

**Разработка интерфейса для расчета коэффициента несинусоидальности
с адаптивным оконным преобразованием Фурье и силовой части активного
фильтра в высоковольтной сети горно-обогатительного комбината**

Г.А. Фальков

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, Россия

Резюме. Цель. Целью данного исследования является разработка программного средства с графическим пользовательским интерфейсом, предназначенного для анализа и расчета коэффициента несинусоидальности с применением адаптивного оконного преобразования Фурье, а также определение конфигурации силовой части активного фильтра. **Метод.** Для анализа гармонического состава тока и напряжения в высоковольтной сети применяется адаптивное оконное преобразование Фурье, обеспечивающее высокую точность спектрального анализа. Это позволяет эффективно выявлять и оценивать коэффициент несинусоидальности сигналов. Расчет конфигурации силовой части активного фильтра выполняется с учетом характеристик нелинейных потребителей и параметров сети. Такой подход обеспечивает определение параметров фильтра, что позволяет существенно снизить искажения и повысить качество электроэнергии. **Результат.** В среде Matlab, разработан графический пользовательский интерфейс (GUI) с использованием инструмента Среды разработки графического пользовательского интерфейса Matlab (GUIDE). Данная программа позволяет не только проводить спектральный анализ и оценивать уровень гармонических искажений, но и формировать рекомендации по выбору конфигурации силовой части активного фильтра. **Вывод.** Предложенное решение может быть эффективно использовано инженерно-техническим персоналом промышленных предприятий для мониторинга качества электроэнергии и снижения уровня гармонических искажений. Применение адаптивного оконного преобразования Фурье позволяет программному комплексу стать универсальным инструментом для задач анализа, а разработанный модуль конфигурации расчета силовой части активного фильтра в высоковольтной сети горно-обогатительного комбината делает возможным эффективное и точное снижение гармонических искажений.

Ключевые слова: оконное преобразование Фурье, активный фильтр, силовая часть фильтра, Matlab, коэффициент несинусоидальности, высоковольтная сеть, графический интерфейс пользователя, спектральный анализ, гармонические искажения, качество электроэнергии, компенсация искажений.

Для цитирования: Г.А. Фальков. Разработка интерфейса для расчета коэффициента несинусоидальности с адаптивным оконным преобразованием Фурье и силовой части активного фильтра в высоковольтной сети горно-обогатительного комбината. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025; 52(3):152-158. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-152-158

**Development of an interface for calculating the non-sinusoidal coefficient with adaptive
window Fourier transform and the power part of the active filter in the high-voltage
network of a mining and processing plant**

G.A. Falkov

V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,
46 Kostyukova Str., Belgorod 308012, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to develop a software tool with a graphical user interface designed for analyzing and calculating the non-sinusoidal coefficient using adaptive window Fourier transform, as well as determining the configuration of the power part of the active filter. **Method.** Adaptive windowed Fourier transform is used to analyze the harmonic composition of current and voltage in a high-voltage network, which ensures high accuracy of spectral analysis. This makes it possible to effectively identify and evaluate the coefficient of non-sinusoidal signals. The configuration of the power part of the active filter is calculated taking into account the characteristics of nonlinear consumers and network parameters. This approach ensures that the filter parameters are determined, which significantly reduces distortion and improves the quality of electricity. **Result.** In the Matlab environment, a graphical user interface (GUI) has been developed using the Matlab Graphical User Interface Development Environment (GUIDE) tool. The program allows for spectral analysis and assessment of harmonic distortion levels, as well as the generation of recommendations for selecting the configuration of the active filter's power section. **Conclusion.** The proposed solution can be effectively used by engineering and technical personnel of enterprises to monitor the quality of electricity and reduce the level of harmonic distortion. The use of adaptive window Fourier transform allows the software package to become a universal tool for analysis tasks, and the developed configuration module for calculating the power part of an active filter in the high-voltage network of a mining and processing plant makes it possible to effectively and accurately reduce harmonic distortion.

Keywords: windowed Fourier transform, active filter, power part of the filter, Matlab, non-sinusoidal coefficient, high-voltage network, graphical user interface, spectral analysis, harmonic distortion, power quality, distortion compensation.

For citation: G.A. Falkov. Development of an interface for calculating the non-sinusoidal coefficient with adaptive window Fourier transform and the power part of the active filter in the high-voltage network of a mining and processing plant. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3): 152-158. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-152-158

Введение. Высоковольтная сеть горно-обогатительного комбината подвержена искажениям формы тока и напряжения вследствие широкого применения нелинейных потребителей. Для повышения качества электроэнергии требуется применение активных фильтров, обеспечивающих компенсацию несинусоидальности [1, 2, 8]. Одной из актуальных задач является разработка графического пользовательского интерфейса, позволяющего не только производить анализ уровня искажений, но и рассчитывать конфигурацию силовой части активного фильтра. В данном исследовании рассматривается создание такого программного комплекса с удобным пользовательским интерфейсом.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка программного средства, предназначенного для анализа несинусоидальности в высоковольтной сети и расчета параметров силовой части активного фильтра.

Задачами исследования являются:

- визуализация сигнала и его спектра с вычислением коэффициента несинусоидальности методом адаптивного оконного преобразования Фурье;
- расчет параметров силовой части активного фильтра;
- реализация пользовательского интерфейса.

Методы исследования. В качестве основного метода анализа гармонических искажений выбрано оконное преобразование Фурье, обеспечивающее повышенную точность при работе с исследуемыми сигналами [4, 7, 9]. Для непрерывного сигнала $x(t)$ оконное преобразование Фурье в точке времени τ и частоте ω определяется по формуле:

$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t - \tau) x(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где $g(t - \tau)$ – оконная функция; $x(t)$ – исходный сигнал; ω – угловая частота.

Возможен выбор типа окна, который влияет на разрешение по времени и частоте: прямоугольное окно; окно Ханна; окно Хэмминга; окно Кайзера; окно Чебышева.

Коэффициент гармонических составляющих определяется по формуле:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n A_k^2}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где A_1 – амплитуда первой гармоники; A_k – амплитуда k -й гармоники.

Конфигурация силовой части активного фильтра рассчитывалась на основе известных моделей силовой электроники и характеристик сети [3, 5, 6, 12, 15].

Мгновенный ток источника определяется как разность между мгновенным током нагрузки $i_n(t)$, формируемым в цепи с нелинейным потребителем, и током $i_{a\phi}(t)$, создаваемым активным фильтром для компенсации искажений определяется по формуле:

$$i_i(t) = i_n(t) - i_{a\phi}(t). \quad (3)$$

Общее выражение для тока нагрузки определяется по формуле:

$$i_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (4)$$

где n и φ – соответственно номер и фаза гармоники.

После компенсации гармонических составляющих активным фильтром, ток в фазе А трехфазного источника принимает синусоидальную форму и определяется по формуле:

$$i_{ua}^*(t) = I_{\max} \sin \omega t. \quad (5)$$

Обсуждение результатов. Реализация выполнена в среде Matlab. Разработан графический пользовательский интерфейс (GUI) с использованием инструмента Среды разработки графического пользовательского интерфейса Matlab (GUIDE) [11, 13].

На рис. 1 представлен скриншот работы программы в режиме выбора функционала.

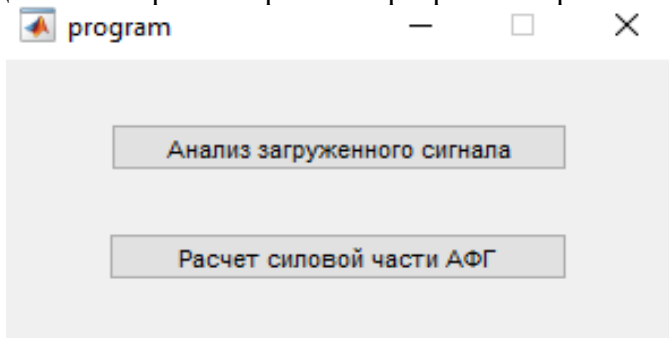


Рис. 1. Программа в режиме выбора функционала
 Fig. 1. The program is in the function selection mode

Используя переключатели в группе меню, пользователь выбирает необходимый тип задачи: анализ загруженного сигнала; расчет силовой части активного фильтра (АФ).

В режиме анализа загруженного сигнала пользователь импортирует входной сигнал в формате временного ряда, представляющий, например, напряжение или ток, полученный с измерительных устройств или из файла.

Далее программа последовательно выполняет следующие этапы обработки, представленные на рис. 2 в виде блок-схемы.

- Этап 1. Загрузка входного сигнала для анализа. Это может быть временной ряд напряжения или тока, полученный с датчиков или из файла.
- Этап 2. Спектральный анализ сигнала с использованием адаптивного оконного преобразования Фурье для визуализации частотных составляющих сигнала.
- Этап 3. Вычисление коэффициента несинусоидальности загруженного сигнала.
- Этап 4. Отображение временной диаграммы сигнала и его амплитудного спектра для визуального анализа формы сигнала и содержания гармоник.
- Этап 5. Извлечение и представление амплитуд гармоник с отображением значений каждой из них.



Рис. 2 - Блок-схема режима работы анализа загруженного сигнала
Fig. 2 - Block diagram of the operation mode of the loaded signal analysis

На рис. 3 приведен пример обработки загруженного сигнала напряжения высоковольтной сети горно-обогатительного комбината. На основании обработанного сигнала осуществляется автоматический расчет коэффициента несинусоидальности (THD), а также визуализация спектра и вывод ключевых гармонических составляющих.

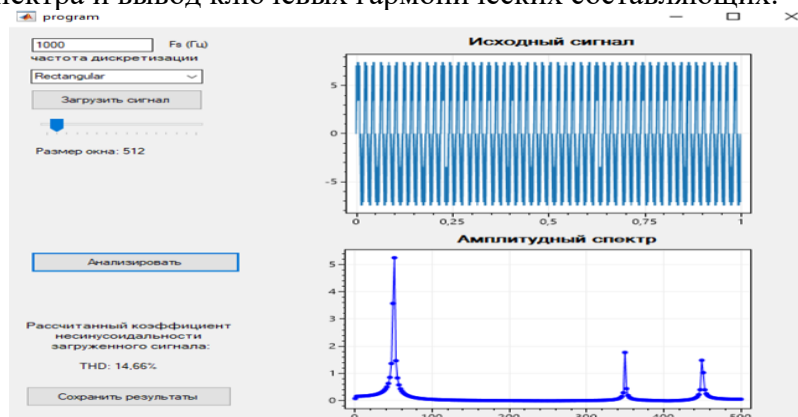


Рис. 3 - Программа в режиме анализа загруженного сигнала
Fig. 3 - The program is in the downloaded signal analysis mode

На основании проведенного анализа выявлены отклонения от требований стандарта ГОСТ 32144-2013, что указывает на необходимость подбора соответствующей конфигурации активного фильтра [10]. Алгоритм расчета силовой части активного фильтра реализован в виде последовательной процедуры, этапы которой представлены на рис. 4 в форме блок-схемы, обеспечивая прозрачность и структурированность процесса настройки фильтра.

- Этап 1. Задание параметров высоковольтной сети.
- Этап 2. Расчет полной мощности системы, необходимой для определения мощности, которую должен компенсировать активный фильтр.
- Этап 3. Расчет действующего значения тока активно-индуктивной нагрузки.
- Этап 4. Определение необходимых параметров активного фильтра.
- Этап 5. Завершающая процедура расчета ориентирована на формирование итоговых характеристик, а также на уточнение параметров фильтра с целью повышения эффективности его работы.

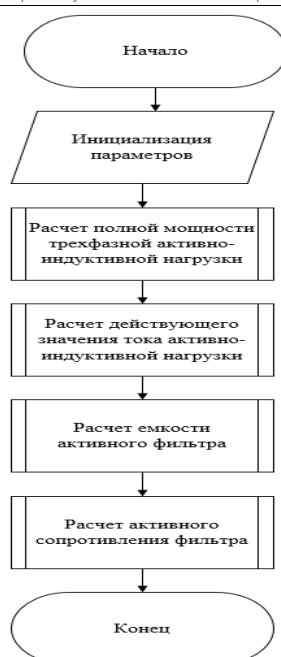


Рис. 4 - Блок-схема режима работы расчета силовой части АФ

Fig. 4 - Block diagram of the operating mode of the AF power unit calculation

На рис. 5 приведен пример расчета силовой части активного фильтра. Программа выполняет расчет ключевых параметров фильтра, включая полную мощность, действующее значение тока, требуемую емкость и активное сопротивление [14].

Исходные данные для проектирования				
Активно-индуктивные нагрузки		Lтр. Гн	Линейное напряжение сети, В	
P, Вт	Q, вар	cosφ		
1381000	1300000	0,73	0,017	6000
Коэффициент трансформации трансформатора:				0,1
Суммарная максимальная мощность всех нагрузок в номинальном режиме, кВт:				200
[Расчет]				
Полная мощность трехфазной активно-индуктивной нагрузки, ва:				1891780,821917
Действующее значение тока активно-индуктивной нагрузки, А:				182,0366944636
Емкость активного фильтра, мкФ:				6,964024752226
Активное сопротивление фильтра, Ом:				0,1

Рис. 5 - Программа в режиме расчета силовой части АФ

Fig. 5 – The program is in the calculation mode of the AF power unit

При вычислениях учитываются особенности нагрузки, спектральный состав гармонических искажений, а также заданный уровень их подавления.

Вывод. В ходе проведенного исследования разработан графический пользовательский интерфейс для вычисления коэффициента несинусоидальности с использованием адаптивного оконного преобразования Фурье и определения конфигурации силовой части активного фильтра в высоковольтной сети горно-обогатительного комбината.

Система реализована в виде интуитивно понятного графического интерфейса, обеспечивающего два основных режима работы: анализ загруженного сигнала и расчет конфигурации активного фильтра. В режиме анализа загруженного сигнала выполняется спектральный анализ временных сигналов тока или напряжения с использованием адаптивного оконного преобразования Фурье, рассчитывается коэффициент гармонических искажений (THD), а также визуализируются временная и частотная структуры сигнала. По результатам анализа выполняется проверка требований стандарта ГОСТ 32144–2013.

В режиме расчета силовой части АФГ реализован алгоритм, позволяющий определить ключевые электрические параметры фильтра на основе характеристик сети и уровня гармоник. Расчет включает определение полной мощности, тока нагрузки, требуемой емкости и активного сопротивления фильтра с учетом желаемого уровня компенсации.

Разработанный программный комплекс может использоваться в инженерной практике при проектировании систем электропитания, модернизации существующих энергосистем, а также в образовательных целях при изучении методов анализа и коррекции качества электроэнергии.

Благодарности. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова. Исследования проводились в рамках научной темы FZWN-2025-0002 «Интеллектуальные информационно-измерительные системы в социальном и техническом управлении».

Acknowledgments. This work was conducted as part of the Priority 2030 federal university support program using equipment at the V.G. Shukhov Belgorod State Technical University's High Technology Center. The research was conducted under research topic FZWN-2025-0002 "Intelligent information and measurement systems in social and technical management."

Библиографический список:

1. Averbukh M.A., Prasol D.A. Influence of high-power nonlinear consumers on electric energy losses in mining high-voltage power line. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. No. 5. P. 052028. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052028. EDN: XXEALR.
2. Giner-Sanz J.J., Ortega E.M., Perez-Herranz V. Total harmonic distortion based method for linearity assessment in electrochemical systems in the context of EIS. *Electrochimica Acta*. 2015. Vol. 186. Pp. 598-612. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.10.152.
3. Hooshmand R.A., Esfahani M.T. A new combined method in active filter design for power quality improvement in power systems. *ISA transactions*. 2011. Vol. 50. No. 2. Pp. 150-158. DOI: 10.1016/j.isatra.2010.12.001.
4. Kamal M., Bostani A., Webber Ju.L. Total harmonic distortion reduction based energy harvesting using grid-based three phase system and integral-derivative. *Computers & Electrical Engineering*. 2023. Vol. 109. P. 108744. DOI 10.1016/j.compeleceng.2023.108744. EDN XUKOQE.
5. Wang Y. et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022. Vol. 37. No. 5. Pp. 4212-4226. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3147835.
6. Вишнягов М.Г., Рублева Е.С., Руди Д.Ю. Влияния качества электроэнергии в энергосистеме и их снижение с помощью устройств силовой электроники. *Теоретические знания – в практические дела*. 2020. С. 62-67. EDN: TKFPUN.
7. Вынгра А.В. Алгоритмы и программные решения для оценки уровня интергармонических составляющих напряжения и тока. *Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии*. 2024. № 1. С. 6-15. EDN: DWBXMN.
8. Вышарь И.В., Белицын И.В., Петухов В.А. Современные технологии повышения качества электрической энергии. *Актуальные научные исследования: Сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции, Пенза. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение»*. 2025. С. 35-37. EDN: TFECAY.
9. Гасанов М.И., Григорян Л.А. Ряды Фурье и их практическое применение в электротехнике. *Актуальные тренды и перспективы развития науки, техники, технологий: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции*. Белгород: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство перспективных научных исследований». 2019. С. 6-9. EDN: YXVNW P.
10. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 2013. 16 с.
11. Документация Matlab. URL: <https://docs.exponenta.ru/> (дата обращения: 22.05.2025).
12. Замула К.В., Соколов Ю.В., Карманов А.В. Активный фильтр гармоник как средство повышения качества электрической энергии. *Энергия единой сети*. 2018. № 2 (37). С. 22–32. EDN: YXBMMB.
13. Парамзин А.О. Методы цифровой обработки сигналов применительно к задаче распознавания высших гармоник в токах 310. *Пространственное социально-экономическое развитие территорий: формирование комфортной среды и повышение качества жизни населения: Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием XV Международного IT-форума с участием стран БРИКС и ШОС, Ханты-Мансийск*. Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2024. С. 258-263. EDN: HWWXNCL.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614660 Российская Федерация. Программа расчета активного фильтра гармоник высоковольтной рудничной сети: № 2025614660: заявл. 11.02.2025; опубл. 25.02.2025 / Г.А. Фальков, С.А. Попов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

15. Шевырев Ю.В., Крещановский П.С. Исследование и разработка методики выбора параметров и регулятора напряжения активного фильтра гармоник. *Промышленная энергетика*. 2025. № 1. С. 24-31. EDN: AABEIG.

References:

1. Averbukh M.A., Prasol D.A. Influence of high-power nonlinear consumers on electric energy losses in mining high-voltage power line. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327(5): 052028. DOI: 10.1088/1757-899X/327/5/052028. EDN: XXEALR. (In Russ.).
2. Giner-Sanz J.J., Ortega E.M., Perez-Herranz V. Total harmonic distortion based method for linearity assessment in electrochemical systems in the context of EIS. *Electrochimica Acta*. 2015; 186: 598-612. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.10.152.
3. Hooshmand R.A., Esfahani M.T. A new combined method in active filter design for power quality improvement in power systems. *ISA transactions*. 2011; 50(2): 150-158. DOI: 10.1016/j.isatra.2010.12.001
4. Kamal M., Bostani A., Webber Ju.L. Total harmonic distortion reduction based energy harvesting using grid-based three phase system and integral-derivative. *Computers & Electrical Engineering*. 2023; 109:108744. DOI 10.1016/j.compeleceng.2023.108744. EDN XUKOQE.
5. Wang Y. et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022; 37(5): 4212-4226. DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3147835.
6. Vishnyagov M.G., Rubleva E.S., Rudy D.Y. Effects of electricity quality in the power system and their reduction using power electronics devices. *Theoretical knowledge is transformed into practical matters*. 2020; 62-67. EDN: TKFPUH. (In Russ.).
7. Vyngra A.V. Algorithms and software solutions for estimating the level of interharmonic components of voltage and current. *Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University. Series: Marine technologies*. 2024; 1:6-15. EDN: DWBXMH. (In Russ.).
8. Vyshar I.V., Belitsyn I.V., Petukhov V.A. Modern technologies for improving the quality of electric energy. *Actual scientific research: Collection of articles of the XXIV International Scientific and Practical Conference, Penza. Penza: ICNS "Science and Education"*. 2025; 35-37. EDN: TFECAY. (In Russ.).
9. Hasanov M.I., Grigoryan L.A. Fourier series and their practical application in electrical engineering. *Current trends and prospects for the development of science, technology, technologies: A collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference. Belgorod: Limited Liability Company "Agency for Advanced Scientific Research"*. 2019;6-9. EDN: YXVNW. (In Russ.).
10. GOST 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of electric energy quality in general-purpose power supply systems. 2013:16. (In Russ.).
11. <https://docs.exponenta.ru> (date of access: 05.22.2025) Matlab Documentation. (In Russ.).
12. Zamula K.V., Sokolov Yu.V., Karmanov A.V. Active harmonic filter as a means of improving the quality of electrical energy // The energy of a single network. 2018; 2(37): 22-32. EDN: YXBMMB. (In Russ.).
13. Paramzin A.O. Methods of digital signal processing applied to the problem of recognizing higher harmonics in currents of 310. *Spatial socio-economic development of territories: creating a comfortable environment and improving the quality of life of the population: Collection of materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation of the XV International IT Forum with the participation of the BRICS and SCO countries, Khanty-Mansiysk. Khanty-Mansiysk: Yugorsky State University*. 2024; 258-263. EDN: HWXHCL. (In Russ.).
14. Certificate of state registration of the computer program No. 2025614660 Russian Federation. The program for calculating the active harmonic filter of the high-voltage mining network: No. 2025614660: application 02/11/2025; published 02/25/2025 / G.A. Falkov, S.A. Popov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov" (In Russ.).
15. Shevyrev Yu.V., Khreshchanovsky P.S. Research and development of a methodology for selecting parameters and voltage regulator of an active harmonic filter. *Industrial power engineering*. 2025; 1:24-31. EDN: AABEIG (In Russ.).

Сведения об авторе:

Георгий Александрович Фальков, аспирант кафедры высшей математики; falkov.ga@bstu.ru

Information about the author:

Georgy A. Falkov, Postgraduate student, Department of Higher Mathematics; falkov.ga@bstu.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 27.06.2025.

Одобрена после рецензирования/Reviced 24.07.2025.

Принята в печать/ Accepted for publication 05.08.2025.