Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Повышение энергоэффективности процесса рудоподготовки на основе анализа энергопотребления мельниц полусамоизмельчения

Р.В. Клюев ✉
Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация
✉ kluev-roman@rambler.ru

Резюме: В условиях истощения легкодоступных запасов руд и роста тарифов на энергоносители повышение энергоэффективности горно-обогатительных предприятий становится критически важной задачей. Наибольшим потенциалом для оптимизации энергоэффективности обладают процессы рудоподготовки, в частности, работа мельниц полусамоизмельчения, которые являются основными потребителями электроэнергии. Цель исследования – провести анализ фактического энергопотребления мельниц полусамоизмельчения на примере Кочкарского золоторудного месторождения для разработки практических рекомендаций по снижению удельных затрат. В исследовании применен комплексный подход, сочетающий метод Бонда для расчета индекса работоспособности руды, прямые замеры электрических параметров (ток, напряжение, мощность) анализаторами AR5 и ПКК-57, а также статистическую обработку данных с использованием Python и MathCAD. Определено, что средний удельный расход электроэнергии составляет 1,01 кВт·ч/т, однако выявлена слабая корреляция между производительностью и активной мощностью. Установлено, что краткосрочные остановки подачи руды не приводят к пропорциональной экономии. Практическая значимость работы заключается в обосновании необходимости перехода к адаптивным системам управления и цифровым двойникам, что позволит сократить удельные энергозатраты на 10–15% и повысить стабильность технологического процесса.

Ключевые слова: энергоэффективность, мельница полусамоизмельчения, энергетический аудит, удельный расход электроэнергии, метод Бонда, золоторудное месторождение, оптимизация технологических режимов

Для цитирования: Клюев Р.В. Повышение энергоэффективности процесса рудоподготовки на основе анализа энергопотребления мельниц полусамоизмельчения. *Горная промышленность*. 2026;(5):142–146. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Improving energy efficiency of the ore preparation process based on analyzing energy consumption of semi-autogenous grinding mills

R.V. Klyuev ✉
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation
✉ kluev-roman@rambler.ru

Abstract: In conditions when easily accessible ore reserves are depleting and the energy tariffs are rising, improving the energy efficiency of mining and processing plants is becoming a critical task. Ore preparation processes, particularly operation of semi-autogenous grinding mills, which are major electricity consumers, hold the greatest optimization potential. The aim of this work is to analyze the actual energy consumption of a semi-autogenous grinding mill at the Kochkar gold ore deposit to develop practical recommendations for reducing specific energy costs. The study employs a comprehensive approach combining the Bond method for calculating the ore work index, direct measurements of electrical parameters (current, voltage, power) using AR5 and PKK-57 analyzers, and processing of statistical data using Python and MathCAD. The key results show that the average work index is 1.01 kWh/t; however, a weak correlation between the throughput and active power was identified. It was found that short-term interruptions in the ore feed fail to produce proportional energy savings. The practical significance of this work lies in justifying the need of transition to adaptive control systems and digital twins, which could reduce specific energy consumption by 10–15% and enhance the stability of the technological process.

Keywords: energy efficiency, semi-autogenous grinding mill, energy audit, specific energy consumption, Bond's method, gold ore deposit, optimization of process parameters

For citation: Klyuev R.V. Improving energy efficiency of the ore preparation process based on analyzing energy consumption of semi-autogenous grinding mills. *Russian Mining Industry*. 2026;(5):142–146. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-5-142-146

Введение

На фоне глобального дефицита природных ресурсов и истощения разведанных запасов руд на первый план выходит проблема рационального использования каждого этапа производственной цепочки – от вскрышных работ до финальной переработки концентрата [1; 2]. В этих условиях особое значение приобретает комплексный энергетический аудит ключевых агрегатов горно-обогатительных комбинатов. Основная цель таких проверок – поиск резервов для сокращения доли топливно-энергетических расходов в конечной себестоимости готовой продукции [3–5]. В рамках стратегии технологической независимости России приоритетное внимание уделяется снижению энергоёмкости предприятий золотодобывающей отрасли. Наибольший потенциал для оптимизации здесь сосредоточен в работе измельчительного оборудования, в частности, мельниц шаровых (МШР) и полусамоизмельчения (МПСИ), которые являются основными потребителями электроэнергии на фабриках.

Однако проведения стандартных замеров мощности на мельницах сегодня уже недостаточно. Современный подход к энергосбережению требует внедрения интеллектуальных систем мониторинга в реальном времени, которые учитывают не только потребляемую мощность, но и загрузку рудой, износ футеровки, скорость вращения барабана и даже гранулометрический состав пульпы [6].

Ключевой задачей является переход от разовых энергетических обследований к постоянной адаптивной настройке режимов работы. Например, изменение частоты вращения МПСИ в зависимости от твердости поступающей руды может дать экономию до 10–15% без потери производительности. Параллельно с этим активно внедряются технологии рекуперации тепла от приводов мельниц и использование более эффективных смазочных материалов, снижающих механические потери в подшипниковых узлах [7; 8].

Кроме того, в условиях импортозамещения остро стоит вопрос модернизации электроприводов. Замена устаревших асинхронных двигателей на синхронные с постоянными магнитами или на приводы с регулируемой скоростью позволяет не только сгладить пиковые нагрузки в энергосистеме предприятия, но и повысить ресурс работы самого оборудования.

В перспективе именно комплексный подход – сочетание цифрового двойника мельницы, прогнозной аналитики износа и динамического управления загрузкой – станет тем инструментом, который позволит золотодобытчикам не просто выживать в условиях роста тарифов, а существенно наращивать производства за счет экономии энергоресурсов.

Материалы и методы

Для количественной оценки энергопотребления мельничного оборудования был применен алгоритм Бонда. Согласно этому алгоритму между расходом электроэнергии и величиной свежеобразованной межфазной границы твёрдой фазы существует прямое пропорциональное соотношение [9; 10].

Различные симуляторы учитывают не только индекс Бонда, но и характер траекторий загрузки, распределение напряжений и гидравлические режимы. Тем не менее даже в таких гибридных подходах Wi остаётся отправной точкой для первичной прикидки энергозатрат.

Таким образом, применяемая на обследовании процедура расчёта по Бонду не сводится к формальной подстановке в формулу – это многофакторный аналитический инструмент, который увязывает минералогические особенности сырья с реальной динамикой работы оборудования. Его использование позволяет объективно оценить энергоэффективность существующего цикла и обоснованно подойти к выбору режимов при модернизации фабрики.

Характеристика объекта исследования. Более чем вековая отработка рассматриваемого Кочкарского золоторудного месторождения в России обеспечила солидный задел в изучении его минералогии и технологических параметров [11; 12]. Рудная залежь здесь представлена преимущественно метасоматическими образованиями (в среде горняков их традиционно именуют «табашками»), которые неоднородно пропитаны прожилковым кварцем, несущим вкрапленность пирита и арсенопирита.

Прежние изыскания подтверждают, что в геологическом строении Кочкарского золоторудного узла участвуют породы, существенно различающиеся по вещественному составу. В пределах самого месторождения рудные интервалы характеризуются неоднородным внутренним строением и представлены разновидностями с отличающимися текстурно-структурными признаками. Учитывая эту неоднородность, при формировании актуальной технологической схемы был выполнен детальный анализ минералогических особенностей и обогатительных характеристик образцов из тех рудных тел, которые вовлечены в эксплуатацию на современном этапе [13; 14].

При этом оценка перерабатываемого сырья проводилась дифференцированно: отдельному изучению подверглись пробы, относящиеся как к категории кондиционных (балансовых) руд, пригодных для рентабельной переработки, так и к некондиционным (забалансовым) запасам. Такой раздельный подход продиктован необходимостью не только определить границы экономической целесообразности, но и выявить потенциальные технологические риски, связанные с присутствием трудноизвлекаемого золота или вредных примесей в каждой из групп. Результаты этих испытаний лягут в основу корректировки режимов дробления, измельчения и флотации, что позволит минимизировать потери ценного компонента и обеспечить стабильность показателей извлечения даже при переменчивом качестве поступающей рудной массы.

Краткая характеристика мельниц полусамоизмельчения. Главная особенность работы МПСИ – дозированная добавка мелющих тел (не более 10% объёма), тогда как основное разрушение породы происходит за счёт взаимного соударения кусков руды. Такая схема полусамоизмельчения даёт тройной выигрыш: снижает энергопотребление на стадии подготовки класса 300–100 мкм по сравнению с классической связкой «дробилка + шаровая мельница», сокращает число единиц оборудования и затраты на его обслуживание, а также сразу выдаёт водно-рудную пульпу, удобную для флотации или цианирования, без лишнего пыления. В итоге это решение обеспечивает надёжную основу для высокопроизводительной переработки больших объёмов сырья с выходом на финальные обогатительные операции.

Результаты

В рамках работы сформирован подход к организации энергетического аудита стадии рудоподготовки, где ключевую роль играют мельницы полусамоизмельчения. Предложена последовательная схема обработки экспери-

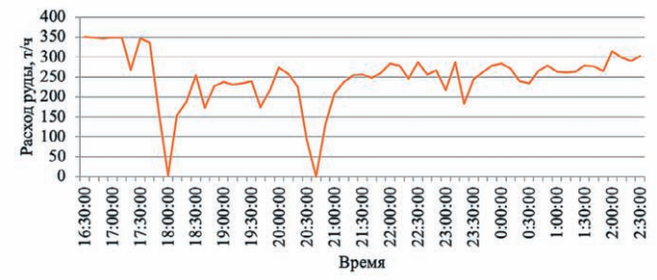


Рис. 1
Изменение производительности мельницы полусамоизмельчения по руде в рабочем режиме

Fig. 1
Changes in ore throughput of a semi-autogenous grinding mill in the operating mode

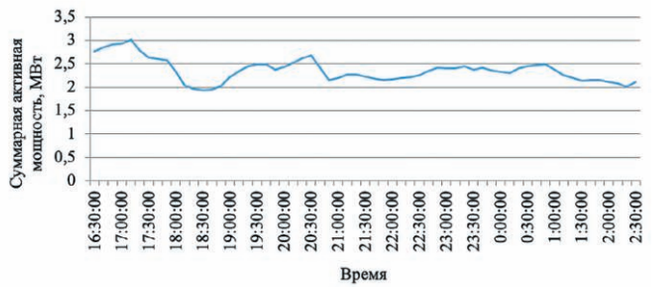


Рис. 2
Динамика изменения активной мощности мельницы полусамоизмельчения

Fig. 2
Dynamics of changes in the active power of a semi-autogenous grinding mill

ментальных данных, полученных по репрезентативным массивам замеров как электрических величин (ток, напряжение, мощность), так и технологических показателей (производительность, крупность питания и разгрузки, плотность пульпы) [15; 16].

Замеры энергопотребления выполнялись в распределительном устройстве напряжением 6 кВ. От данного РУ запитаны все основные технологические переделы, однако в числе наиболее затратных по электроэнергии агрегатов выделяются две мельницы полусамоизмельчения МПСИ 7,0×5,2. Каждая из этих машин характеризуется одинаковыми номинальными электрическими параметрами: установленная мощность принимается равной расчётной и составляет 4000 кВт, а рабочий ток в номинальном режиме достигает 467 А. Такие величины предопределяют необходимость тщательного контроля именно этих присоединений, поскольку даже незначительное отклонение режима их работы даёт наибольшую абсолютную погрешность в общем балансе фабрики.

Измерения на указанных ячейках проводились с целью фиксации фактических нагрузочных профилей в течение полного рабочего цикла – от пусковых операций до установившегося режима и останова. При этом регистрировались не только средние значения мощности и тока, но и пиковые броски, возникающие при загрузке свежей рудой и перераспределении мелющих тел внутри барабана. Сопоставление полученных осциллограмм с паспортными данными позволило оценить степень загрузки каждого трансформатора и кабельной линии, а также выявить рассогласование между активной мощностью, потребляемой приводным двигателем, и фактической механической работой на валу мельницы.

В дальнейшем эти данные были интегрированы в общий энергетический паспорт участка, где отдельно выделены затраты на холостой ход, технологически необходимую загрузку и потери в подводящих сетях. Полученные распределения легли в основу расчёта удельных показателей на тонну переработанной руды, что позволило дифференцированно подойти к нормированию энергозатрат для каждой из двух мельниц и обосновать возможные корректировки режимов их эксплуатации в зависимости от твёрдости поступающего сырья.

На рис. 1 представлен временной ход объёма перерабатываемой руды в интервале с 16:30 до 2:30, построенный по данным, зафиксированным автоматизированной системой коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ). Из приведённой кривой отчётливо видно, что подача материала на мельницу дважды кратковременно прекращалась – с 17:55 по 18:05 и с 20:35 по 20:45, причём каждый перерыв длился ровно по 10 минут. Для сопоставления на рис. 2 размещён график изменения активной мощности того же агрегата МПСИ, синхронизированный по тем же временным меткам.

Если наложить графики друг на друга, становится заметно, что остановки подачи руды далеко не всегда сопровождаются пропорциональным падением электрической нагрузки. В первом случае (17:55–18:05) мощность снизилась незначительно, так как мельница продолжала перемалывать оставшуюся в барабане массу, тогда как во втором промежутке (20:35–20:45) последовало более глубокое проседание активной мощности – это указывает на то, что к тому моменту объём внутрибарабанного материала был существенно меньше, и агрегат частично работал вхолостую. Подобное расхождение свидетельствует о том, что простои системы подачи не всегда эквивалентны пропорциональной экономии электроэнергии, поскольку основная масса энергозатрат приходится на поддержание вращения тяжёлого барабана с загрузкой.

На основе этого анализа можно предложить следующий практический вывод: для повышения энергоэффективности целесообразно при краткосрочных остановках дозатора переводить двигатель в режим пониженной частоты вращения или использовать накопительный бункер-буфер, который сглаживал бы перерывы в питании. Кроме того, выявленные провалы дают повод пересмотреть алгоритм работы системы АСКУЭ, добавив в неё событийную логику – автоматическую маркировку временных участков с отсутствием подачи, чтобы при последующей обработке данных эти интервалы исключались из расчёта средних удельных показателей, не искажая реальную картину энергопотребления в штатном режиме.

Обсуждение результатов

В ходе энергетического обследования узла измельчения Кочкарского золоторудного месторождения был выполнен комплексный анализ работы мельницы полусамоизмельчения МПСИ 7000×5200. Замеры электрических параметров в распределительном устройстве 6 кВ и синхронизация их с данными о производительности позволили выявить ключевые закономерности энергопотребления.

Установлено, что подача руды на мельницу характеризуется неритмичностью, с двумя задокументированными

10-минутными остановками. Анализ показал слабую корреляцию между массовым расходом сырья и активной мощностью агрегата (коэффициент корреляции ~0,25). Это указывает на то, что основная доля энергозатрат приходится на поддержание вращения тяжелого барабана и работу вспомогательного оборудования, а не на процесс измельчения как таковой. Среднее значение удельного расхода электроэнергии, рассчитанное после исключения периодов простоев, составило 1,01 кВт·ч/т, при этом разброс значений от 0,67 до 2,84 кВт·ч/т свидетельствует о высокой чувствительности показателя к изменению крупности и вещественного состава руды.

Полученные результаты подтверждают, что традиционные подходы к нормированию энергозатрат, основанные только на производительности, являются недостаточно точными. Выявленная инерционность процесса требует пересмотра стратегии управления: краткосрочные остановки питателя не приводят к пропорциональной экономии электроэнергии, но создают нестабильность, которая искажает общую картину энергопотребления. Для повышения эффективности предлагается использовать частотное регулирование для снижения оборотов в периоды недогрузки и внедрение систем прогнозной аналитики на основе машинного обучения. Такой подход позволит не только снизить удельный расход энергии на 10–15%, но и перейти от разовых аудитов к системе непрерывного мониторинга и адаптивной настройки режимов.

Заключение

По итогам проведённого наблюдения и обработки зарегистрированных массивов данных можно заключить следующее:

1. В интервале мониторинга с 16:30 до 2:30 зафиксирована неритмичность поступления руды на питание мельницы МПСИ 7,0×5,2 – две полных остановки подачи продолжительностью по 10 мин каждая (в 17:55–18:05 и 20:35–20:45).

2. Связь между массовым расходом сырья и активной мощностью агрегата выражена слабо (коэффициент корреляции около 0,25). Это объясняется, во первых, инерционностью процесса – даже при обрыве питания двигатель продолжает нести нагрузку, связанную с домолом остаточной руды; во вторых, тем, что измеряемая мощность включает расход на вспомогательное оборудование участка (шаровые мельницы, насосы и др.), а не только на привод МПСИ.

3. Усреднённое значение удельного расхода электроэнергии на тонну измельчённого материала, рассчитанное после исключения интервалов простоев, составляет 1,01 кВт·ч/т. При этом размах колебаний показателя от 0,67 до 2,84 кВт·ч/т указывает на чувствительность удельных затрат к изменению крупности питания и вещественного состава руды, что требует регулярной корректировки режима.

4. Применяемый частотный преобразователь ПЧ SB57 4250H обеспечивает управляемый разгон и торможение синхронного двигателя, переходные характеристики подтверждают его надежность и позволяют гибко изменять скорость вращения при изменении условий загрузки.

5. Для повышения энергоэффективности первоочередное внимание следует уделять сокращению длительности холостых ходов и оптимизации загрузки мелющими телами, а полученное значение 1,01 кВт·ч/т предлагается использовать в качестве отправной точки для дальнейших нормативных расчётов и сравнения при смене сорта руды.

Список литературы / References

1. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*. 2014;880:141–145. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141
2. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: methodological aspect. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:912–916. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912
3. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region. *The Social Sciences*. 2015;10(6):746–749. Available at: https://makhillpublications.co/view-article/1818-5800/sscience.2015.746.749 (accessed: 09.03.2026).
4. Malozyomov B.V., Golik V.I., Brigida V., Kukartsev V.V., Tynchenko Y.A., Boyko A.A., Tynchenko S.V. Substantiation of drilling parameters for undermined drainage boreholes for increasing methane production from unconventional coal-gas collectors. *Energies*. 2023;16(11):4276. https://doi.org/10.3390/en16114276
5. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б. Снижение потерь полезного ископаемого при разработке калийных пластов на больших глубинах. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2025;17(4):1852–1862. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-4-1852-1862
Kovalsky E.R., Kongar-Syuryun Ch.B. Reduction of mineral losses in the development of potash seams at great depth. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025;17(4):1852–1862. (In Russ.) https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-4-1852-1862
6. Баловцев С.В., Меркулова А.М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(3):170–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170
Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(3):170–181. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170

7. Zhao X., Yang Y., Sun F., Wang B., Zuo Y., Li M. et al. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high coal rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province. *Petroleum Exploration and Development*. 2016;43(2):332–339. https://doi.org/10.1016/S1876-3804(16)30039-8

8. Шадрунова И.В., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(2):43–57. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43
Shadrunova I.V., Kolodezhna E.V., Gorlova O.E. Dry processing technology for fluorite ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(2):43–57. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43

9. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Qi M. Mathematical modeling of mechanical forces and power balance in electromechanical energy converter. *Mathematics*. 2023;11(10):2394. https://doi.org/10.3390/math11102394

10. Wang M., Wang X., Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni–Mo ore. *Hydrometallurgy*. 2009;97(1-2):126–130. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.12.004

11. Евдокимов С.И., Клыкова К.Ю., Рубаева Ия.О., Стадник Д.А. Технология использования чернового концентрата в качестве минералов-носителей. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):568–580. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580
Evdokimov S.I., Klykova K.Yu., Rubayeva I.O., Stadnik D.A. Technology of using rough concentrate as carrier minerals. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):568–580. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580

12. Клюев Р.В. Обоснование решений по совершенствованию вентиляторных установок и подъемных машин на основе оценки энергоэффективности их работы в условиях реконструкции рудника «Молибден». *Горные науки и технологии*. 2025;10(1):84–94. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362
Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2025;10(1):84–94. https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-10-362

13. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):142–150. https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150
Zhukov I.A., Golikov N.S., Martyushev N.V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):142–150. (In Russ.). https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150

14. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Y. et al. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023;15(15):11671. https://doi.org/10.3390/su151511671

15. Клюев Р.В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината. *Горная промышленность*. 2024;(5S):105–109. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109
Klyuev R.V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):105–109. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109

16. Клюев Р.В. Анализ технологических и энергетических параметров шаровых мельниц. *Горная промышленность*. 2024;(6):107–110. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110
Klyuev R.V. Analysis of technological and energy parameters of ball mills. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):107– 110. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110

Информация об авторе
Клюев Роман Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления, Московский политехнический университет, Российская Федерация; https://orcid.org/0000-0003-3777-7203; e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Information about the author
Roman V. Klyuev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0003-3777-7203; e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 05.06.2026
Поступила после рецензирования: 01.07.2026
Принята к публикации: 06.07.2026

Article info
Received: 05.06.2026
Revised: 01.07.2026
Accepted: 06.07.2026