

УДК 621.8

EDN: KJQYBE

Витренко В. А., *Креселюк Ю. В.*Луганский государственный университет имени Владимира Даля**E-mail: yurakreselyuk@mail.ru*

КОНТРОЛЬ ИЗНОСА ЗУБОРЕЗНОГО ДОЛБЯКА В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В статье предложен способ контроля износа зуборезного долбяка в процессе нарезания зубчатых колес. Контроль долбяка осуществляется с помощью магнитного датчика. Приведены геометрические параметры датчика и долбяка, использовавшиеся при проведении эксперимента. Анализируя данные амплитуды сигнала датчика, можно определять состояние зуборезного долбяка, что дает возможность оперативно выявлять износ и своевременно принимать решение о необходимости заточки.

Ключевые слова: долбяк, зубчатое колесо, магнитный датчик, магнитное поле, осциллограмма.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Зуборезный долбяк — это зубчатое режущее колесо с модулем, равным модулю нарезаемого колеса, каждый зуб которого имеет передний и задний углы, преобразованные в режущий инструмент [1]. При резании долбяк совершает движения вдоль своей оси, поэтому каждый зуб играет роль резца.

Проверка параметров зуборезного долбяка происходит за счет измерения линейных размеров, углов, контроля формы и расположения поверхностей. Угол наклона зубьев долбяка должен равняться углу наклона зубьев нарезаемого колеса [2]. Для колес наружного зацепления направление наклона зубьев долбяка должно быть противоположным, для колес внутреннего зацепления — одноименным [3]. Долбяки также проверяют на твердость по ГОСТ 9013-59 [4] или 2999-75 [5] на твердомерах Роквелла или Виккерса. Допускается проверять твердость дисковых долбяков на опорных торцах. Параметры шероховатости поверхностей долбяка проверяют сравнением с образцами шероховатости или с образцовыми инструментами, сравнение осуществляют визуально с помощью лупы.

Контроль зуборезного долбяка регламентируется ГОСТ 10059-80. Основным критерием затупления зуборезного долбяка

является износ по задней поверхности, который не должен превышать 0,2 мм [6].

Постановка задачи. Затупление зуборезного долбяка приводит к ряду негативных последствий, затрагивающих качество обработки и производительность [7]. Среди основных последствий — ухудшение качества поверхности зубьев, а именно появление задиrow, неровностей, снижение класса шероховатости обработанной поверхности, а также нарушение геометрических параметров зубьев. Кроме того, наблюдается рост силовых нагрузок на инструмент и станок. Также происходит снижение производительности из-за необходимости уменьшения сил подачи и скорости резания для сохранения качества. Во время производства происходят частые остановки для контроля качества и переточки инструмента.

Исходя из вышесказанного, контроль зуборезного долбяка при производстве зубчатых колес позволит своевременно выявлять износ и отклонения от нормативных параметров инструмента, предотвращая выпуск некачественной продукции. Повышается общая экономическая эффективность производства за счет сокращения простоев, перделок и затрат на инструмент.

В связи с этим **целью** настоящей работы является разработка способа контроля

параметров зуборезного долбяка при производстве зубчатых колес.

Объект исследования — зуборезные долбяки для нарезания зубчатых колес.

Предмет исследования — закономерность изменения магнитного поля и выходного информационного сигнала при изменении параметров зуборезного долбяка в процессе эксплуатации.

Задачи исследования:

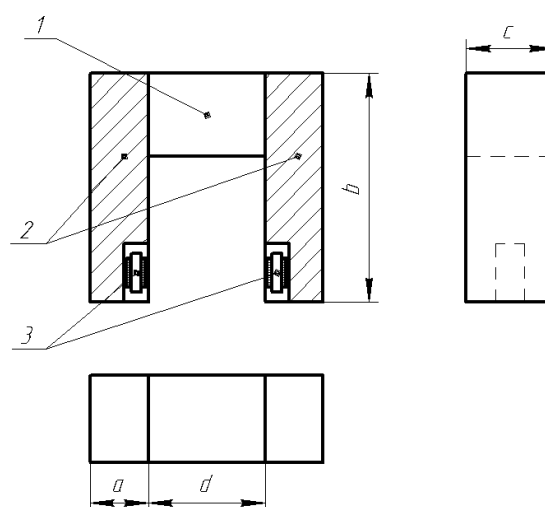
- разработка способа контроля зуборезного долбяка при нарезании зубчатых колес;
- применение магнитного датчика для контроля состояния зуборезного долбяка;
- проведение натурного эксперимента, обработка выходного сигнала датчика при помощи осциллографа и получения выходных данных.

Магнитная диагностика. Магнитная и электромагнитная диагностика — совокупность неразрушающих методов контроля, основанных на анализе магнитных полей и электромагнитных процессов в элементах оборудования. Методы позволяют выявлять дефекты, оценивать состояние материалов и прогнозировать остаточный ресурс без разборки механизмов [8].

Системы магнитной и электромагнитной диагностики в качестве среды, передающей информацию о техническом состоянии объекта, используют магнитное поле.

Для магнитной и электромагнитной диагностики машин и механизмов используются различные типы датчиков [9], например, магнитные датчики с магнитопроводом, магнитные датчики без магнитопровода и датчики с модулятором.

В основном магнитные системы датчиков с магнитопроводом можно разделить на стержневые и П-образные. Датчики используют магниточувствительные преобразователи для получения выходного информационного сигнала, такие как гальваномагнитные элементы или феррозонды. Рассмотрим применение магнитного датчика с П-образным магнитопроводом и постоянным магнитом с феррозондами [10] в качестве магниточувствительных элементов. Конструкция магнитной системы датчика показана на рисунке 1.



1 — постоянный магнит, 2 — стержни, 3 — феррозонды

Рисунок 1 — Конструкция магнитной системы датчика с феррозондами в качестве магниточувствительных элементов

Геометрические параметры датчика напрямую зависят от модуля зуборезного долбяка.

Математическая модель. Способ определения износа зуба зуборезного долбяка — производить анализ значения амплитуд выходного сигнала между двумя соседними амплитудами. Временной интервал между амплитудами, соответствующими двум зубьям, заполняется импульсами, и непрерывно происходит сравнение между двумя соседними «пачками» импульсов по их количеству. Если количество импульсов отличается в $r = n_2/n_1$ раза, где $1,6 < r \leq 2$, то можно фиксировать износ зуба долбяка.

Величина x после дискретизации подается на устройство непрерывного дифференцирования. Передаточная функция непрерывного дифференцирующего звена:

$$W_D(p) = k_0 p, \quad (1)$$

где k_0 — коэффициент пропорциональности. Вход и выход дифференцирующего устройства связаны дифференциальным уравнением

$$y(t) = k_0 \frac{dx}{dt}. \quad (2)$$

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Определим дискретную передаточную функцию дифференцирующего звена. На вход звена поступает непрерывный сигнал $x(t)$. Непрерывный сигнал $x(t)$ можно заменить сигналом, описываемым решетчатой функцией:

$$x[i] = x(t)|_{t=iT_0}, \quad (3)$$

где i — целое число;

T_0 — период дискретизации.

Учитывая, что $T_0 = dt / dq$, получаем

$$x'(t) \approx L_1'(t) = \{x[1] - x[0]\} / T_0,$$

или в общем виде

$$x'(t) = \{x[i] - x[i-1]\} / T_0. \quad (4)$$

Погрешность дифференцирования для разностного уравнения будет

$$k_1'(iT_0) = T_0 x''(\xi) / 2. \quad (5)$$

Применив Z-преобразование к разностному уравнению (4), получим:

$$x'[z] = k_0 x(z) (1 - z^{-1}) / T_0. \quad (6)$$

Тогда дискретная передаточная функция будет иметь вид

$$D(z) = k_0 (1 - z^{-1}) / T = b_0 (1 - z^{-1}), \quad (7)$$

где $b_0 = k_0 / T$.

Сигнал $x'(t)$ будет изменяться по закону

$$\begin{cases} x'[0] = 0 \\ x'[1] = k_0 x[1] / T_0 \\ x'[2] = k_0 \{x[2] - x[1]\} / T_0 \\ \dots \\ x'[n] = k_0 \{x[n] - x[n-1]\} / T_0. \end{cases} \quad (8)$$

Структурная схема программной реализации дискретных передаточных функций показана на рисунке 2.

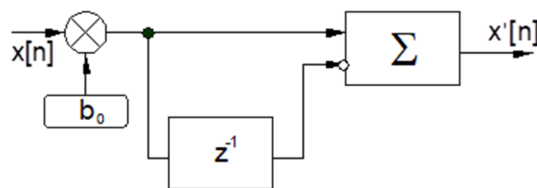


Рисунок 2 — Структурная схема программной реализации дискретных передаточных функций

Натурный эксперимент. Для проведения эксперимента был выбран зуборезный долбяк модулем $m = 4$ мм. Геометрические параметры датчика для контроля данного долбяка: $a = 7$ мм, $b = 16,5$ мм, $c = 7,5$ мм, $d = 11$ мм. Технические характеристики долбяка: наружный диаметр 100 мм, внутренний диаметр 44,45 мм, материал Р6М5, количество зубьев 25 шт.

Блок-схема автоматического контроля износа и необходимости заточки зуборезного долбяка показана на рисунке 3.

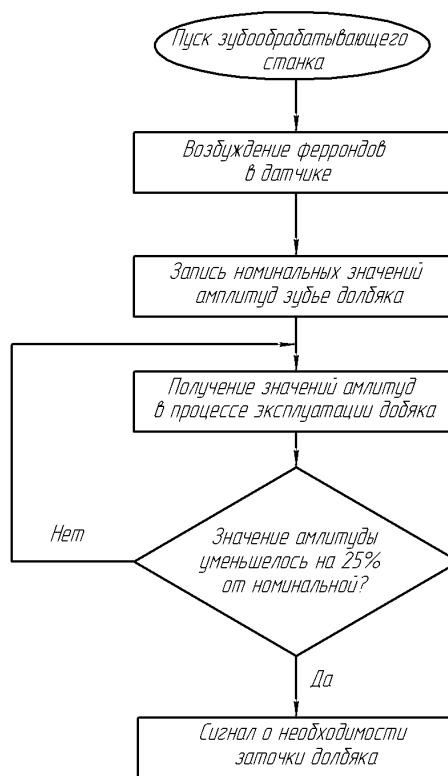


Рисунок 3 — Блок-схема автоматического контроля износа и необходимости заточки зуборезного долбяка

Принцип данного способа контроля состоит в следующем: постоянный магнит создает магнитный поток, который замыкается через П-образный магнитопровод, воздушный зазор и зуб зуборезного долбяка. При движении зуборезного долбяка, за счет изменения воздушного зазора между магнитопроводом и зубом, происходит изменение магнитного поля.

При изменении магнитного поля меняется значение напряженности магнитного поля, что фиксируется феррозондом, и образуется выходной информационный сигнал.

Схема установки магнитного датчика для контроля зуборезного долбяка в процессе нарезания зубчатого колеса показана на рисунке 4.

Выходной сигнал датчика обрабатывается осциллографом (в эксперименте использо-

вался осциллограф фирмы Hantek). С помощью осциллографа происходила обработка выходного сигнала с катушек феррозондов при вращении зуборезного долбяка. Данные осциллографа при прохождении заточенного зуборезного долбяка (рис. 5, а) и изношенного долбяка (рис. 5, б) имеют сигнал синусоидальной формы.

При прохождении заточенного долбяка амплитуда сигнала составляла 2,9 В. При работе долбяка и его дальнейшем износе происходит изменение в магнитном поле из-за изменения воздушного зазора между датчиком и зубом долбяка. При прохождении изношенного долбяка и достижении им критического состояния для нарезания зубчатых колес амплитуда сигнала составляла 2,1 В, что на 28 % меньше, чем от сигнала заточенного долбяка.

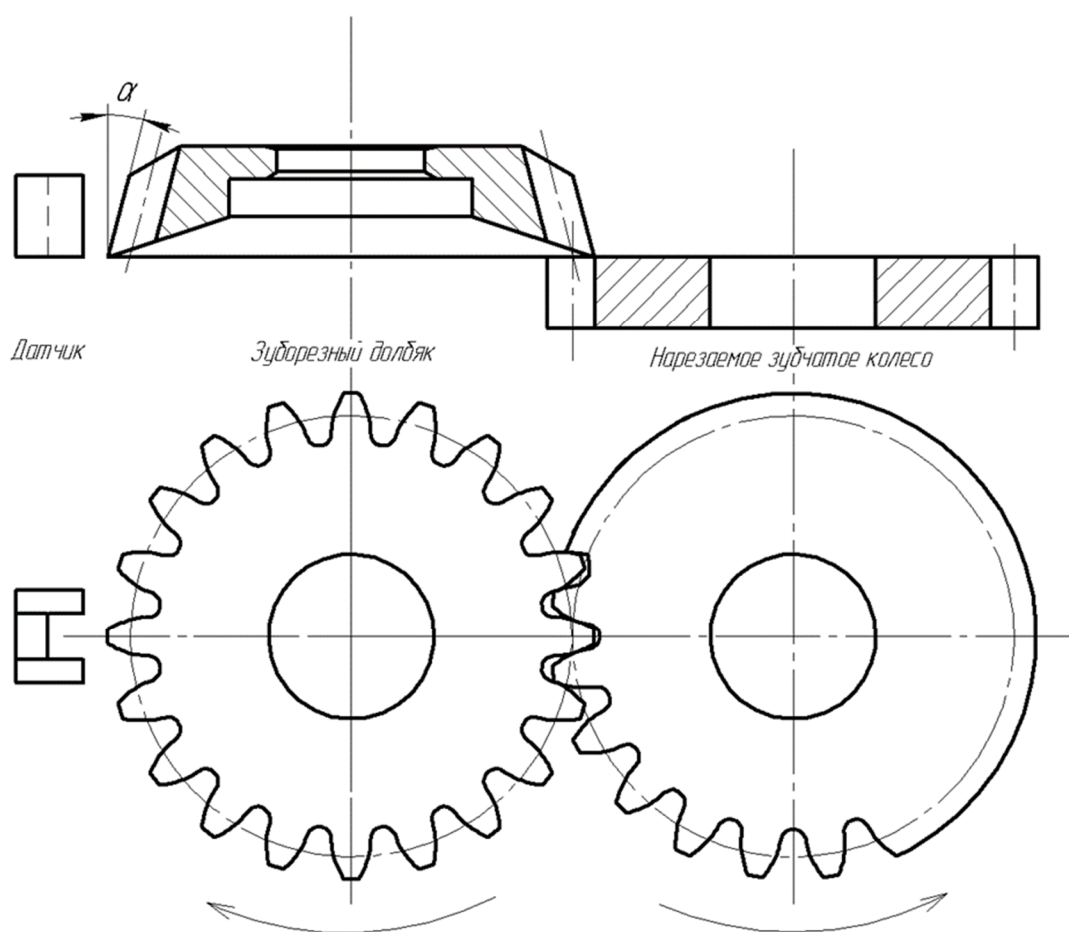


Рисунок 4 — Схема установки магнитного датчика для контроля износа зуборезного долбяка в процессе нарезания зубчатого колеса

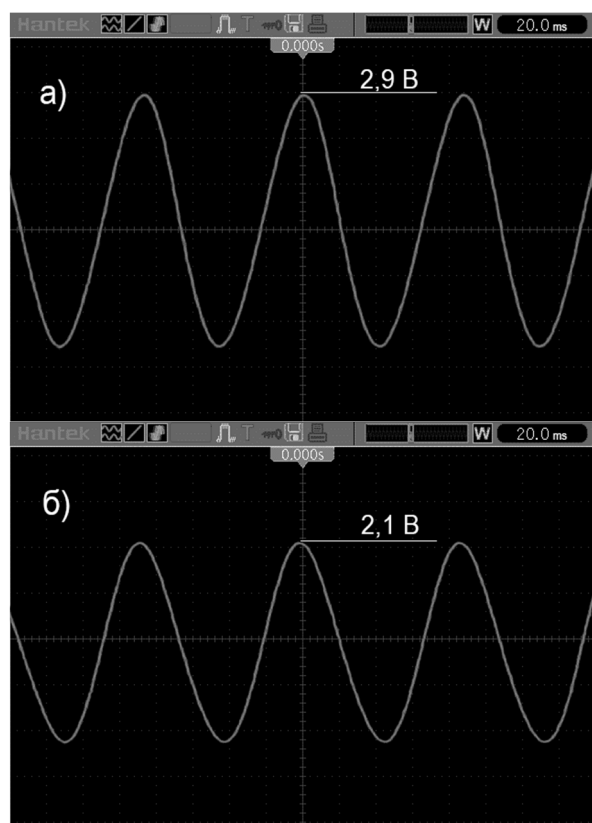


Рисунок 5 — Осциллограмма зуборезного долбяка: а) заточенный долбяк; б) изношенный долбяк

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные данные, полученные с помощью осциллографа, подтвердили работоспособность предложенного способа контроля износа зуборезного долбяка. Для заточенного долбяка амплитуда сигнала составила 2,9 В, а для изношенного долбяка амплитуда снизилась до 2,1 В.

2. Анализируя данные амплитуды сигнала, можно определять состояние зуборезного долбяка. Это дает возможность оперативно выявлять износ зуборезного долбяка и своевременно принимать решение о необходимости его заточки.

3. Контроль зуборезного долбяка в процессе нарезания зубчатых колес позволит оптимизировать технологические процессы за счет раннего обнаружения износа, что приведет к снижению риска брака при производстве зубчатых колес и увеличит срок службы зубообрабатывающего оборудования.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие методики выявления предельного состояния для заточки зуборезного долбяка.

Список источников

1. Величко Н. И. Обобщенная модель зуборезного долбяка // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2023. № 1 (42). С. 55–63. EDN OGTSTB
2. Бузин Л. Что такое долбяк — применение инструмента, характеристики [Электронный ресурс] // *Подольский завод оборудования (ПЗО) : [сайт]*. [2026]. URL: <https://p-z-o.ru/products/dolbyaki/dolbyak> (дата обращения: 20.01.2026).
3. Мерзлякин А. А. Режущий инструмент в современном машиностроении // *Актуальные вопросы современной науки и образования : материалы Научной сессии 2022 Борисоглебского филиала ФГБОУ ВО «ВГУ», Борисоглебск, 01–30 апреля 2022 года*. М. : Перо, 2022. С. 204–208. EDN ICFPPYC
4. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. 9 с.
5. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М. : Издательство стандартов, 1978. 29 с.
6. ГОСТ 10059-80. Долбяки зуборезные чистовые мелко модульные. Технические условия. М. : Издательство стандартов, 1982. 36 с.
7. Ермаков Д. С., Калинин М. В. Критерии применения зуборезного инструмента в условиях серийного типа производства // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2024. № 2 (49). С. 48–51. EDN NVKDIY
8. Ивженко А. А., Креселюк Ю. В., Рублева Ю. В. Определение дефектов деталей тележек грузовых вагонов феррозондовым методом // *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*. 2023. № 3 (69). С. 229–231. EDN LCFPZK

9. Магнитные устройства для контроля состояния узлов роботизированных машин и механизмов / А. В. Добрыднев, В. С. Безкоровайный, Н. В. Безкоровайная, М. А. Киреева // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Машиностроение. 2025. № 2 (3). С. 31–38. EDN EFOXAZ

10. Добрыднев А. В., Безкоровайный В. С. Использование феррозондов для мониторинга состояния железнодорожного транспорта // Приборостроение — 2024 : материалы 17-й международной научно-технической конференции, Минск, 26–29 ноября 2024 года. Минск : [б. и.], 2024. С. 46–47. EDN SMCSMT

© Витренко В. А., Креселюк Ю. В., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. цифровых технологий и машин в литейном производстве ЛГУ им. В. Даля Гутько Ю. И., к.э.н., доц., зав. каф. ТОМП ДонГТУ Зинченко А. М.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Витренко Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, профессор каф. технологии машиностроения и инженерного консалтинга
Луганский государственный университет имени Владимира Даля,
г. Луганск, Россия

Креселюк Юрий Владимирович, старший преподаватель каф. электромеханики
Луганский государственный университет имени Владимира Даля
г. Луганск, Россия, e-mail: yurakreselyuk@mail.ru

Vitrenko V. A., *Kreselyuk Yu. V. (Lugansk State University named after Vladimir Dahl, Lugansk, Russia, e-mail: yurakreselyuk@mail.ru)

CIRCULAR CUTTER WEAR SENSING DURING THE GEAR TOOTH MANUFACTURING PROCESS

The article proposes a method for circular cutter wear sensing during the gear tooth cutting process. A magnetic sensor is used to control the circular cutter. The geometric parameters of the sensor and the circular cutter used in the experiment are given. By analyzing the sensor signal amplitude data, it is possible to determine the condition of the circular cutter, which allows to quickly identify wear and make a timely decision about the need for sharpening.

Key words: circular cutter, gear tooth, magnetic sensor, magnetic field, oscillogram.

References

1. Velichko N. I. Generalized model of the circular cutter [Obobshchennaya model' zuboreznogo dolbyaka]. Resource-saving technologies of production and forming materials in mechanical engineering. 2023. No. 1 (42). Pp. 55–63. EDN OGTSTB

2. Buzin L. What is a circular cutter - application of the tool, characteristics [Chto takoe dolbyak — primeneniye instrumenta, harakteristik]. Podolsk Machinery Plant (PMP) 2026. URL: <https://p-z-o.ru/products/dolbyaki/dolbyak> (date of treatment: 20.01.2026).

3. Merzlikin A. A. Cutting tool in modern mechanical engineering [Rezhushchij instrument v sovremennoy mashinostroenii]. Aktual'nye voprosy sovremennoy nauki i obrazovaniya : materialy Nauchnoy sessii 2022 Borisoglebskogo filiala FGBOU VO «VGU», Borisoglebsk, 01–30 aprelya 2022 goda. M. : Pero. 2022. Pp. 204–208. EDN ICFPPYC

4. GOST 9013-59. Metals. Rockwell hardness measurement method [GOST 9013-59. Metally. Metod izmereniya tverdosti po Rokvellu]. M. : IPK Izdatel'stvo standartov. 2001. 9 p.

5. GOST 2999-75. *Metals and alloys. Vickers measuring hardness method [GOST 2999-75. Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vickersu]*. M. : IPK Izdatel'stvo standartov. 1978. 29 p.

6. GOST 10059-80. *Circular cutter smoothing fine-module. Technical conditions [GOST 10059-80. Dolbyaki zuboreznye chistovye melkomodul'nye. Tekhnicheskie usloviya.]*. M. : Izdatel'stvo standartov. 1982. 36 p.

7. Ermakov D. S., Kalinichenko M. V. *Criteria for using the cutting tool in production type conditions [Kriterii primeneniya zuborezhushchego instrumenta v usloviyah serijnogo tipa proizvodstva]*. *Engineering industry and life safety*. 2024. No. 2 (49). Pp. 48–51. EDN NVKDIY

8. Ivzhenko A. A., Kreselyuk Yu. V., Rubleva Yu. V. *Detection of defects in freight car bogie parts by the ferrosound method [Opredelenie defektov detalej telezhek gruzovyh vagonov ferrozondovym metodom]*. *Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl*. 2023. No. 3 (69). Pp. 229–231. EDN LCFPZK

9. *Magnetic devices for controlling the condition of units in robotic machines and mechanisms [Magnitnye ustrojstva dlya kontrolya sostoyaniya uzlov robotizirovannyh mashin i mekhanizmov]*. Dobrydnev A. V., Bezkorovainy V. S., Bezkorovainaya N. V., Kireeva M. A. *Vestnik of Lugansk State University named after Vladimir Dahl. Mechanical engineering*. 2025. No. 2 (3). Pp. 31–38. EDN EFOXAZ

10. Dobrydnev A. V., Bezkorovainy V. S. *The use of ferrozonds for monitoring the condition of railway transport [Ispol'zovanie ferrozondov dlya monitoringa sostoyaniya zheleznodorozhnogo transporta]*. *Priborostroenie — 2024 : materialy 17-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheckoj konferencii, Minsk, 26–29 noyabrya 2024 goda. Minsk : n. p. 2024. Pp. 46–47. EDN SMCSMT*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vitrenko Vladimir Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology and Engineering Consulting
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,
Lugansk, Russia

Kreselyuk Yury Vladimirovich, Senior lecturer of the Department of Electromechanics
Lugansk State University named after Vladimir Dahl,
Lugansk, Russia, e-mail: yurakreselyuk@mail.ru