
УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

MANAGEMENT, MODELING, AUTOMATION

Научная статья

УДК 681.5;51-74

<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-2-7-13>

Распознавание дефектов поверхностного слоя подшипников на основе фрактального анализа вихретокового сигнала

Александр Анатольевич Игнатьев¹, Максим Алексеевич Игнатьев^{2}*

*^{1,2}Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Саратов, Россия, Ignatyev_maxim98@mail.ru**

Аннотация. При производстве подшипников требуются точное соблюдение технологического процесса и контроль качества изделий на всех этапах обработки. Одним из наиболее точных и экологических способов мониторинга качества в производстве подшипников является метод вихретокового контроля. При реализации данной методики формируется большой массив числовых данных, отражающих информацию о физико-механическом состоянии поверхности. Таким образом, процесс обнаружения дефекта сводится к задаче сегментации данных, т. е. выделению частей массива с разной динамикой, что довольно затруднительно для оператора. Для решения данной задачи предложена система распознавания образов, элементами которой являются алфавит классов (дефекты поверхностного слоя), словарь признаков (фрактальная размерность массива данных), правила принятия решения о распознавании (метод эталонов). Фрактальный анализ применяется к двумерному массиву, состоящему из нескольких векторов данных, что позволяет повысить степень автоматизации процесса поиска и идентификации показаний датчика, свидетельствующих о дефекте, т. к. дефект оказывает влияние на поверхностный слой изделия не только в области его наибольшего преобладания. Приводятся три метода расчета фрактальной размерности двумерного массива. Обосновывается применение метода эталонов теории распознавания образов, представлено аналитическое выражение, отражающее данную методику. На основе предложенных решений можно классифицировать брак поверхности качения колец подшипников посредством предварительного расчета фрактальной размерности для каждого дефекта. Внедрение программного обеспечения, разработанного на основе данной методики, может повысить эффективность контроля качества в производстве подшипников и скорректировать технологический процесс.

Ключевые слова: вихретоковый сигнал, распознавание, дефект, фрактальная размерность, поверхностный слой, метод эталонов

Для цитирования: *Игнатьев А. А., Игнатьев М. А.* Распознавание дефектов поверхностного слоя подшипников на основе фрактального анализа вихретокового сигнала // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 2. С. 7–13. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-2-7-13>.

Original article

Recognizing defects in surface layer of bearings by using fractal analysis of eddy current signal

Alexander A. Ignatyev¹, Maxim A. Ignatyev^{2}*

*^{1,2}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Saratov, Russia, Ignatyev_maxim98@mail.ru**

Abstract. Bearing manufacturing requires strict adherence to the technological standards and quality control of products at all stages of processing. One of the most accurate and environmentally friendly quality monitoring methods in bearing production is the eddy current method. When using this method, a large array of numerical data is generated that reflects information on the physical and mechanical conditions of the surface. Thus, defect detection process is reduced to defining the task of data segmentation, that is, selection of parts of an array with different dynamics, which is rather difficult for an operator. To solve this problem, a pattern recognition system is proposed, the elements of which are an alphabet of classes (defects of the surface layer), a dictionary of features (fractal dimension of a data array), rules for decision making on recognition (method of standards). Fractal analysis is applied to a two-dimensional array consisting of several data vectors, which will increase the degree of automation of the process of searching and identifying sensor readings indicating a defect, since the defect affects the surface layer of the product not only in the area of its greatest prevalence. Three methods of calculating the fractal dimension of a two-dimensional array are presented. Application of the reference method of the theory of pattern recognition is substantiated, an analytical expression that reflects the method is presented. According to the proposed solutions, it is possible to classify the defect of the rolling surface of the bearing rings by preliminary calculating the fractal dimension for each defect. Implementation of the software developed by using this method can improve the efficiency of quality control in bearing manufacturing and update the technological process.

Keywords: eddy current signal, recognition, defect, fractal dimension, surface layer, reference method

For citation: Ignatiev A. A., Ignatiev M. A. Recognizing defects in surface layer of bearings by using fractal analysis of eddy current signal. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2022;2:7-13. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2022-2-7-13.

Введение

Конкурентоспособность машино- и приборостроительных производств напрямую связана с качеством выпускаемой продукции, поэтому в настоящее время в производство активно внедряются автоматизированные системы мониторинга и управления качеством изделий. Современные

производственные системы контроля качества продукции ориентированы не только на определение дефекта, но и на корректировку технологического процесса (рис. 1) для предотвращения брака в будущем, поэтому важно не только определить наличие дефекта, но и распознать, к какому виду он относится [1, 2].

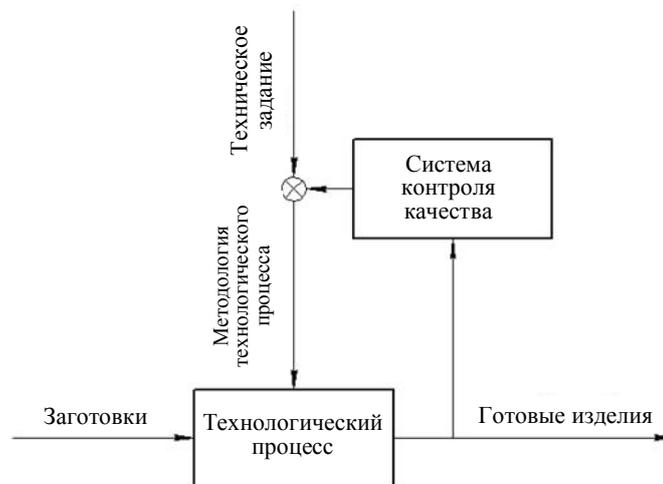


Рис. 1. Структурная схема технологического процесса с системой контроля качества изделий

Fig. 1. Block diagram of the technological process with a product quality control system

Для контроля качества изделий в производстве подшипников могут использоваться визуальный, капиллярный, вихрековый, магнитопорошковый и другие методы контроля [3].

Одним из наиболее экологичных и перспективных с точки зрения автоматизации способов контроля является вихрековый метод, основанный на законе электромагнитной индукции. Внешнее по отношению к среде переменное магнитное поле

наводит электродвижущую силу, которая, если среда проводящая, создает в ней вихревые токи, регистрирующиеся измерительным преобразователем [4]. В результате работы вихрекового преобразователя (ВТП), например ПВК-К2М, формируется файл с большим количеством числовых данных, содержащий информацию о физико-механических свойствах поверхностного слоя изделия. На основе обработки данных значений можно судить о нали-

чий и типе брака поверхностного слоя. В этих целях в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» (в настоящее время ОАО «ЕПК-Саратов») был разработан классификатор неоднородности и дефектов КЗ-2005, однако анализ большого количества данных для человека-оператора является сложной задачей [5]. В связи с этим для повышения эффективности вихретокового контроля поверхностного слоя подшипников возникла потребность в разработке специализированного программно-алгоритмического обеспечения.

Определение дефектов на основе теории распознавания образов

Для подобных задач поиска и классификации объектов была разработана теория распознавания образов [6–8]. Любой метод распознавания можно представить как абстрактную систему R :

$$R = \{A, S, P\},$$

где $A = \{A_k\}$, $k = 1, \dots, K$ – алфавит классов; $S = \{S_j\}$, $j = 1, \dots, n$ – словарь признаков; $P = \{P_i\}$, $i = 1, \dots, L$ – множество правил принятия решения.

В данном случае алфавит классов A будет содержать дефекты поверхностного слоя, также в данный алфавит будет включен класс «дефектов нет». Значение K будет сформировано на основе анализа наиболее распространенных видов дефектов.

Разработка словаря признаков зависит от выбранного математического аппарата обработки числовых значений. Ранее в качестве признаков в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю. А. предлагалось использовать интегральные оценки вейвлет-коэффициентов и другие статистические характеристики

массивов амплитудной и фазовой составляющей сигнала ВТП [9, 10]. В работах [11, 12] показана целесообразность применения фрактального анализа для формирования словаря признаков.

Фрактальный анализ является инструментом для определения изменения динамики данных, поэтому фрактальная размерность, которая вычисляется по формуле

$$D = (n + 1) - H,$$

где n – размерность данных; H – показатель Херста [13–16], может выступать в качестве признака в системе распознавания дефектов.

Существует около 20 методов расчета показателя Херста [16], однако в большинстве из них рассматривается анализ вектора данных. В данной же работе в качестве элементов словаря признаков предлагается использовать фрактальную размерность двумерного массива амплитудной и фазовой составляющей вихретокового сигнала D_A, D_F . Числовые значения данных величин будут принадлежать отрезку от 2 до 3, т. к. в этом случае $n = 2$. Поскольку дефект оказывает влияние на поверхностный слой изделия не только в области его наибольшего преобладания, данная методика с применением анализа двумерного массива может качественно и количественно повысить эффективность распознавания брака. На рис. 2, где по оси OX отложены номера измерений (порядка 1 000), по оси OY – номер оборота датчика (около 60 значений), по оси OZ – показания датчика в каждой точке измерения, показан сигнал ВТП по амплитудной составляющей в трехмерной плоскости при сканировании кольца подшипника с дефектом «забоина».

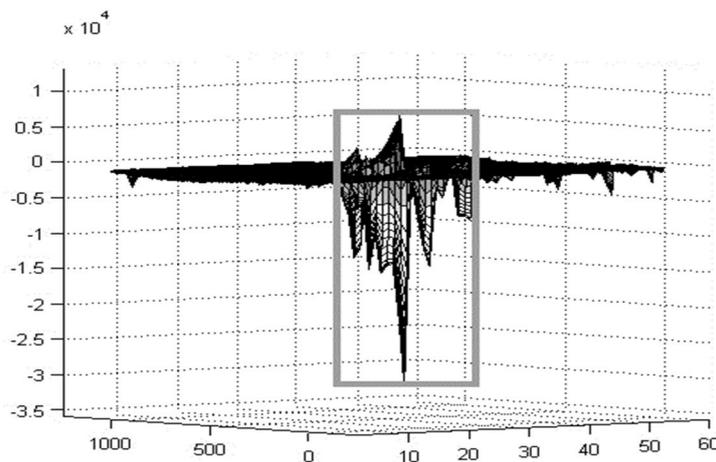


Рис. 2. Сигнал ВТП по амплитудной составляющей в трехмерной плоскости при сканировании кольца подшипника с дефектом «забоина»

Fig. 2. Eddy current converter (ECC) signal on the amplitude component in 3-D plane at scanning a bearing ring with a nick defect

Зарубежными учеными было разработано несколько методов расчета показателя Херста массива с размерностью равной двум [17–19], например:

- оценка дискретной производной второго порядка (DSOD);
- метод DSOD с применением вейвлет-анализа;
- регрессионная оценка вейвлет-коэффициентов.

В теории распознавания образов существует три основных подхода к разработке правил принятия решений: эмпирический (применяется при достаточном количестве практических результатов), математический (используются аналитические выражения), лингвистический (алгебра логики, формальные языки, графы; может применяться в случаях, когда образ представляет собой связанную структуру).

В задаче распознавания дефектов поверхностного слоя подшипников образы не имеют внутренних связей; учитывая, что на процесс шлифования

(который оказывает наибольшее влияние на формирование поверхностного слоя детали) действует большое количество случайных возмущений, построение аналитической модели затруднительно. Таким образом, в данной задаче распознавания рационально использовать эмпирический подход, одной из основных методик которого является метод эталонов.

Метод эталонов основан на сопоставлении параметров входного образа с заранее известными признаками классов, которые определяются на основе предварительных исследований (обучающего эксперимента). Также для каждого признака необходимо определить границы доверительного интервала.

На основе представленных методик и подходов теории распознавания образов процесс идентификации дефекта поверхностного слоя подшипников по сигналу ВТП можно описать выражением

$$\begin{aligned}
 X &= \{D_A, D_F\}; \\
 ST_i &= \{SD_i^A, SD_i^F\}; \\
 (D_A \hat{=} (SD_i^A \pm \mu_A)) \cap (D_F \hat{=} (SD_i^F \pm \mu_F)) \cap X \hat{=} ST_i; \\
 i &\hat{=} [1; K + 1],
 \end{aligned}$$

где X – входной образ (сигнал ВТП); D_A, D_F – фрактальная размерность сигнала ВТП по амплитудной и фазовой составляющей (АС и ФС) соответственно; ST – класс (дефект); SD^A, SD^F – эталонное значение фрактальной размерности сигнала ВТП по амплитудной и фазовой составляющей соответственно; μ_A, μ_F – значения для определения

границ поля допуска эталонных значений фрактальной размерности сигнала ВТП по амплитудной и фазовой составляющей соответственно; K – количество распознаваемых дефектов.

На рис. 3 представлены значения фрактальных размерностей векторных данных вихревых сигналов [9].

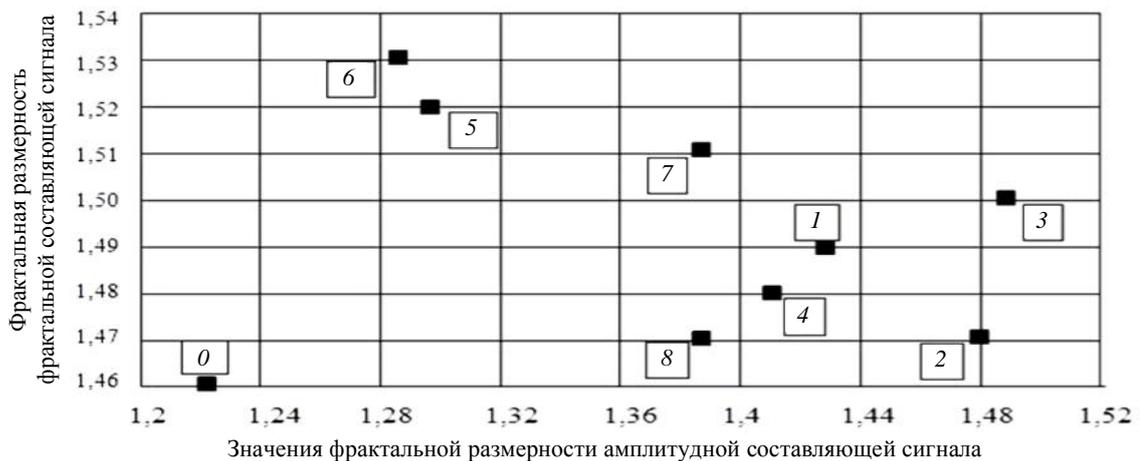


Рис. 3. Расположение фрактальных размерностей основных дефектов поверхностного слоя подшипников на плоскости признаков: 0 – поверхность без дефектов; 1 – забоина; 2 – кольцевой прижог; 3 – кузнечная заштамповка; 4 – металлургическая трещина; 5 – металлическая трещина; 6 – пятнистый прижог; 7 – трооститное пятно; 8 – шлифовочная трещина

Fig. 3. Location of fractal dimensions of the main defects of the bearing surface layer on the plane of signs: 0 - defect-free surface; 1 - nick; 2 - ring burn; 3 - forging stamping; 4 - metallurgical crack; 5 - metal crack; 6 - spotted burn; 7 - troostite spot; 8 - grinding crack

Программное обеспечение, разработанное на основе представленной в данной работе методики распознавания дефектов поверхностного слоя колец подшипников, может служить в качестве системы поддержки принятия решения о необходи-

мости корректировки технологического процесса, ремонтно-восстановительных работ, изменении требований качества к выпускаемой продукции (рис. 4).



Рис. 4. Методическое обеспечение автоматизированной системы принятия решения о качестве подшипников на основе вихретокового контроля

Fig. 4. Methodological support of the automated decision-making system about the quality of bearings based on eddy current testing

Повышение степени автоматизации процесса распознавания дефектов деталей подшипников приводит к уменьшению (или полному исключению) количества брака изделий, сокращению времени простоя оборудования, что, в свою очередь, положительно влияет на рост производительности промышленного предприятия.

Заключение

В данной работе представлена методика для решения задачи идентификации дефектов поверхностного слоя дорожек качения подшипников по данным вихретокового сигнала на основе теории распознавания образов. Показана возможность использования фрактальных размерностей (как одномерного,

так и двумерного сигнала) в качестве элементов словаря признаков. Также приводится обоснование использования метода эталонов и представлено аналитическое выражение для данной методики в приложении к распознаванию дефектов по фрактальной размерности. На основе предложенных решений можно классифицировать брак поверхности качения колец подшипников путем предварительного расчета фрактальной размерности для каждого дефекта. Внедрение специализированного программного обеспечения позволит повысить эффективность контроля качества в производстве подшипников и оптимизировать технологический процесс механической обработки колец подшипников.

Список источников

1. Волосов С. С., Гейлер З. Ш. Управление качеством продукции средствами активного контроля. М.: Изд-во стандартов, 1989. 264 с.

2. Игнатъев А. А., Горбунов В. В., Игнатъев С. А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. 160 с.

Ignatiev A. A., Ignatiev M. A. Recognizing defects in surface layer of bearings by using fractal analysis of eddy current signal

3. Бржозовский Б. М., Игнатъев А. А., Мартынов В. В., Схиртладзе А. Г. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учеб. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 353 с.
4. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихревого неразрушающего контроля: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2019. 98 с.
5. Горбунов В. В., Карпеев А. М., Игнатъев А. А. Контроль физико-механических свойств поверхностей дорожек качения подшипников для газотурбинных авиационных двигателей вихревым методом // Вестн. Сарат. гос. техн. ун-та. 2021. № 3 (90). С. 5–11.
6. Чабан Л. Н. Теория и алгоритмы распознавания образов: учеб. пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2004. 70 с.
7. Ту Д., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 411 с.
8. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с.
9. Игнатъев А. А., Шумарова О. С., Игнатъев С. А. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников при автоматизированном вихревом контроле с применением вейвлет-преобразований: моногр. Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. 108 с.
10. Самойлова Е. М., Игнатъев А. А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства: моногр. в 3 ч. Саратов: Изд-во СГТУ, 2019. Ч. 3. Гибридная интеллектуальная система. Информационная интеграция на уровне АСУТП. 84 с.
11. Вахидова К. Л., Игнатъев А. А., Игнатъев С. А. Определение фрактальной размерности сигналов вихревого датчика для распознавания дефектов деталей подшипников // Автоматизация и управление в машино-

и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во СГТУ, 2020. С. 6–8.

12. Игнатъев М. А., Березина Е. В., Игнатъев А. А. Анализ теории фракталов для применения в автоматизированной системе контроля качества поверхности подшипников // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во СГТУ, 2021. С. 56–60.

13. Иудин Д. И., Коносов Е. В. Фракталы: от простого к сложному: моногр. Н. Новгород: Изд-во НГАСУ, 2012. 200 с.

14. Feder J. Fractals. N.Y.: Plenum press, 1988. 283 p.

15. Кожанов П. В., Ткаченко И. М., Кожанова Е. Р. Показатель Херста как мера хаотичности временного ряда // Вестн. Сарат. гос. техн. ун-та. 2020. № 2 (85). С. 38–41.

16. Мухаметзянов И. З., Майский П. А., Янтудин М. Н. Методические особенности применения стохастических показателей при анализе потоковых данных природных или технических процессов и объектов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2015. № 5. С. 446–492.

17. Istas J., Lang G. Quadratic variations and estimation of the local Hölder index of a Gaussian process // Ann. Inst. Poincaré. 1994. N. 33. P. 407–436.

18. Bardet J.-M., Lang G., Oppenheim G., Philippe A., Stoev S., Taqqu M. S. Semi-parametric estimation of the long-range dependence parameter: a survey // Theory and applications of long-range dependence Birkhäuser. 2003. P. 557–577.

19. Flandrin P. Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion // IEEE Trans. on Inf. Th. 1992. N. 38. P. 910–917.

References

1. Volosov S. S., Geiler Z. Sh. *Upravlenie kachestvom produktsii sredstvami aktivnogo kontrolya* [Product quality management by means of active control]. Moscow, Izd-vo standartov, 1989. 264 p.
2. Ignat'ev A. A., Gorbunov V. V., Ignat'ev S. A. *Monitoring tekhnologicheskogo protsessa kak element sistemy upravleniya kachestvom produktsii* [Technological process monitoring as element of product quality management system]. Saratov, Izd-vo SGTU, 2009. 160 p.
3. Brzhozovskii B. M., Ignat'ev A. A., Martynov V. V., Skhirtladze A. G. *Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem: uchebnik* [Diagnostics and reliability of automated systems: textbook]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2011. 353 p.
4. Bobrov A. L., Vlasov K. V., Bekher S. A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushaiushchego kontrolya: uchebnoe posobie* [Principles of eddy current non-destructive testing: textbook]. Novosibirsk, Izd-vo SGUPS, 2019. 98 p.
5. Gorbunov V. V., Karpeev A. M., Ignat'ev A. A. *Kontrol' fiziko-mekhanicheskikh svoistv poverkhnostei dorozhek kachenii podshipnikov dlia gazoturbinnykh aviatsonnykh dvigatelei vikhretokovym metodom* [Control of physical and mechanical properties of surfaces of the bearing raceways for gas turbine aircraft engines by eddy current method]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (90), pp. 5–11.
6. Chaban L. N. *Teoriia i algoritmy raspoznavaniia obrazov: uchebnoe posobie* [Theory and algorithms of pattern recognition: textbook]. Moscow, Izd-vo MIIGAiK, 2004. 70 p.

7. Tu D., Gonsales R. *Printsipy raspoznavaniia obrazov* [Principles of pattern recognition]. Moscow, Mir Publ., 1978. 411 p.

8. Fomin Ia. A. *Raspoznavanie obrazov: teoriia i primeneniia* [Pattern recognition: theory and application]. Moscow, FAZIS Publ., 2012. 429 p.

9. Ignat'ev A. A., Shumarova O. S., Ignat'ev S. A. *Raspoznavanie defektov poverkhnostei kachenii kolets podshipnikov pri avtomatizirovannom vikhretokovom kontrole s primeneniem veivlet-preobrazovaniia: monografiia* [Recognition of defects in rolling surfaces of bearing rings during automated eddy current testing using wavelet converters: monograph]. Saratov, Izd-vo SGTU, 2017. 108 p.

10. Samoilova E. M., Ignat'ev A. A. *Metody i algoritmy intellektualizatsii monitoringa tekhnologicheskikh sistem na osnove avtomatizirovannykh stanochnykh modulei integrirovannogo proizvodstva: monografiia v 3-kh chastiakh* [Methods and algorithms for intellectualization of technological systems monitoring based on automated machine modules of integrated production: monograph in 3 parts]. Saratov, Izd-vo SGTU, 2019. Part 3. Gibridnaia intellektual'naia sistema. Informatsionnaia integratsiia na urovne ASUTP. 84 p.

11. Vakhidova K. L., Ignat'ev A. A., Ignat'ev S. A. *Opreделение fraktal'noi razmernosti signalov vikhretokovogo datchika dlia raspoznavaniia defektov detaiei podshipnikov* [Defining fractal dimension of eddy current sensor signals for recognizing defects in bearing parts]. *Avtomatizatsiia i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sbornik nauchnykh trudov*. Saratov, Izd-vo SGTU, 2020. Pp. 6–8.

12. Ignat'ev M. A., Berezina E. V., Ignat'ev A. A. Analiz teorii fraktalov dlia primeneniia v avtomatizirovannoi sisteme kontroliia kachestva poverkhnosti podshipnikov [Analyzing theory of fractals for using in automated system for monitoring bearing surface quality]. *Avtomatizatsiia i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sbornik nauchnykh trudov*. Saratov, Izd-vo SGTU, 2021. Pp. 56-60.

13. Iudin D. I., Kopusov E. V. *Fraktaly: ot prostogo k slozhnomu: monografiia* [Fractals: from simple to complex: monograph]. Nizhnii Novgorod, Izd-vo NGASU, 2012. 200 p.

14. Feder J. *Fractals*. New York, Plenum press, 1988. 283 p.

15. Kozhanov R. V., Tkachenko I. M., Kozhanova E. R. Pokazatel' Khersta kak mera khaotichnosti vremennogo riada [Hurst exponent as measure of time series chaoticity]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 2 (85), pp. 38-41.

16. Mukhametdzianov I. Z., Maiskii R. A., Iantudin M. N. Metodicheskie osobennosti primeneniia stokhasticheskikh

pokazatelei pri analize potokovykh dannykh prirodnykh ili tekhnicheskikh protsessov i ob"ektov [Methodological features of using stochastic indicators in analysis of streaming data of natural or technical processes and objects]. *Nefte-gazovoe delo: elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2015, no. 5, pp. 446-492.

17. Istas J., Lang G. Quadratic variations and estimation of the local Hölder index of a Gaussian process. *Ann. Inst. Poincaré*, 1994, no. 33, pp. 407-436.

18. Bardet J.-M., Lang G., Oppenheim G., Philippe A., Stoev S., Taqqu M. S. Semi-parametric estimation of the long-range dependence parameter: a survey. *Theory and applications of long-range dependence Birkhäuser*, 2003, pp. 557-577.

19. Flandrin P. Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion. *IEEE Trans. on Inf. Th.*, 1992, no. 38, pp. 910-917.

Статья поступила в редакцию 14.01.2022; одобрена после рецензирования 16.02.2022; принята к публикации 05.04.2022
The article is submitted 14.01.2022; approved after reviewing 16.02.2022; accepted for publication 05.04.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Анатольевич Игнатьев – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры технической механики и мехатроники; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.; atp@sstu.ru

Максим Алексеевич Игнатьев – магистрант кафедры технической механики и мехатроники; Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.; Ignatyev_maxim98@mail.ru

Alexander A. Ignatyev – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technical Mechanics and Mechatronics; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; atp@sstu.ru

Maxim A. Ignatyev – Master's Course Student of the Department of Technical Mechanics and Mechatronics; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; Ignatyev_maxim98@mail.ru

