

Возможность применения конвейерного рентгенофлуоресцентного анализатора CON-X 02 для онлайн-анализа железорудного сырья

И.А. Гришин¹ ✉, В.В. Мавринский¹, А.А. Нефедьев¹, В.С. Великанов^{2,3}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

³ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ igorgri@mail.ru

Резюме: Рассмотрена возможность применения потокового рентгенофлуоресцентного анализатора для определения содержания железа и серы в железорудном сырье. Цель исследования – совершенствование возможностей существующих систем аналитического контроля для повышения точности, воспроизводимости измерений, а также повышения устойчивости подобных систем к воздействию внешних неблагоприятных факторов. В качестве основного метода в работе используется хорошо зарекомендовавший себя метод рентгенофлуоресцентного анализа. Проведены исследования, которые позволили получить наиболее оптимальные режимы работы рентгеновской трубки для оптимального определения элементов в железорудном концентрате (железа и серы). Одной из сложностей исследования являлось то, что в качестве источника рентгеновского излучения была использована трубка с молибденовым анодом, что вызывало проблемы в определении процентного содержания серы, т.к. флуоресцентные *L*-α линии молибдена накладываются на *K*-α линии серы. В результате исследования были подобраны фильтры для использования рентгеновской трубки с молибденовым анодом. В качестве фильтров были использованы Al, V, Ti, среди которых наилучшие результаты показал титан. Анализ полученных калибровочных зависимостей в работе показал высокую степень корреляции между числом флуоресцентных фотонов и концентрацией элементов, что при использовании рентгеновской трубки с молибденовым анодом и первичным фильтром из титана сделало возможным одновременное определение элементов S и Fe с относительной погрешностью 0,13 и 0,98% (абс.) соответственно. Полученные результаты могут быть использованы в условиях работы горно-обогатительных предприятий для получения достоверной информации о содержании элементов в сырье без предварительной пробоподготовки и в реальном времени, что позволит оперативно реагировать на изменения процентного содержания элементов в сырье и получить экономический эффект.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, железорудный концентрат, онлайн-анализ, спектр, первичный фильтр

Для цитирования: Гришин И.А., Мавринский В.В., Нефедьев А.А., Великанов В.С. Возможность применения конвейерного рентгенофлуоресцентного анализатора CON-X 02 для онлайн анализа железорудного сырья. *Горная промышленность*. 2026;(2):135–139. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-135-139>

Possibility of using the CON-X 02 conveyor-mounted XRF analyzer for online analysis of iron ore raw materials

I.A. Grishin¹ ✉, V.V. Mavrinskii¹, A.A. Nefediev¹, V.S. Velikanov^{2,3}

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

³ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ igorgri@mail.ru

Abstract: The paper considers the possibility of using a flow X-ray fluorescence analyzer to determine the iron and sulfur content in iron ore raw materials. The purpose of this work is to improve the capabilities of the existing analytical control systems to enhance the accuracy, repeatability of measurements, as well as to increase the resistance of such systems to adverse external factors. The main method used in this work is the well-proven X-ray fluorescence analysis. The research included studies that helped to obtain the most optimal modes of X-ray tube operation for appropriate determination of elements, i.e. iron and sulfur, in the iron ore concentrates. One of the challenges in conducting the study was that the X-ray tube used as the source had

molybdenum anode, which caused difficulties in determining the percentage of sulfur, because the fluorescent *L-α* lines of molybdenum are superimposed on the *K-α* lines of sulfur. The study helped to select filters to be utilized with an X-ray tube with the molybdenum anode. Al, V, Ti were used as the filter material, with titanium showing the best results. Analysis of the obtained calibration dependences showed a high degree of correlation between the number of the fluorescent photons and the concentration of elements, which made it possible to simultaneously determine the S and Fe elements with a relative error of 0.13 % and the absolute error of 0.98 % respectively using an X-ray tube with the molybdenum anode and a primary filter made of titanium. The results obtained in the work can be used at mining and processing operations to obtain reliable information on the content of elements in raw materials in real time and without preliminary sample preparation, which will allow a prompt reaction to changes in the percentage content of elements in raw materials and to gain a positive economic effect.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, iron ore concentrate, online analysis, spectrum, primary filter

For citation: Grishin I.A., Mavrinskii V.V., Nefediev A.A., Velikanov V.S. Possibility of using the CON-X 02 conveyor-mounted XRF analyzer for online analysis of iron ore raw materials. *Russian Mining Industry*. 2026;(2):135–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-2-135-139>

Введение

В рамках решения задачи аналитического контроля сыпучих материалов в технологическом потоке важное место занимает вопрос получения аналитической пробы, отражающей состав всей опробуемой партии сыпучего материала. В условиях современного производства зачастую результаты химического анализа проб, во-первых, не соответствуют среднему составу анализируемой партии материала и, во-вторых, поступают технологическому персоналу предприятия уже после того, как опробуемый материал прошел переработку, и эта информация не может быть использована для управления технологическим процессом.

В настоящее время начинают внедряться системы автоматизированного аналитического контроля. Подобные системы используют методы анализа, обеспечивающие непрерывность и высокую скорость анализа и не требующие предварительного отбора проб и их подготовки. Такими методами могут быть ядерно-физические, рентгеноспектральные, микроволновые методы [1–9]. Один из них основывается на методе рентгенофлуоресцентного анализа, позволяет производить анализ как непосредственно в технологическом потоке, так и при отведении части потока с помощью байпасной линии и непрерывного или периодического анализа [10–14].

Методика проведения эксперимента

При анализе химического состава железорудного концентрата (ЖРК) использовался рентгенофлуоресцентный анализатор CON-X 02, который предназначен для идентификации и измерения концентрации элементов в сыпучем материале, транспортируемом по конвейеру [15–19]. Анализатор идентифицирует и определяет содержание в спектре элементов от S до Y по K-линии и от Sr до U по L-линии. Характеристическое излучение, содержащее информацию о количестве элементов в материале, возникающее при облучении рентгеновской трубкой образца, попадает на кремниевый диффузионно-дрейфовый детектор, охлаждаемый термоэлектрическим холодильником.

Во время измерений накопленные данные сохраняются в памяти спектрометра, затем передаются персональному компьютеру с использованием программного обеспечения Msra_B. Данные, полученные по требуемым элементам, сохраняются на жестком диске и отображаются на экране компьютера в виде таблиц, диаграмм или сообщений.

Описание объекта анализа ЖРК приведено в табл. 1.

Целью настоящей работы является применение рентгенофлуоресцентного онлайн-анализатора для определения среднего содержания серы S и общего железа Fe в партии

Таблица 1
Параметры анализируемого материала и характеристики конвейера

Table 1
Parameters of the analyzed material and the conveyor characteristics

Наименование показателя	Значение показателя
Наименование анализируемого материала	Железорудный концентрат
Основные элементы в составе материала	Железо общее Fe _{общ.} – 59,9–68,0%, двуокись кремния SiO ₂ – 2,5–5,0 %, сера S – 0,09–0,78%
Элементы, содержащиеся в незначительном количестве	Оксид марганца (II) MnO – 0,1–0,5 %, фосфор P – 0,005–0,02 %, оксид титана TiO ₂ , окись кальция, окись магния
Объемная плотность материала, кг/м ³	2,7–2,9
Размер гранул анализируемого материала, мм (диапазон)	0,071–0,1
Перечень анализируемых химических элементов	Fe, S
Допустимая абсолютная погрешность анализа, %	Fe – 0,4% (абс.); S – от 14% (отн.) при концентрациях серы до 0,21% и 8% (отн.) при концентрациях серы более 0,5%

железорудного концентрата на предприятии ООО «ГРК «Быстринское».

Были проведены исследования зависимости расстояния от образца до детектора на точность определения содержания серы. В результате было установлено, что с увеличением расстояния между образцом и детектором интенсивность пика серы резко падает вследствие поглощения энергии фотонов в воздушной прослойке. При этом основной вклад в интенсивность пика вносят только фотоны Mo-*La* из-за одинаковой энергии возбуждения, которые регистрируются в спектре из-за рассеянного излучения молибденового анода. Таким образом, было принято дальнейшие исследования проводить при расстоянии 15 мм. На рис. 1 приведено сравнение спектров образца №25 при расстояниях от образца до детектора в 15 и 55 мм.

Калибровка анализатора по пробам

Для калибровки анализатора использовались образцы ЖРК с известной массовой долей серы и железа, предоставленных предприятием.

Каждую из 39 проб ЖРК помещали в одинаковые стеклянные чашки Петри диаметром 150 мм. Порошок ЖРК уплотнялся и выравнивался в чашках. От каждого образца получали по три спектра.

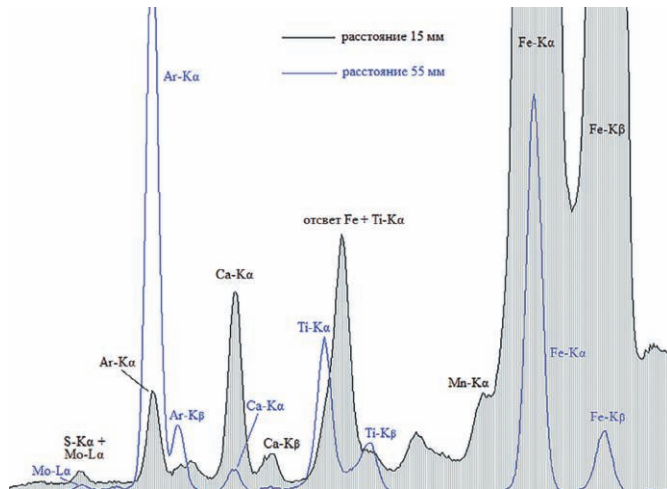


Рис. 1
Спектры образца №25 ЖРК при различном расстоянии от образца до детектора

Fig. 1
Spectra of Sample No.25 (iron ore concentrate) at different distances from the sample to the detector

Для всех образцов были вычислены пределы обнаружения, статистическая погрешность расчетов пределов обнаружения и чувствительность анализа.

Данные параметры определялись по формулам [20]:

$$ПО = \frac{3\sqrt{Sf}}{Sp} \cdot C;$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{Sp + 2Sf}}{Sp};$$

$$\varepsilon = \frac{Sp}{T \cdot C},$$

где ПО – предел обнаружения, %; σ – точность, %; ε – чувствительность, импульс/с/%; Sp – площадь пика; Sf – площадь фона под пиком; T – время измерения; C – концентрация вещества.

Измерения проводились с фильтром из Ti толщиной 120 мкм при первичном излучении при анодном напряжении и анодном токе рентгеновской трубки соответственно 26 кВ и 500 мкА. При таких условиях общая регистрируемая скорость счета была приблизительно одинакова для всех образцов, а «мертвое» время спектрометрического тракта составляло около 12%. Среднее «живое» время измерения каждого образца примерно составляло 4,5 мин. Результаты этих измерений серы и железа представлены на рис. 2, 3.

Ординаты точек на рис. 2, 3 соответствуют массовым долям S и Fe в образцах ЖРК. Абсцисса каждой точки соответствует усредненному по трем измерениям количеству им-

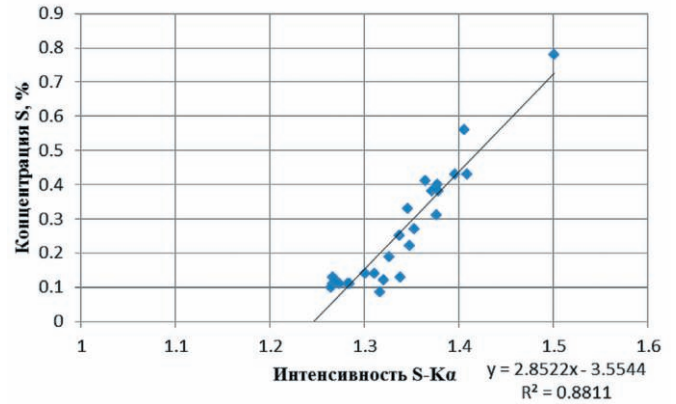


Рис. 2
Экспериментальная зависимость содержания серы в образцах ЖРК от интенсивности линии S-Kα

Fig. 2
Experimental dependence between the sulfur content in samples of iron ore concentrate and the intensity of the S-Kα line

пульсов, зарегистрированных на линиях S-Kα и Fe-Kα, при измерении соответствующего образца ЖРК.

Калибровка анализатора по массовой доле интересующего элемента сводится к получению уравнения регрессии, показанного на рис. 2 и 3.

Вычисленная из проведенного по экспериментальным точкам уравнения регрессии величина абсолютных погрешностей значений массовых долей от «паспортных» значений для S составляет 0,13% (абс) и для Fe – 0,98% (абс).

Большой разброс точек на графике рис. 2 и 3 может быть обусловлен тремя причинами. Во-первых, слишком большой неопределенностью «паспортных» значений массовой доли калибровочных образцов (отсутствует доверительный интервал), во-вторых, слишком большой неоднородностью (негомогенностью) этих образцов, и, в-третьих, используемая в анализаторе рентгеновская трубка с молибденовым анодом оказывает отрицательное влияние ввиду того, что линия Mo-La имеет энергию 2,293 кэВ, а линия S-Kα имеет энергию 2,307 кэВ, что приводит к наложению этих двух линий друг на друга.

Обсуждение

В ходе выполненной работы в полученных спектрах образцов ЖРК с известной массовой долей серы и железа флуоресцентные линии S-Kα и Fe-Kα при выбранных условиях анализа отчетливо видны, что подтверждает возможность количественного анализа этих элементов в ЖРК с использованием данного анализатора.

Использование анализатора с молибденовым анодом обеспечивает приемлемую точность анализа при определении железа и серы.

Для увеличения точности определения серы в ЖРК-концентрате необходимо использовать рентгеновскую трубку с родиевым анодом, однако, даже полученная в экспериментах точность определения серы отражает средний состав материала, а не точное содержание серы в аналитической пробе.

Опыт применения анализатора в условиях движущегося конвейера показал, что для уточнения «лабораторных» калибровочных кривых необходимо произвести так называемую сверку показаний анализатора. Процедура сверки

обычно проводится в ходе ввода анализатора в эксплуатацию и сводится к сравнению результатов лабораторного анализа проб, отобранных с движущейся ленты конвейера, и результатов анализа, произведенного анализатором в момент отбора этих проб, с последующей коррекцией коэффициентов соответствующих регрессионных уравнений.

Заключение

Полученные в работе результаты могут быть использованы в условиях работы горно-обогатительных предприятий для получения достоверной информации о содержании элементов в сырье без предварительной пробоподготовки и в реальном времени, что позволит оперативно реагировать на изменения массовой доли элементов в сырье и получить экономический эффект.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Morse J.G. *Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production*. Elsevier; 1977. 280 p.
2. Бурмистенко Ю.Н. *Фотоядерный анализ состава вещества*. М.: Энергоатомиздат; 1986. 200 с.
3. Sokolov A., Demsky M., Pesterev A., Gostilo V., Kondratjev V., Moshkov V. Improvement of metrological characteristics of a new industrial facility for gold-bearing ore gamma activation analysis. *Applied Radiation and Isotopes*. 2022;182:110147. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110147>
4. Лосев Н.Ф., Смагунова А.Н. *Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа*. М.: Химия; 1982. 208 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/35636> (дата обращения: 25.12.2025).
5. Алов Н.В. Рентгеновская спектроскопия. В кн.: Золотов Ю.А. (ред.). *Основы аналитической химии*. Кн. 2. Методы химического анализа. М.: Высшая школа; 1999. С. 250–258.
6. Miziolek A.W., Palleschi V., Schechter I. (eds). *Laser Induced Breakdown Spectroscopy*. Cambridge University Press; 2006. 640 p.
7. Мандругин А.В., Седельникова Г.В., Кузнецов А.П., Пучкова Т.В., Серебряный Б.Л., Симакова Л.Г., Гума В.И. Современные методики анализа горных пород, руд и технологических продуктов при лабораторно-аналитическом сопровождении ГРП на благородные и цветные металлы. *Руды и металлы*. 2015;(1):64–73. Mandrugina A.V., Sedelnikova G.V., Kuznetsov A.P., Puchkova T.V., Serebryany B.L., Simakova L.G., Guma V.I. Modern techniques and methods of the geological materials analysis for precious and base metals. *Ores and Metals*. 2015;(1):64–73. (In Russ.)
8. Шаранов П.Ю., Алов Н.В. Рентгенофлуоресцентный анализ с полным внешним отражением твердотельных объектов металлургической промышленности. *Журнал аналитической химии*. 2018;73(11):868–876. <https://doi.org/10.1134/S0044450218110129> Sharanov P.Y., Alov N.V. Total reflection x-ray fluorescence analysis of solid metallurgical samples. *Journal of Analytical Chemistry*. 2018;73(11):1085–1092. <https://doi.org/10.1134/S1061934818110126>
9. Бондаренко А.В., Белоновский А.В., Кацман Я.М. Применение метода фундаментальных параметров при рентгенофлуоресцентном анализе пульповых продуктов обогащения руд. *Горная промышленность*. 2021;(S5-2):84–88. Bondarenko A.V., Belonovsky A.V., Katzman Ya.M. Application of fundamental parameter method in X-ray fluorescence analysis of pulp products in ore concentration. *Russian Mining Industry*. 2021;(S5-2):84–88. (In Russ.)
10. Hu Z.-Y., Xing H.-B., Shi H.-Y., Sun X.-S. Evaluation of uncertainty for determination of TFe in sinter ore by XRF. *Ye Jin Fen Xi = Metallurgical Analysis*. 2005;25(1):82–84. (In Chinese).
11. Xiao H.-X., Du D.-F. Determination of total iron in iron ore with cobalt internal standard method by XRF spectrometry. *Ye Jin Fen Xi = Metallurgical Analysis*. 2001;21(5):21–23. (In Chinese).
12. Gong W., Tan B., Shao G. Determination of the valence of iron by the conventional XRF spectrometer. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi = Spectroscopy and Spectral Analysis*. 1998;18(6):734–738. (In Chinese).
13. Sokolov A.D., Docenko D., Bliakher E., Shirokobrod O., Koskinen J. On-line analysis of chrome-iron ores on a conveyor belt using X-ray fluorescence analysis. *X-Ray Spectrometry*. 2005;34(5):456–459. <https://doi.org/10.1002/xrs.863>
14. Bhaduri S.K., Banerjee D., Roy N.K. Application of X-ray Fluorescence Spectrometry (XRFS) in complete analysis of iron ore. *Indian Minerals*. 2004;58(3):209–214.
15. Зайцев В.Л., Макарова Т.А., Барков А.В., Бахтияров А.В., Москвин Л.Н. Рентгенофлуоресцентный анализ полиметаллических руд и их переделов в системе автоматического контроля качества. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2007;73(4):3–11. Zaitsev V.A., Makarova T.A., Barkov A.V., Bahtiarov A.V., Motkvin L.N. X-ray-fluorescent analysis of complex ores and their re-manufactured products in system of automatic quality control. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2007;73(4):3–11. (In Russ.)

16. Столяров В.Ф., Глебов М.В., Зайцев Е.И., Маркизов В.Н., Митин В.И., Рогожин В.Ф. Поточный рентгено-флюоресцентный комплекс для непрерывного контроля содержания химических элементов и плотности пульпы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2005;(7):324–326.
Stolyarov V.F., Glebov M.V., Zaitsev E.I., Markizov V.N., Mitin V.I., Rogozhin V.F. Flow X-ray fluorescence complex for continuous control of chemical elements content and pulp density. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005;(7):324–326. (In Russ.)
17. Хохлова И.В., Кузьмина Т.Г., Рощина И.А., Кононкова Н.Н., Викентьев И.В. Исследование возможностей использования рентгенофлуоресцентного метода для определения химического состава сульфидных руд. *Аналитика и контроль*. 2012;16(4):425–431.
Khokhlova I.V., Kuzmina T.G., Roschina I.A., Kononkova N.N., Vikentev I.V. The experience of major, ore and trace elements XRF determination in sulfide ores. *Analytics and Control*. 2012;16(4):425–431. (In Russ.)
18. Niemela A., Hasikova E., Titov V. Real-time material flow analysis on conveyor belts. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(17):24–27. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.071>
19. Кондратьев В., Ландман К., Соколов А., Гостило В. Усовершенствование рентгенофлуоресцентного анализа состава минералов на конвейере в режиме реального времени. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(6):202–208. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200619>
Kondratjevs V., Landmans K., Sokolovs A., Gostilo V. Performance improvement of on-line xrf analysis of minerals on a conveyor belt. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2020;(6):202–208. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200619>
20. Ушеров А.И., Алов Н.В., Волков А.И., Ишметьев Е.Н., Полушкин М.Е., Вдовин К.Н. и др. Основной источник погрешностей при рентгенофлуоресцентном анализе железорудных смесей. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009;75(3):25–26.
Usherov A.I., Alov N.V., Volkov A.I., Ishmetiev E.N., Polushkin M.E., Vdovin K.N. et al. The main source of errors in X-ray fluorescence analysis of iron ore mixtures. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2009;75(3):25–26. (In Russ.)

Информация об авторах

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgri@mail.ru
Мавринский Виктор Викторович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0001-7038-9993>

Нефедьев Александр Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; профессор кафедры автоматизации и компьютерных технологий, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.12.2025

Поступила после рецензирования: 09.02.2026

Принята к публикации: 12.02.2026

Information about the authors

Igor A. Grishin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Geology, Mine Surveying, and Minerals Processing Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-8010-7542>; e-mail: igorgri@mail.ru

Viktor V. Mavrinskii – Cand. Sci. (Phys. & Math.), Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0001-7038-9993>

Alexander A. Nefediev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Vladimir S. Velikanov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Hoisting and Hauling Machines and Robots, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation; Professor, Department of Automatics and Computer Technologies, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-5581-2733>; e-mail: v.s.velikanov@urfu.ru

Article info

Received: 13.12.2025

Revised: 09.02.2026

Accepted: 12.02.2026