

# Комплекс программных сервисов для управления эффективностью эксплуатации электрического привода горно-транспортного комплекса

А.Д. Булдыско✉, Ю.Л. Жуковский

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
✉ Buldysko\_AD@pers.spmi.ru

**Резюме:** В статье представлены свойства, признаки и требования к реализации алгоритмов, необходимых для обеспечения перехода к системе предсказательного технического обслуживания электропривода в горно-транспортном комплексе для управления эффективностью эксплуатации оборудования. Разработан комплекс алгоритмов и программных сервисов на их основе, который позволяет реализовать предсказательную систему обслуживания для повышения эффективности эксплуатации электропривода. Обоснована комплексная структура программных сервисов процесса управления эксплуатацией электропривода, в которой учитываются в качестве критериев принятия решений дополнительные потери электроэнергии, обусловленные наличием дефектных узлов, и эквивалентные выбросы электрического привода и приводного механизма. Определены критерии управления, диагностические параметры и алгоритмы, необходимые для диагностики и прогнозирования развития дефектов, определяющих эффективность эксплуатации электропривода в горно-транспортном комплексе.

**Ключевые слова:** электрический привод, цифровые технологии, машинное обучение, предиктивное обслуживание, энергетическая эффективность

**Для цитирования:** Булдыско А.Д., Жуковский Ю.Л. Комплекс программных сервисов для управления эффективностью эксплуатации электрического привода горно-транспортного комплекса. *Горная промышленность*. 2025;(1S):41–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-41-46>

## Integrated management services for electromechanical mining equipment efficiency

A.D. Buldysko✉, Yu.L. Zhukovskiy

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation  
✉ Buldysko\_AD@pers.spmi.ru

**Abstract:** The paper presents functional features, properties and requirements for implementation of the algorithms necessary to ensure the transition to the predictive maintenance system for electric drives of the mining transport machines to manage the efficiency of equipment operation. A set of algorithms based on artificial intelligence has been developed, which allows the transition to the predictive maintenance system to improve the efficiency of the drive operation. The complex structure of software services for electric drive operation control has been justified, in which additional power losses due to defective components as well as equivalent emissions of the electric drive and the drive mechanism are taken into account as the decision-making criteria.

The paper defines the control criteria, diagnostic parameters and algorithms required for diagnostics and prediction of defects development that determine the efficiency of electric drive operation in the mining and transportation sector.

**Keywords:** electric drive, digital technologies, machine learning, predictive maintenance, energy efficiency

**For citation:** Buldysko A.D., Zhukovskiy Yu.L. Integrated management services for electromechanical mining equipment efficiency. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):41–46. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-41-46>

### Введение

Горная отрасль зависит от энергии ископаемого топлива, однако стремление к снижению воздействия на окружающую среду диктует необходимость все большей электрификации, которая основывается на применении электрического привода [1,2]. Поэтомупоказатели, связанные

с экологичностью, безопасностью, экономической и энергетической эффективностью, становятся приоритетными [3]. Потребление электрического привода обуславливает до 70% электроэнергии на ГП, поэтому он играет существенную роль в энергетической и экологической эффективности, а также устойчивости функционирования горных пред-

приятый [4]. Учитывая тренд цифровой трансформации, а также рост спроса и стоимости на минерально-сырьевые ресурсы, актуальным является поиск новых способов управления эффективностью эксплуатации электропривода (ЭП) в горнотранспортном комплексе (ГТК) [5, 6].

Еще одной особенностью роста применения электроприводных систем является их существенная роль в высокоавтоматизированных промышленных процессах при добыче полезных ископаемых в отдаленных территориях. Однако при этом непредсказанная поломка ЭП приводит к потерям энергии и ресурсов, угрозе безопасной и эффективной эксплуатации, а также тяжелым авариям. В структуре ряда оборудования ГТК потребление электроэнергии автоматизированным электроприводом достигает 98% [7, 8]. Поэтому актуальными являются поиск и обоснование новых способов диагностики, применения цифровых моделей и интеллектуальных алгоритмов, позволяющих перейти к предсказательному техническому обслуживанию (ПТОиР) [9–11].

Критерием принятия решения о технических воздействиях на ЭП ГТК являются критические значения наблюдаемых параметров оборудования, оценка энергетических затрат при этом не проводится. Эффективность принятых решений по управлению техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) необходимо рассматривать как в диапазоне оперативных планов, так и на более длительном промежутке, учитывая длительный срок эксплуатации, при сравнении стоимости ремонта и затрачиваемой энергии (рис. 1). ЭП на этапе эксплуатации, помимо энергии, требует большого количества природных ресурсов, таких как материалы с постоянными магнитами, железо, медь и др., что требует оценки воздействия ремонта и обслуживания на экологические и энергетические затраты [12], поскольку на этап эксплуатации выпадает до 90% всех энергетических затрат жизненного цикла ЭП.

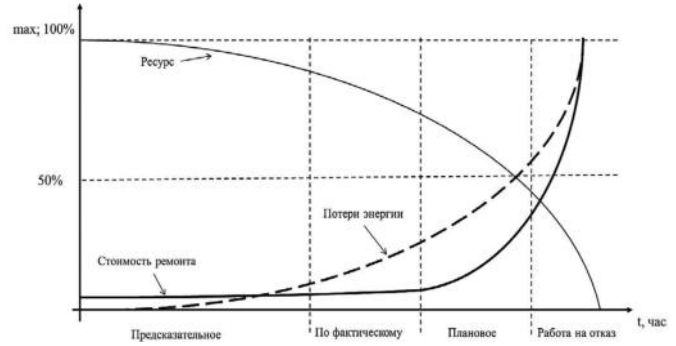
Для перехода к ПТОиР определим комплекс наблюдаемых диагностических и эксплуатационных параметров, которые необходимо собирать с определенной частотой, накапливать и анализировать [13, 14], учитывая специфику тяжелых условий ГП и ограниченного доступа ЭП. Выявление вида дефекта на ранней стадии и прогнозирование уровня его развития основываются на полученных сигналах, экспертных системах и статистической обработке данных параметров различной физической природы, в том числе основанной на применении алгоритмов машинного обучения [15, 16].

Комплекс алгоритмов должен с учетом критериев эффективности реализовывать возможность оптимизации как времени воздействия, так и вида воздействия, а также обеспечить выявление новых видов и классов дефектов. Для этого необходим комплекс методов, алгоритмов, структур информационных потоков и критериев управления (табл. 1) [9].

**Описание разработанных методов**

Одной из ключевых особенностей в ПТОиР является возможность определить временной промежуток, когда оборудование требует замены, на основании составленного заранее плана использования, в котором будет определен момент роста эксплуатационных расходов с учетом объема и стоимости потерь электроэнергии и эквивалентных выбросов [17].

Для этого сформирована концепция комплекса программных сервисов, образующая целостную систему управления эффективностью эксплуатации, которая осно-



**Рис. 1**  
**Сравнение видов систем технического обслуживания и ремонта, стоимости ремонта оборудования и потерь энергии, обусловленных деградацией электропривода (в рис 1, ч)**

**Fig. 1**  
**A comparison of different types of maintenance and repair systems, equipment repair costs and energy losses due to the electric drive degradation**

**Таблица 1**  
**Функциональные свойства комплекса алгоритмов**

**Table 1**  
**Functional properties of the set of algorithms**

Функциональные свойства	Реализация комплекса алгоритмов в составе предсказательного технического обслуживания
Прогнозирование временных рядов	Возможно прогнозирование как отдельных, так и комплекса диагностических параметров
Необходимость сбора больших объемов данных	Необходим сбор больших объемов структурированных и неструктурированных данных
Выявление дефектных узлов ЭП	Возможность выявлять дефектный узел ЭП
Выявление дефектных узлов приводного механизма	Возможность выявлять повреждения приводного механизма
Выявление дефектов на ранней стадии	Возможность выявления дефекта до выхода наблюдаемых параметров за критические значения
Установление вероятности неисправного состояния оборудования	На основе полученной информации об эксплуатации, диагностических параметрах, данных мониторинга и др.
Диагностика группы ЭП	Возможность выявления поврежденного оборудования в составе группы
Расчет остаточного ресурса	Статистические методы и машинное обучение
Диагностика оборудования без вывода в ремонт	Возможность диагностики без остановки и вывода оборудования в ремонт
Выявление новых видов и классов дефектов	Возможно выявление новых видов и классов дефектов и состояний
Необходимость физического описания возникновения дефекта	Нет необходимости наличия математических моделей
Принятие решения об объеме технического воздействия	Возможность корректировки объемов технического обслуживания и ремонта

**Таблица 2**  
 Связь диагностируемых параметров и дефектов на примере асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

**Table 2**  
 Correlations between the tested parameters and defects using a squirrel-cage induction motor as a case study

Диагностируемый параметр	Повреждение изоляции обмотки относительно корпуса	Повреждение межфазной изоляции	Межвитковые замыкания	Дефект обмотки статора	Короткие замыкания в обмотке статора	Дефекты обмотки ротора	Повреждения подшипников	Обрыв стержней ротора	Повреждение магнитопровода ротора	Повреждение магнитопровода статора	Динамический эксцентриситет	Статический эксцентриситет	Дефект контактных соединений	Ослабление креплений	Режимы работы приводного механизма	Дефекты приводного механизма
Действующие и амплитудные значения тока и напряжения	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Параметры качества электроэнергии	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
Спектр тока	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Спектр напряжения	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-
Спектр мощности	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Динамический коэффициент мощности	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	-	-
Величина потерь мощности	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
Изменение потерь мощности	-	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+
Коэффициент гармоник (тока и мощности)	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Анализ времени пуска	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-
Анализ момента	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+



**Рис. 2**  
 Концептуальная модель управления эффективностью эксплуатации

**Fig. 2**  
 A conceptual model to control the operating efficiency

вана на комплексе методов, позволяющих обнаружить все виды дефектов [18]. Оценка технического состояния производится на основе многофакторного анализа комплекса параметров (табл. 2) <sup>1</sup>.

При управлении эффективностью необходима информа-

ция, позволяющая обеспечить эффективность процессов и принятие решений по управлению ТОиР. Взаимосвязанные программные алгоритмы в составе комплексной системы управления эффективностью эксплуатации позволяют сравнить затраты, отнесенные к ЭП ГТК, путем установления всех потоков энергии и материалов на основе получаемой информации. Модель управления эффективностью эксплуатации можно разделить на три взаимодейству-

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 17359-2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство». Режим доступа: <http://mvr-company.ru/wp-content/uploads/yootheme/demo/PDF/gost-r-iso-17359-2015-obshchee-rukovodstvo.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).

**Таблица 3**  
**Функциональные свойства разработанных алгоритмов для предсказательного технического обслуживания**

**Table 3**  
**Functional properties of the developed predictive maintenance algorithms**

Наименование алгоритмов	Характеристика прогноза параметров	Прогнозирование остаточного ресурса	Определение критической стадии дефекта	Определение ранней стадии дефекта
Поиск и определение характерных частот в спектре сигнала	Глубина прогноза определяется временем дискретизации, частотой записи матриц мгновенных токов, напряжений и вычислительным временем работы алгоритма	–	+	+
Оценка технического состояния ЭП ГТК		–	+	+
Программный датчик для обнаружения дефекта узлов		–	+	+
Обнаружение дефекта узлов на ранней стадии методом сингулярного разложения тока статора	Глубина прогноза определяется временем дискретизации, частотой записи матриц мгновенных фазных токов и вычислительным временем работы алгоритма	–	+	+
Определение группового состояния электропривода в узлах нагрузки		–	+	+
Алгоритм управления режимами работы на основе нейросетевого диагностирования неисправностей ЭП	Глубина прогноза определяется частотой дискретизации датчиков контролируемых параметров, требует эталонных режимных состояний ЭП	+ (недели)	–	–
Вероятностный метод оценки технического состояния	Суточный остаточный ресурс ЭП	+ (месяц)	–	–
Алгоритмы разложения временных рядов	Глубина прогноза определяется временем вычислений для разложения временных рядов мгновенных фазных токов	–	+	+

**Таблица 4**  
**Эффекты и средства реализации комплекса программных сервисов**

**Table 4**  
**Effects and means for implementation of the set of software services**

Эффекты	Сервисы
Уменьшение времени интеграции алгоритмов, повышение качества прогнозирования	Формирование синтетических данных
Снижение количества внезапных остановок, снижение рисков аварий, повышение безопасности эксплуатации	Мониторинг диагностических параметров
Возможность обнаружения новых классов дефектов, повышение качества прогнозирования	Формирование цифровых моделей
Повышение качества прогнозирования, повышение точности диагностики	Обнаружение аномалий и пополнение базы данных
Снижение вредных выбросов, затрат на ТОиР, повышение качества прогнозирования и энергетической эффективности	Обнаружение ранней стадии развития дефектов
Увеличение доступности данных	Сбор первичных данных для анализа диагностических параметров
Повышение качества, безопасности и снижение времени ТОиР	Дополненная реальность
Снижение затрат на ТОиР, снижение числа поломок, снижение вредных выбросов	Прогнозирование развития дефектов
Повышение качества прогнозирования	Обнаружение и восполнение недостающих данных

ющих уровня: уровень оборудования, уровень системы и уровень комплекса систем (рис. 2) [19]. Технические характеристики, цифровые модели, данные и другая информация в реальном времени передаются в программные алгоритмы, реализующие математические модели для моделирования и формирования прогнозов; в свою очередь, данные виртуальных моделей используются для управления эксплуатацией ЭП ГТК. В процессе двустороннего вза-

имодействия физического ЭП ГТК и виртуальных моделей происходит повышение эффективности как виртуальных моделей, так и процессов, связанных с эксплуатацией реального оборудования. Для обеспечения этого процесса необходимы уровни сервисов и данных. Именно комплекс сервисов и данных отвечает за повышение экономической, энергетической и экологической эффективности в процессе эксплуатации электрифицированных объектов ГТК.



**Практическое применение полученных результатов**

В табл. 3 представлен разработанный в рамках исследования комплекс алгоритмов, позволяющих реализовать функциональные признаки ПТОиР независимо от количества ЭП, условий и специфики работы ГТК, на основе измерений температуры, вибрации, электрических параметров и собранных данных технологического процесса. В табл. 4 сопоставлены эффекты, получаемые при реализации комплекса сервисов, необходимых для обеспечения перехода к системе предсказательного ТОиР.

**Заключение**

Разработан комплекс программных алгоритмов на основе средств искусственного интеллекта, позволяющий

перейти к ПТОиР для повышения эффективности эксплуатации ЭП ГТК горных предприятий. Обоснована комплексная структура программных сервисов процесса управления эксплуатацией ЭП ГТК, в которой учитываются в качестве критериев принятия решений дополнительные потери электроэнергии, обусловленные наличием дефектных узлов, и эквивалентные выбросы электрического привода и приводного механизма. Определены критерии управления, диагностические параметры и алгоритмы, необходимые для диагностики и прогнозирования развития дефектов, определяющих эффективность эксплуатации ЭП в ГТК.

**Вклад авторов**

**А.Д. Булдыско** – проведение исследования, подготовка и редактирование текста.

**Ю.Л. Жуковский** – разработка концепции, утверждение окончательного варианта статьи.

**Authors' contribution**

**A.D. Buldysko** – conducting the research, preparation and editing of the text.

**Yu.L. Zhukovskiy** – development of the concept, approval of the final version of the article.

**Список литературы / References**

1. Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector. *Energy Reports*. 2021;7:2664–2680. <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2021.05.001>
2. Simsek Y., Santika W.G., Anisuzzaman M., Urmee T., Bahri P.A., Escobar R. An analysis of additional energy requirement to meet the sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. 2020;272:122646. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122646>
3. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Molodtsov K.V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*. 2020;(1):36–41. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.07>
4. Beloglazov I., Plaschinsky V. Development MPC for the Grinding Process in SAG Mills Using DEM Investigations on Liner Wear. *Materials*. 2024;17(4):795. <https://doi.org/10.3390/ma17040795>
5. Safiullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e18744478309909. <https://doi.org/10.2174/0118744478309909240807051315>
6. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Yu., Makarov A.A. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system. *World Electric Vehicle Journal*. 2024;15(8):365. <https://doi.org/10.3390/wevj15080365>
7. Сержан С.Л., Скребнев В.И., Малеванный Д.В. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы. *Обогащение руд*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>  
Serzhan S.L., Skrebnev V.I., Malevanny D.V. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport. *Obogashchenie Rud*. 2023;(4):41–49. <https://doi.org/10.17580/or.2023.04.08>
8. Васильев Б.Ю. Энергосберегающий многодвигательный электропривод с индивидуальным управлением приводными двигателями и активной коррекцией коэффициента мощности. *Автоматизация в промышленности*. 2017;(3):43–49. Режим доступа: <https://avtprom.ru/article/energoberegayushchii-mnogodviga> (дата обращения: 17.10.2024).  
Vasiliev B.Yu. Energy-saving multi-motor electric drive with individual control of the drive motors and active power factor correction. *Automation in Industry*. 2017;(3):43–49. (In Russ.) Available at: <https://avtprom.ru/article/energoberegayushchii-mnogodviga> (accessed: 17.10.2024).
9. Николаев А.В., Фёт Ш., Кычкин А.В. Использование кибернетического подхода к ценозависимому управлению спросом на потребляемую подземным горно-добывающим предприятием электроэнергию. *Записки Горного института*. 2023;261:403–414. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.33>  
Nikolaev A.V., Vöth S., Kychkin A.V. Application of the cybernetic approach to price-dependent demand response for underground mining enterprise electricity consumption. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:403–414. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.33>
10. Shushpanov I., Suslov K., Ilyushin P., Sidorov D.N. Towards the flexible distribution networks design using the reliability performance metric. *Energies*. 2021;14(19):6193. <https://doi.org/10.3390/en14196193>

11. Botyan E.Y., Lavrenko S.A., Pushkarev A.E. Evaluation of Complicated Mining Exploitation Conditions Influence on Service Life of Open Pit Trucks Suspensions with Remote Monitoring Systems. *International Journal of Engineering*. 2024;37(11):2268-2275. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.11b.12>
12. Кулешов А.А., Григорьев Е.А. Прогнозирование ресурса элементов погрузочно-доставочных машин на основе определения их эксплуатационной нагруженности. *Записки Горного института*. 2002;152:169–172. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9360> (дата обращения: 17.10.2024).  
Kuleshov A.A., Grigorev E.A. Forecasting the service life of loading and unloading machine elements on the basis of determining their operational load. *Journal of Mining Institute*. 2002;152:169–172. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/9360> (accessed: 17.10.2024).
13. Матюшин В.А. Автоматизация управления эксплуатацией и ремонтом оборудования горного предприятия (на примере Восточного рудника ОАО «Апатит»). *Записки Горного института*. 2008;177:7–11. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7233> (дата обращения: 17.10.2024).  
Matyushin V.A. Automation of management of operation and repair of the equipment of the mining enterprise (on the example of the eastern mine of OJSC Apatit). *Journal of Mining Institute*. 2008;177:7–11. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/7233> (accessed: 17.10.2024).
14. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Сорокин К.В. Метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов на основе контрольных карт Шухарта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(7):111–124. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_7\\_0\\_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111)  
Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V. Assessment and prediction of technical condition of dump truck life components using the Shewhart control charts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(7):111–124. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_7\\_0\\_111](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111)
15. Котелева Н.И., Вальнев В.В., Королев Н.А. Технология дополненной реальности как средство технического обслуживания оборудования металлургических производств. *Цветные металлы*. 2023;(4):14–23. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.02>  
Koteleva N.I., Valnev V.V., Korolev N.A. Augmented reality as a means of metallurgical equipment servicing. *Tsvetnye Metally*. 2023;(4):14–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.02>
16. Nevskaya M., Shabalova A., Kosovtseva T., Nikolaychuk L. Applications of simulation modeling in mining project risk management: criteria, algorithm, evaluation. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024;8(8):5375. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i8.5375>
17. Mitchell Jr Z.W. *A statistical analysis of construction equipment repair costs using field data and the cumulative cost model* [Dissertation]. Virginia Polytechnic Institute and State University; 1998. 253 p. Available at: [https://archive.org/details/DTIC\\_ADA346875/mode/2up](https://archive.org/details/DTIC_ADA346875/mode/2up) (accessed: 17.10.2024).
18. Сычев Ю.А., Аладин М.Е. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 023;(11):159–181. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_159](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_159)  
Sychev Y.A., Aladin M.E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11):159–181. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_159](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_159)
19. Qi Q., Tao F., Zuo Y., Zhao D. Digital twin service towards smart manufacturing. *Procedia CIRP*. 2018;72:237–242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>

#### **Информация об авторах**

**Булдыско Александра Дмитриевна** – кандидат технических наук, ассистент, Образовательный центр цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [Buldysko\\_AD@pers.spmi.ru](mailto:Buldysko_AD@pers.spmi.ru)

**Жуковский Юрий Леонидович** – доктор технических наук, директор образовательного центра цифровых технологий, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

#### **Информация о статье**

Поступила в редакцию: 13.01.2025

Поступила после рецензирования: 11.02.2025

Принята к публикации: 12.02.2025

#### **Information about the authors**

**Aleksandra D. Buldysko** – Cand. Sci. (Eng.), Assistant, Educational Research Center for Digital Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: [Buldysko\\_AD@pers.spmi.ru](mailto:Buldysko_AD@pers.spmi.ru)

**Yuriy L. Zhukovskiy** – Dr. Sci. (Eng.), Director Educational Research Center for Digital Technologies, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

#### **Article info**

Received: 13.01.2025

Revised: 11.02.2025

Accepted: 12.02.2025