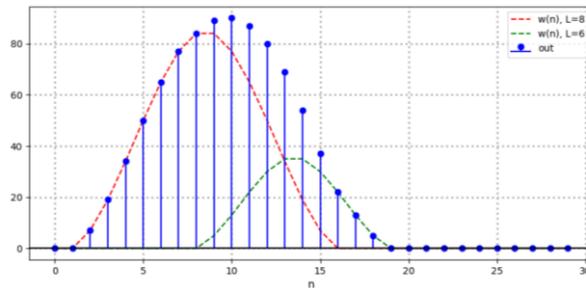


Рис. 3. График сравнения результата моделирования структуры управляемого РКИХ-фильтра и ИХ неуправляемых РКИХ в виде окна Ханна

Красным и зеленым цветом отображаются ИХ РКИХ-фильтров с ИХ в виде окна Ханна при значениях L равным 8 и 6 соответственно. Синим цветом обозначен результат работы исследуемого управляемого РКИХ-фильтра. Можно сделать вывод, что сигнал на выходе фильтра при изменении параметра L является суммой результата работы фильтра до изменения L и после изменения. За счет разработанной структуры фильтр является устойчивым при изменении параметра L , что видно из полученных результатов.

Заключение. Разработана структура, предназначенная для реализации фильтрации отсчетов до изменения длительности ИХ и после в виде двух отдельных фильтров, что позволяет компенсировать отсчёты в интеграторе при изменении параметра длительности ИХ. Данная структура, выполняющая фильтрацию в двух отдельных фильтрах с последующим суммирование результата основана на принципе линейности системы.

Одним из ключевых преимуществ предложенной структуры является применения блоков двухпортовой RAM-памяти вместо регистров и мультиплексоров для формирования линий управляемой задержки, которая не расходует логические элементы.

Для проверки работоспособности и оценки эффективности предложенной структуры был проведен ряд экспериментов с использованием инструмента waveform в программе Quartus Prime, получены результат симуляции работы управляемого РКИХ-фильтра.

Предложенная в статье методика может быть применена для разработки управляемых РКИХ-фильтров с различными типами импульсных характеристик. В частности, она подходит для реализации фильтров с ИХ в виде окна Ханна, квазикосинусной или прямоугольной функции. Это делает методику применимой в различных приложениях цифровой обработки сигналов, таких как телекоммуникации, аудио- и видеообработка, а также в системах управления и автоматизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе изд.: пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
3. Богнер Р., Константинович А. Введение в цифровую фильтрацию: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 216 с.
4. Lau B.K. Sreeram V. Design of low order approximately linear phase IIR filters // IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing.
5. Maximo A. Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems // Journal of Real-Time Image Processing: collected papers. – 2015. – Vol. 12. – P. 603-611.
6. Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L. Cantoni A. Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients // IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers. – Seattle, 1998. – P. 1269-1272.
7. Hassan F., Khorbotly S. Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters // 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers. – Beirut, 2011. – P. 559-562.

8. *Koshita S., Abe M., Kawamata M.* Variable state-space digital filters using series approximations // *Digital Signal Processing*. – 2017. – Vol. 60. – P. 338-349.
9. *Phuoc N.S.* Variable IIR Digital Band-Pass and Band-Stop Filters // 2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC). – IEEE, 2018. – P. 132-137.
10. *Бакишун Д.И.* Методика аппаратной реализации управляемого рекурсивного КИХ-фильтра с прямоугольной импульсной характеристикой на ПЛИС // XXI Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов: Сб. трудов. – Таганрог, 2023. – С. 21-25.
11. *Бакишун Д.И., Турулин И.И.* Методика построения структуры рекурсивного фильтра с конечной импульсной характеристикой в виде функции, аппроксимирующей окно Ханна // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-70.
12. *Турулин И.И.* Расчет и применение быстродействующих цифровых рекурсивных фильтров с конечной импульсной характеристикой: монография / под общей ред. Л.К. Самойлова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 88 с.
13. *Турулин И.И.* Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 264 с.
14. *Олейникова Т.В.* Исследование алгоритмов рекурсивных фильтров с конечными импульсными характеристиками для весовой обработки сигналов: дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 1999.
15. *Олейникова Т.В.* Применение быстрой циклической свертки в корреляционном измерителе временных интервалов // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Новые информационные технологии. Информационное, программное и аппаратное обеспечение». – Таганрог, 1995. – С. 178-179. 38.
16. *Олейникова Т.В., Турулин И.И.* Весовая обработка близко расположенных сигнала и помехи окнами с характеристиками типа окна Хэмминга // Тез. докл. всерос. науч. конф. «Радиоэлектроника, микроэлектроника, системы связи и управления». – Таганрог, 1997. – С. 232-233.
17. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1975.
18. *Соловьев В.В.* Логическое проектирование встраиваемых систем на FPGA. – СПб.: ООО «Медиа Групп Файнстрит», 2021. – 222 с.
19. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms // *Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs*. – 2004. – Vol. 28/5-6. – P. 197-211.
20. *Томас Д.* Логическое проектирование и верификация систем на System Verilog: пер. с англ. А.А. Слинкина, А.С. Камкина, М.М. Чупилко. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 384 с.
21. *Хаханов В.И., Хаханов И.В., Литвинова Е.И., Гузь О.А.* Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах. Verilog & System Verilog. – Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 528 с.
22. *Уэйкерли Ф.* Проектирование цифровых устройств. Т. 1. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.

REFERENCES

1. *Layons R.* Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]: Second ed.: transl. from engl. Moscow: ООО «Binom-Press», 2006, 656 p.
2. *Rabiner L., Gould B.* Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
3. *Bogner R., Konstantinidis A.* Vvedeniye v tsifrovuyu fil'tratsiyu [Introduction to digital filtering]: transl. from engl. Moscow: Mir, 1976, 216 p.
4. *Lau B.K., Sreeram V.* Design of low order approximately linear phase IIR filters, *IEEE Symposium on Advances in Digital Filtering and Signal Processing*.
5. *Maximo A.* Efficient finite impulse response filters in massively-parallel recursive systems, *Journal of Real-Time Image Processing: collected papers*, 2015, Vol. 12, pp. 603-611.
6. *Dam H.H., Nordebo S., Teo K.L., Cantoni A.* Design of linear phase FIR filters with recursive structure and discrete coefficients, *IEEE International conference on acoustics, speech, and signal processing: collected papers*. Seattle, 1998, pp. 1269-1272.
7. *Hassan F., Khorbotly S.* Recursive implementation of exponential linear phase FIR filters, *18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems: collected papers*. Beirut, 2011, pp. 559-562.
8. *Koshita S., Abe M., Kawamata M.* Variable state-space digital filters using series approximations, *Digital Signal Processing*, 2017, Vol. 60, pp. 338-349.
9. *Phuoc N.S.* Variable IIR Digital Band-Pass and Band-Stop Filters, *2018 2nd International Conference on Imaging, Signal Processing and Communication (ICISPC)*. IEEE, 2018, pp. 132-137.
10. *Bakshun D.I.* Metodika apparatnoy realizatsii upravlyаемого rekursivnogo KIKh-fil'tra s pryamougol'noy impul'snoy kharakteristikoy na PLIS [Methodology for hardware implementation of a controlled recursive FIR filter with a rectangular impulse response on an FPGA], *XXI Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchenykh, aspirantov i studentov: Sb. trudov* [XXI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students: Collected papers]. Taganrog, 2023, pp. 21-25.

11. *Bakshun D.I., Turulin I.I.* Metodika postroeniya struktury rekursivnogo fil'tra s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy v vide funktsii, approksimiruyushchey okno Khanna [A technique for constructing the structure of a recursive filter with a finite impulse response in the form of a function approximating the Hann window], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 3, pp. 64-70.
12. *Turulin I.I.* Raschet i primeneniye bystrodeystviyushchikh tsifrovyykh rekursivnykh fil'trov s konechnoy impul'snoy kharakteristikoy: monografiya [Calculation and application of high-speed digital recursive filters with finite impulse response: monograph], under the general ed. of L.K. Samoylova. Taganrog: Izd-vo TRTU, 1999, 88 p.
13. *Turulin I.I.* Osnovy teorii rekursivnykh KIKh-fil'trov: monografiya [Fundamentals of the theory of recursive FIR filters: monograph]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 264 p.
14. *Oleynikova T.V.* Issledovanie algoritmov rekursivnykh fil'trov s konechnymi impul'snymi kharakteristikami dlya vesovoy obrabotki signalov: diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of algorithms for recursive filters with finite impulse characteristics for weight signal processing: cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 1999.
15. *Oleynikova T.V.* Primeneniye bystroy tsiklicheskoy svertki v korrelyatsionnom izmeritele vremennykh intervalov [The use of fast cyclic convolution in a correlation time interval meter], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. «Novye informatsionnye tekhnologii. Informatsionnoe, programmnoe i apparatnoe obespechenie»* [Abstracts of the reports of the All-Russian scientific conference "New information technologies. Information, software and hardware"]. Taganrog, 1995, pp. 178-179. 38.
16. *Oleynikova T.V., Turulin I.I.* Vesovaya obrabotka blizko raspolozhennykh signala i pomekhi oknami s kharakteristikami tipa okna Khemmign [Weight processing of closely spaced signal and interference by windows with characteristics of the type of a Hammign window], *Tez. dokl. vseros. nauch. konf. "Radioelektronika, mikroelektronika, sistemy svyazi i upravleniya"* [Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference. "Radio electronics, microelectronics, communication and control systems"]. Taganrog, 1997, pp. 232-233.
17. *Bronshcheyn I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov [Handbook of Mathematics for engineers and university students]. Moscow: Nauka, 1975.
18. *Solov'ev V.V.* Logicheskoe proektirovaniye vstraivaemykh sistem na FPGA [Software design of an embedded system on FPGA]. Saint Petersburg: OOO «Media Gruppy Faynstrit», 2021, 222 p.
19. *Sklyarov V.* FPGA-based implementation of recursive algorithms, *Microprocessors and Microsystems. Special Issue on FPGAs: Applications and Designs*, 2004, Vol. 28/5-6, pp. 197-211.
20. *Tomas D.* Logicheskie proektirovaniye i verifikatsiya sistem na System Verilog [Logical design and verification of the Verilog system]: transl. from engl. A.A. Slinkina, A.S. Kamkina, M.M. Chupilko. Moscow: DMK Press, 2019, 384 p.
21. *Khakhanov V.I., Khakhanov I.V., Litvinova E.I., Guz' O.A.* Proektirovaniye i verifikatsiya tsifrovyykh sistem na kristallakh. Verilog & System Verilog [Design and verification of digital systems on crystals. Verilog and the Verilog system]. Khar'kov: KhNURE, 2010, 528 p.
22. *Ueykerli F.* Proektirovaniye tsifrovyykh ustroystv [Design of digital devices]. Vol. 1. Moscow: Postmarket, 2002, 544 p.

Бакшун Дмитрий Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: bakshun@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185988588; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант; ассистент.

Тарасов Сергей Павлович – Южный федеральный университет; e-mail: tsp-47@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +79034007904; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Турулин Игорь Ильич – Южный федеральный университет; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79618170609; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Bakshun Dmitry Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: bakshun@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79185988588; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; postgraduate student; assistant.

Tarasov Sergey Pavlovich – Southern Federal University; e-mail: tsp-47@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +79034007904; the Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology Grand; dr. in eng. sc.; professor.

Turulin Igor Ilyich – Southern Federal University; e-mail: iiturulin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79618170609; the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering; dr. in eng. sc.; professor.