

Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер, И.И. Турулин

МЕТОДИКА УМЕНЬШЕНИЯ ВЫБРОСА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ЦИФРОВОМ ФИЛЬТРЕ НИЖНИХ ЧАСТОТ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ СРЕЗА

Цифровая обработка сигналов широко применяется в современной технике, в том числе в робототехнике, медицинской технике и т. д. Так, управляемые цифровые фильтры используются для устранения постоянной составляющей выходного сигнала на выходе аналого-цифрового преобразователя. Это также снижает уровень низкочастотных помех, разбросанных по оси частот слева от нижней границы спектра сигнала. В реальных ситуациях сигналы подвержены разнообразным помехам и шумам; однако применение фильтра может подавить эти шумы и произвести чистый сигнал. Под управляемостью понимается явная зависимость коэффициентов фильтра от частоты среза. В цифровом фильтре может возникнуть переходный процесс, на который указывает выброс сигнала. Изменение частоты среза во время операции фильтрации может вызвать это переходное событие. В этом отчете фильтр LPF Баттерворта используется, чтобы предложить стратегию компенсации для уменьшения этого выброса. Переходный процесс – это выброс (драйв) на временной диаграмме результатов. Этот драйв является последствием подстройки коэффициентов (границ) фильтра в процессе фильтрации (это классифицируется как «настройка на лету»). С помощью программы MATLAB исследовался переходный процесс, возникающий в результате перестройки фильтра, и проверялись формулы компенсации этого переходного процесса. Установлено, что применение такой компенсации снижает негативные последствия переходного процесса. Это уменьшение зависит от порядка фильтра, коэффициента настройки (соотношение частот среза до и после настройки) и момента настройки (для периодического сигнала).

Цифровой фильтр; Баттерворт; управляемый; компенсация; переходный процесс; выброс; частота среза; фильтрация.

Al-Karawi Hussein Shakor Mogheer, I.I. Turulin

REDUCTION APPROACH OF TRANSIENT PROCESS OVERSHOOT IN CONTROLLED TUNABLE LOW PASS DIGITAL FILTER

Digital signal processing is widely used in modern technology, including robotics, medical technology, etc. Thus, the controlled digital filters are used to eliminate the constant component of the output signal at the output of an analog-to-digital converter. This also reduces the low-frequency interference level spread out on the frequency axis to the left of the lower boundary of the signal spectrum. In actual situations, signals are subjected to a variety of disruptions and noises; however, applying a filter may suppress these noises and produce a clean signal. Controllability means the explicit dependence of the filter coefficients on the cutoff frequency. A transient occurrence can arise in a digital filter, which is indicated in the overshoot of the signal. A change in the cutoff frequency during filtering operation could cause this transient event. In this report, a Butterworth LPF filter is used to offer a compensation strategy for reducing this overshoot. A transient is an overshoot (drive) in the result timing chart. This drive is an after effect of the adjustment of the coefficients (boundaries) of the filter during filtering (this is classified "on-the-fly tuning"). By using the MATLAB program, the transient process resulting from the restructuring of the filter was investigated and the formulas were checked compensation of this transient process. It was found that the application of such compensation reduced the negative effects of the transition process. This decrease depends on the order of the filter, the adjustment coefficient (the ratio of cut frequencies before and after adjustment) and the moment of adjustment (for the periodic signal).

Digital filter; Butterworth; controlled; compensation; transient process; overshoot; cutoff frequency; filtering.

Введение. Фильтры являются наиболее важными и влиятельными элементами в рамках сигналов и систем, поскольку они практически представлены для фильтрации желаемого сигнала в соответствии с предпосылкой, подлежащей управлению в различных областях, представляющих интерес. Переходот речи через изображение к обработке видео и аудио являются основными техническими областями, в которых обычно используются настраиваемые цифровые фильтры [1–3]. Фильтры служат различным целям при сборе и анализе данных; такие приложения включают регулировку частоты временного сигнала путем уменьшения\увеличения некоторых частот[4-5]. В обработке сигналов фильтр представляет собой частотное селективное устройство или схему, предназначенную для пропускания сигналов с заданными частотами и отклонения или ослабления сигналов с нежелательными частотами [6]. В другом значении ограничить частотный спектр сигнала некоторой заданной полосой частот [7–10].

Свойствами, описывающими фильтр, являются его тип (LPF, HPF, BPF, BSF), частота среза (частота, выше которой фильтр не будет пропускать сигнал) и порядок (количество коэффициентов фильтра, которые будут непосредственно влиять на наклон переходной полосы) [11].

Управляемые цифровыетипы фильтр могут быть реализованы с двумя классификациями: конечный импульсный отклик (КИХ) и бесконечная импульсная характеристика (БИХ). «Импульсный отклик» как термин относится к фильтрам, которые работают во временной области. Таким образом, КИХ является фильтром, импульсный отклик которого является конечным периодом, потому что он обнуляется за конечное время, но БИХ-фильтр имеет внутреннюю обратную связь и всегда отвечает бесконечно [12–13].

Основным преимуществом БИХ фильтров перед фильтрами КИХ-фильтр является их эффективная реализация, которая помогает им соответствовать спецификациям полосы пропускания, стоп-полосы, пульсаций и / или отката. Для этого нам нужен фильтр БИХ низкого порядка по сравнению с аналогичным фильтром КИХ-фильтр. Это фактически соответствует меньшему количеству требуемых вычислений. Лучше всего использовать БИХ фильтр, когда линейность и краны низкого порядка не являются проблемой. Основными недостатками БИХ являются нестабильность, обратная связь, нелинейность и конечный период [8].

С другой стороны, КИХ-фильтр всегда может оказывать линейное поведение, он не требует обратной связи, его природа неподвижна, он легко может быть спроектирован для удовлетворения определенной частотной характеристики и не имеет конечного периода. Недостатком КИХ-фильтр является то, что они требуют больше памяти и вычислительной мощности, чем фильтры БИХ сопоставимой резкости или селективности, особенно при краях низкого порядка [14–16].

Существует несколько прототипов (методов) для фильтров БИХ и КИХ, которые выбраны в соответствии с конкретным применением. На рис. 1 показан подход к фильтру с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр). Мы видим следующее: В методе Чебышева у нас наименьшее количество ряби в стоп-полосе, однако у нас самая широкая переходная полоса. Переходная область метода Хэмминга узкая, а рябь меньше, чем у метода Ханнинга. Метод Кайзера имеет более низкую амплитуду пульсации в области остановки. Самая узкая переходная полоса была обнаружена в методе Ханнинга, с другой стороны, она имеет большую пульсацию стоп-полосы. Прямоугольный метод имеет наибольшее количество пульсаций/лепестков и даже влияет на полосу пропускания [17–20].

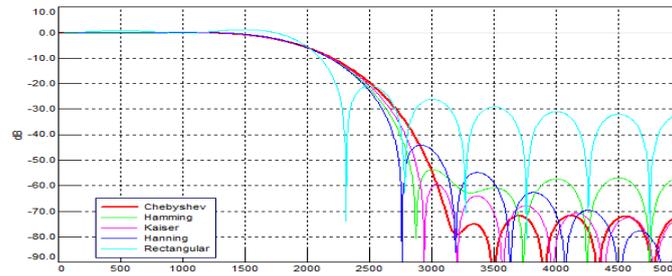


Рис. 1. Методы для КИХ-фильтров

На рис. 2 сравниваются фильтры нижних частот БИХ-фильтродинакового порядка и частоты среза. Из этого рисунка мы видим, что метод Баттерворта имеет плоскую реакцию как в полосе пропускания, так и в полосе остановок, но широкую переходную область. Обратный метод Чебышева по сравнению с фильтром Баттерворта имеет плоскостность в полосе пропускания и меньшую ширину перехода, но рябь в стоп-полосе. Если пульсация в стоп-полосе не вызывает проблем, фильтр Баттерворта должен использоваться для определенного применения [20–23]. Метод Чебышева продуцирует рябь в полосе пропускания. По сравнению с обратным Чебышева, он имеет более крутой откат. Метод “Causer” имеет самую узкую ширину перехода и имеет пульсации в стоп-полосе и полосе пропускания. Именно поэтому он называется эллиптическим фильтром. Метод Бесселя имеет наклонную величину как в полосе пропускания, так и в полосе остановок, с очень широкой переходной областью. Задержка по отношению к частоте в фильтре является самой плоской среди других упомянутых методов [24–26].

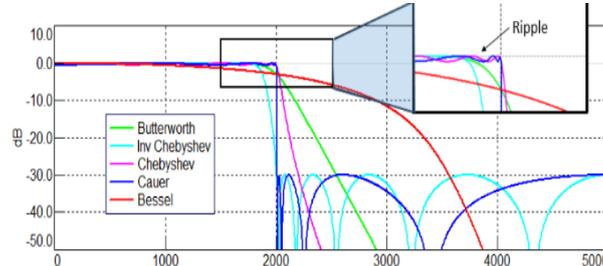


Рис. 2. Сравнение низкочастотных фильтров БИХ с одинаковым порядком и частотой среза

Постановка задачи. Вокруг у нас есть входной сигнал, который мы хотим отфильтровать, чтобы получить идеальный выход, а затем вычесть этот идеальный сигнал из реального сигнала. В результате вычитания возникнет переходный процесс и на его выходе произойдет превышение. Это отрицательный фактор, который представлен переходным процессом, возникающим в момент регулировки фильтра (резкое изменение его коэффициентов). Таким образом, возникает проблема преходящей компенсации.

Этапы работы. В этой статье мы предпримем следующие шаги для решения проблемы превышения:

1. Проектирование фильтра для входного сигнала на определенной частоте среза с использованием фильтра LPF n -го порядка и получение выходного сигнала для всей временной области

2. Спроектируйте второй фильтр на другой частоте среза и получите идеальный сигнал на выходе.
3. Вычтите идеальный сигнал из реального сигнала для получения переходного сигнала.
4. Повторите процесс для разных частот среза.
5. Компенсируйте транзитный процесс, который произошел, когда мы изменили коэффициенты фильтра, чтобы они представляли различные частоты среза.

Метод проектирования фильтров и рассмотрение параметров. В этой статье мы используем фильтр нижних частот, выбирается 5-й порядок Баттерворта, 5 - й порядок, а выход этого фильтра можно описать следующим образом:

$$y_{n+i} = \sum_{k=0}^M a_k x_{(n+i)-k} + \sum_{k=1}^N b_k y_{(n+i)-k}, \quad (1)$$

где: y – выходной сигнал, x – входной сигнал, а и b – коэффициенты фильтрации. Конфигурация цифрового фильтра по уравнению (1) показана на рис. 3.

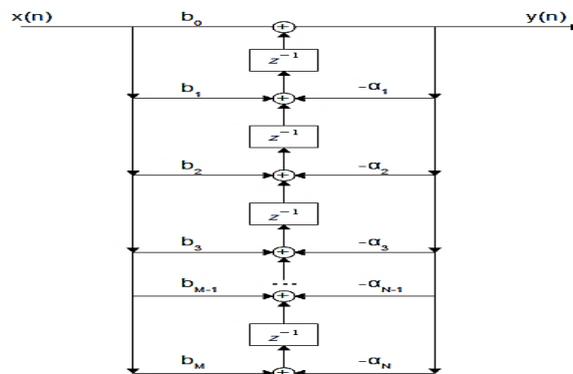


Рис. 3. Структура цифрового фильтра БИХ

Спецификации входного сигнала. Входной сигнал представляет собой синусоидальный сигнал со следующими параметрами, как показано на рис. 4: Амплитуда = 1, Частота = 55 Гц и Время дискретизации = 1/600.

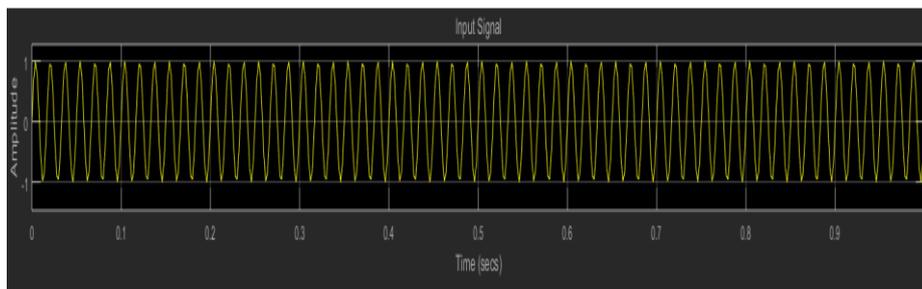


Рис. 4. Входной сигнал

Получение идеального сигнала. Путем подачи синусоидального сигнала на вход указанного цифрового фильтра IIR с частотой среза 2 кГц. Затем входной сигнал скважины вводится и синхронизированными им один за другим к 3 другим фильтрам того же типа фильтров с частотами среза 2,5, 3,2, 3,5 кГц соответственно. MATLAB Simulink для реализованного фильтра представлен на рис. 5. На рис. 6 показана конфигурация получения идеального сигнала с помощью MATLAB Simulink.

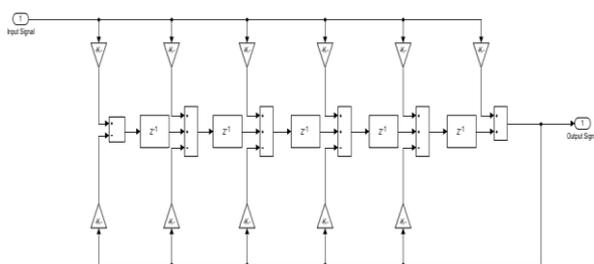


Рис. 5. Реализована блок-схема фильтра Simulink

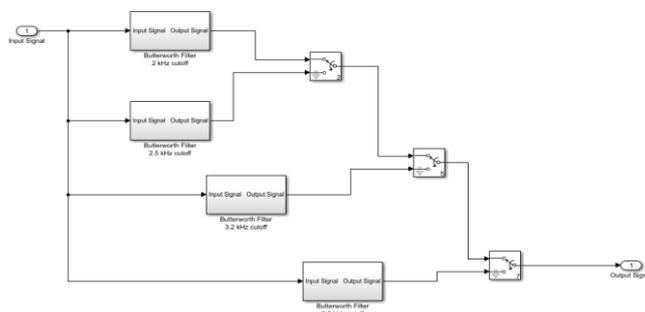


Рис. 6. Получение идеального сигнала с помощью MATLAB Simulink

MATLAB дает коэффициенты фильтрации, определяя тип фильтра, порядок и частоту среза. Табл. 1 объясняют коэффициенты, которые используются для различных частот среза. Также полученный идеальный сигнал показан на рис. 7.

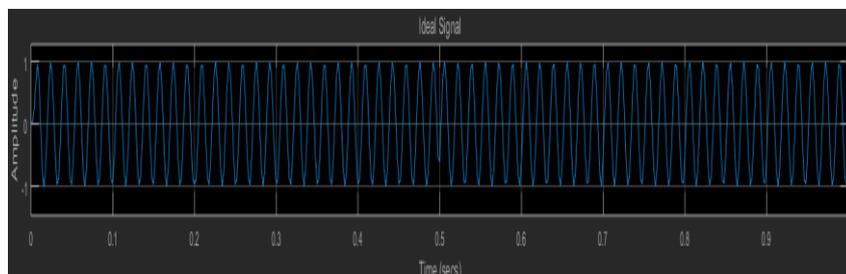


Рис. 7. Идеальный сигнал

Таблица 1

Коэффициенты фильтра для различных частот среза

Частота среза	Коэффициенты						
		1	2	3	4	5	6
2 kHz	a	0.03277	0.15292	0.31686	0.31586	0.15292	0.03267
	b	0	0.52232	0	0.03361	0	-
2.5 kHz	a	0.03277	0.26393	0.52786	0.52786	0.26393	0.05278
	b	0	0.63343	0	0.05572	0	-
3.2 kHz	a	0.1018	1.0083	1.0178	1.0178	0.0093	0.1018
	b	1.8648	1.0024	1.1015	0.2165	0.0306	-
3.5 kHz	a	0.1733	1.3210	2.7328	2.7328	1.3120	0.2733
	b	1.4634	2.8838	1.7506	0.5001	0.0607	-

Получение реального сигнала и метод снижения превышения. Превышение происходит при изменении частоты, например, через фильтрацию. Полоса перехода фильтра является частью амплитудно-частотной характеристики между границей полосы пропускания и границей барьерной полосы. Переходный процесс представляет собой превышение (импульс) на временной диаграмме выходного сигнала, как показано на рис. 10. Этот импульс является следствием изменения коэффициентов (параметров) фильтра во время фильтрации (это называется «регулировка на лету») [14]. Кроме того, этот реальный сигнал, где мы можем четко видеть превышение, представлен на рис. 8.



Рис. 8. Реальные и переходные сигналы без компенсационного процесса

Поскольку цифровой фильтр может быть сформулирован как линейное разностное уравнение (1), каждое приращение коэффициентов вызывает скачок при регулировке фильтра. Чтобы скорректировать превышение и добиться чистого реального сигнала, вычтите идеальный сигнал из реального сигнала и добавьте результат на выход фильтра, как показано на рис. 9.

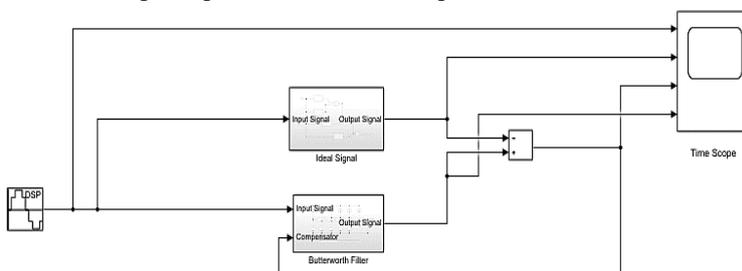


Рис. 9. Процесс компенсации превышения Структура Simulink

Везде, где реальный сигнал и переходный сигнал после осуществления компенсации показаны на рис. 10.

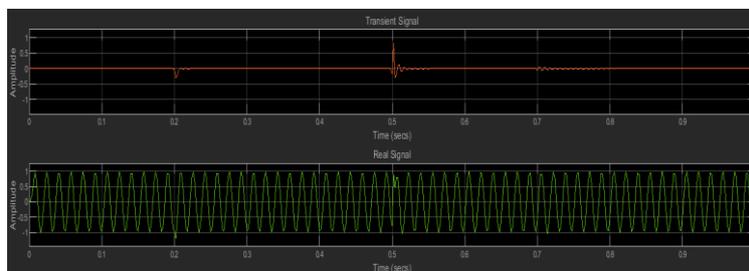


Рис. 10. Реальные и переходные сигналы после процесса компенсации

Заключение. Переходный процесс, возникающий в момент регулировки фильтра (резкое изменение его коэффициентов) на его выходе, является отрицательным фактором. Компенсация может не понадобиться, если частота (коэффициенты фильтра) меняется не резко, а более плавно. Или в несколько шагов. Подтверждение источника и типа сбоя, а также времени, в течение которого оно происходит, поможет компенсировать его. Предложенный метод демонстрирует, что мы можем устранить негативные эффекты процесса перехода, используя несколько процессов фильтрации входных сигналов для получения четкого реального сигнала с минимальными или нулевыми нарушениями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Mogheer H.S., Ilich T.I.* Analysis of MATLAB System Applicability for Synthesis of Controlled Butterworth Digital Recursive IIR Filters // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №. 3 (220). – С. 72-82.
2. *Piskorowski J., De Anda M.A.G.* A new class of continuous-time delay-compensated parameter-varying low-pass elliptic filters with improved dynamic behavior // I IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2008. – Vol. 56, No. 1. – P. 179-189.
3. *Piskorowski J.* Phase-compensated time-varying Butterworth filters // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2006. – Vol. 47, No. 2. – P. 233-241.
4. *Asker M.A. et al.* Design and Analysis of Robot PID Controller Using Digital Signal Processing Techniques // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, No. 4.37. – P. 103-109.
5. *Wang Y., Ding F., Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing // Digital Signal Processing. – 2018. – Vol. 72. – P. 44-58.
6. *Lutovac M.D., Tošić D.V., Evans B.L.* Filter design for signal processing using MATLAB and Mathematica. – Miroslav Lutovac, 2001.
7. *Lai E.* Practical digital signal processing. – Elsevier, 2003.
8. *Diniz P.S.R., Da Silva E.A.B., Netto S.L.* Digital signal processing: system analysis and design. – Cambridge University Press, 2010.
9. *Oshana R.* DSP for Embedded and Real-time Systems. – Elsevier, 2012.
10. *Wan hammar L., Yu Y.J.* Digital filter structures and their implementation // Academic Press Library in Signal Processing. Т. 1. – Elsevier, 2014. – P. 245-338.
11. *Bansal D.* Real-Time Data Acquisition in Human Physiology: Real-Time Acquisition // Processing, and Interpretation—A MATLAB-Based Approach. Academic Press, 2021.
12. *John Semmlow.* In Signals and Systems for Bioengineers. – Second Ed., 2012.
13. *Wilson P.* Design recipes for FPGAs: using Verilog and VHDL. – Newnes, 2015.
14. *Турulin И. и др.* Управляемые цифровые фильтры. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 306 с.
15. *Mogheer H.S., Turulin I.I.* Reduction of Signal Overshooting Caused by Cutoff Frequency Changing in the Controlled Digital Butterworth Low Pass Filter // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – P. 783-788.
16. *Turulin I.I., Mogheer H.S.* Analysis of Controlled Digital Recursive High-Pass Filters Structures with Infinite Non-Negative Impulse Response // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2022. – P. 755-759.
17. *Wang Y., Ding F. and Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing // Digital Signal Processing. – January 2018. – Vol. 72. – P. 44-58.
18. *Bui N.T., Phan D.T., Nguyen T.P., Hoang G., Choi J., Bui Q. and Oh J.* Real-time filtering and ECG signal processing based on dual-core digital signal controller system // IEEE Sensors Journal, 15 June 2020. – Vol. 20, No. 12. – P. 6492-6503.
19. *Karanov B., Chagnon M., Aref V., Ferreira F., Lavery D., Bayvel P. and Schmalen L.* Experimental investigation of deep learning for digital signal processing in short reach optical fiber communications // 2020 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPs), 23 September 2020. – P. 1- 6.
20. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* FIR filter design using wavelet coefficients // 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), 21 March, 2019. – P. 410-415.

21. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* Frequency sampling method of FIR filter design: a comparative study // 2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECOT), 2018.
22. *Radha S., Jayashri N., Aysha M. and Kumar C.* High performance hardware design of compressor adder in DA based FIR filters for hearing aids // International Journal of Speech Technology, December 2020. – Vol. 23, No. 4. – P. 807-814.
23. *Ziatdinov S.* Compensation of signal delay in digital smoothing filters // News of higher educational institutions. Instrumentation. – 2012. – Vol. 55, No. 12. – P. 21-25.
24. *Kennedy H.* Recursive digital filters with tunable lag and lead characteristics for proportional-differential control // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2015. – Vol. 23, No. 6. – P. 2369-2374.
25. *Alijan M.* DSP compensation for distortion in RF filters. University of Saskatchewan, Canada, April 2010.
26. *Popov D. and Smolskiy S.* Synthesis and Analysis Non-recursive Rejection Filters in the Transient Mode // Infocommunications Journal. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – P. 28-33.

REFERENCES

1. *Mogheer H.S., Ilich T.I.* Analysis of MATLAB System Applicability for Synthesis of Controlled Butterworth Digital Recursive IIR Filters, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 3 (220), pp. 72-82.
2. *Piskorowski J., De Anda M.A.G.* A new class of continuous-time delay-compensated parameter-varying low-pass elliptic filters with improved dynamic behavior, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, Vol. 56, No. 1, pp. 179-189.
3. *Piskorowski J.* Phase-compensated time-varying Butterworth filters, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2006, Vol. 47, No. 2, pp. 233-241.
4. *Asker M.A. et al.* Design and Analysis of Robot PID Controller Using Digital Signal Processing Techniques, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, No. 4.37, pp. 103-109.
5. *Wang Y., Ding F., Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing, *Digital Signal Processing*, 2018, Vol. 72, pp. 44-58.
6. *Lutovac M.D., Tošić D.V., Evans B.L.* Filter design for signal processing using MATLAB and Mathematica. Miroslav Lutovac, 2001.
7. *Lai E.* Practical digital signal processing. Elsevier, 2003.
8. *Diniz P.S.R., Da Silva E.A.B., Netto S.L.* Digital signal processing: system analysis and design. Cambridge University Press, 2010.
9. *Oshana R.* DSP for Embedded and Real-time Systems. Elsevier, 2012.
10. *Wan hammar L., Yu Y.J.* Digital filter structures and their implementation, *Academic Press Library in Signal Processing*. T. 1. Elsevier, 2014, pp. 245-338.
11. *Bansal D.* Real-Time Data Acquisition in Human Physiology: Real-Time Acquisition, Processing, and Interpretation—A MATLAB-Based Approach. Academic Press, 2021.
12. *John Semmlow.* In Signals and Systems for Bioengineers. Second Ed., 2012.
13. *Wilson P.* Design recipes for FPGAs: using Verilog and VHDL. Newnes, 2015.
14. *Turulin I. i dr.* Upravlyaemye tsifrovye fil'try [Controlled digital filters]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 306 p.
15. *Mogheer H.S., Turulin I.I.* Reduction of Signal Overshooting Caused by Cutoff Frequency Changing in the Controlled Digital Butterworth Low Pass Filter, *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2022, pp. 783-788.
16. *Turulin I.I., Mogheer H.S.* Analysis of Controlled Digital Recursive High-Pass Filters Structures with Infinite Non-Negative Impulse Response, *2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. IEEE, 2022, pp 755-759.
17. *Wang Y., Ding F. and Xu L.* Some new results of designing an IIR filter with colored noise for signal processing, *Digital Signal Processing*, January 2018, Vol. 72, pp. 44-58.
18. *Bui N.T., Phan D.T., Nguyen T.P., Hoang G., Choi J., Bui Q. and Oh J.* Real-time filtering and ECG signal processing based on dual-core digital signal controller system, *IEEE Sensors Journal*, 15 June 2020, Vol. 20, No. 12, pp. 6492-6503.

19. *Karanov B., Chagnon M., Aref V., Ferreira F., Lavery D., Bayvel P. and Schmalen L.* Experimental investigation of deep learning for digital signal processing in short reach optical fiber communications, *2020 IEEE International Workshop on Signal Processing Systems (SiPs), 23 September 2020*, pp. 1- 6.
20. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* FIR filter design using wavelet coefficients, *2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), 21 March, 2019*, pp. 410-415.
21. *Pushpavathi K. and Kanmani B.* Frequency sampling method of FIR filter design: a comparative study, *2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT), 2018*.
22. *Radha S., Jayashri N., Aysha M. and Kumar C.* High performance hardware design of compressor adder in DA based FIR filters for hearing aids, *International Journal of Speech Technology, December 2020*, Vol. 23, No. 4, pp. 807-814.
23. *Ziatdinov S.* Compensation of signal delay in digital smoothing filters, *News of higher educational institutions. Instrumentation*, 2012, Vol. 55, No. 12, pp. 21-25.
24. *Kennedy H.* Recursive digital filters with tunable lag and lead characteristics for proportional-differential control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, Vol. 23, No. 6, pp. 2369-2374.
25. *Alijan M.* DSP compensation for distortion in RF filters. University of Saskatchewan, Canada, April 2010.
26. *Popov D. and Smolskiy S.* Synthesis and Analysis Non-recursive Rejection Filters in the Transient Mode, *Infocommunications Journal*, 2019, Vol. 11, No. 3, pp. 28-33.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.К. Самойлов.

Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер – Южный федеральный университет; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79095343288; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

Турулин Игорь Ильич – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

Al-Karawi Hussein Shakor Mogheer – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79095343288; the department of theoretical foundations of radio engineering; postgraduate student.

Turulin Igor Ilich – e-mail: iiturulin@sfedu.ru; phone: +78634371632; the department of theoretical foundations of radio engineering; dr. of eng. sc.; professor.