

УДК 621.5

doi:10.21685/2072-3059-2022-3-10

Применение стохастических характеристик виброакустических колебаний при анализе динамического качества станков

А. А. Игнатьев¹, В. А. Добряков², С. А. Игнатьев³, В. А. Каракозова⁴

^{1,2}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

¹atp@sstu.ru, ²dobryakovva@mail.ru, ³ignatievsa@mail.ru, ⁴karakozova.v@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение запаса устойчивости динамической системы, интегральных оценок автокорреляционных функций и спектров виброакустических колебаний в станках актуально для оценки их динамического качества и назначения режима резания, что теоретически обосновывается с помощью решения стохастического уравнения колебаний в системе «резец – деталь». Цель работы – обоснование целесообразности применения стохастических характеристик для разработки критериев оценки динамического качества станков. *Материалы и методы.* Применяется экспериментально-аналитический метод обоснования применения функционалов от автокорреляционных функций и спектров виброакустических колебаний в станках для выбора рационального режима резания и определения начальной фазы критического износа инструмента. *Результаты.* Приводятся результаты экспериментальных исследований на токарных и шлифовальных станках по оценке их динамического качества при различных режимах обработки и износе резца. *Выводы.* Результаты исследований стохастических характеристик колебаний динамической системы показали целесообразность оценки динамического качества автоматизированных станков, что позволяет осуществлять их сравнение по этому параметру, выбирать технологический режим для обработки высокоточных деталей с заданным качеством и выявлять начальную фазу катастрофического износа резца для своевременной замены и более полного использования ресурса.

Ключевые слова: станки, динамическое качество, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, спектральная плотность, запас устойчивости, интегральные оценки, качество обработки

Для цитирования: Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А., Каракозова В. А. Применение стохастических характеристик виброакустических колебаний при анализе динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 3. С. 97–108. doi:10.21685/2072-3059-2022-3-10

Using stochastic characteristics of vibroacoustic oscillations in the analysis of the dynamic quality of machine tools

A.A. Ignat'ev¹, V.A. Dobryakov², S.A. Ignat'ev³, V.A. Karakozova⁴

^{1,2,3,4}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

¹atp@sstu.ru, ²dobryakovva@mail.ru, ³ignatievsa@mail.ru, ⁴karakozova.v@bk.ru

Abstract. *Background.* Application of stability margin of dynamic system, integral estimates of autocorrelation functions and spectra of vibro-acoustic oscillations in machine tools is relevant for evaluation of their dynamic quality and purpose of cutting mode, which

is theoretically justified by solution of stochastic equation of oscillations in “cutter-detail” system. *Materials and methods.* An experimental-analytical method is used to substantiate the use of functionals from autocorrelation functions and spectra of vibration-acoustic oscillations in machines to select a rational cutting mode and determine the initial phase of critical tool wear. *Results.* Results of experimental studies on turning and grinding machines on evaluation of their dynamic quality at various modes of machining and wear of cutter are presented. *Conclusions.* The results of studies of the stochastic characteristics of oscillations of a dynamic system showed the feasibility of assessing the dynamic quality of automated machine tools. This allows to compare by parameters, to choose a technological mode for processing high-precision parts with a given quality, and to identify the initial phase of catastrophic cutter wear for timely replacement and better use of the resource.

Keywords: machines, dynamic quality, vibration acoustic oscillations, autocorrelation function, spectral density, stability margin, integral estimates, processing quality

For citation: Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A., Karakozova V.A. Using stochastic characteristics of vibroacoustic oscillations in the analysis of the dynamic quality of machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2022;(3):97–108. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2022-3-10

Введение

Динамическое качество автоматизированных металлорежущих станков (АМС) существенно влияет на макро- и микрогеометрические параметры точности деталей, физико-механические характеристики поверхностного обработанного слоя и производительность оборудования [1–3]. Расчеты динамических характеристик АМС на этапе проектирования не дают достаточной точности для использования их при определении значений параметров технологического режима с точки зрения эффективности обработки, так как имеет место неопределенность значений параметров станка, характеристик инструмента, материала обрабатываемой детали, теплофизических, силовых и других характеристик при взаимодействии инструмента и заготовки.

В условиях эксплуатации динамическое качество АМС оценивается на основе обработки с помощью специализированного программно-математического обеспечения (ПМО) виброакустических (ВА) колебаний в динамической системе (ДС) станков [3–6]. При резании в регистрируемых ВА колебаниях присутствуют две компоненты: детерминированная и стохастическая [2, 7]. Дальнейшая обработка данных на компьютере направлена на выявление связи ВА колебаний с динамическим качеством АМС, качеством обработки деталей, износом инструмента, назначением режима резания и другими технологическими характеристиками [3–6, 8–11].

Для учета стохастических характеристик на практике необходимо методическое обоснование по применению некоторых функционалов, однозначно связанных с динамическим качеством АМС. В связи с этим рассмотрим разработанный в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю. А. метод оценки динамического качества АМС и других технологических характеристик, упомянутых выше, с интегральными оценками автокорреляционных функций (АКФ) и спектральных плотностей мощности (СПМ) ВА колебаний, а также с запасом устойчивости ДС, которые определяются в результате обработки ВА колебаний с помощью специализированного ПМО [4, 10–18].

Для регистрации ВА колебаний на АМС применялся виброизмеритель ВШВ-003М2, вибродатчик которого на магнитном основании устанавливался на элементах конструкции АМС вблизи зоны резания. Далее вибросигналы обрабатывались на компьютере и вычислялись АКФ $K(\tau)$ и СПМ $S(\omega)$ (рис. 1), а также их интегральные оценки.

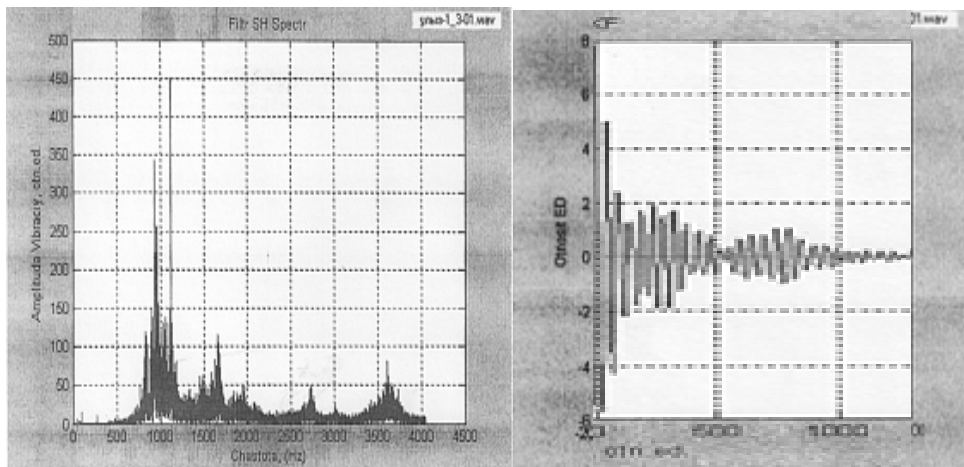


Рис. 1. Экспериментальные СПМ и АКФ виброакустических колебаний динамической системы

Результаты экспериментально-аналитических исследований

Теоретической основой разработанного метода служит положение о том, что АКФ ВА колебаний, полученные при резании, являются основой для формирования функционалов, с помощью которых можно оценить динамическое качество АМС [4, 7].

Для обоснования метода предложена математическая модель колебаний в системе «инструмент – деталь» в виде стохастического дифференциального уравнения второго порядка, для решения которого используется изложенный в работе [19] метод решения уравнения относительно моментных функций (в данном случае относительно АКФ). Допущения при построении модели, ориентированной на процесс резания, приведены в работе [20], одним из которых является то, что сила резания рассматривается как стационарный процесс типа «белый шум» $\xi(t)$ [2, 21]. В этом случае уравнение колебаний в системе «инструмент – деталь» имеет вид

$$M \cdot \ddot{y} + H \cdot \dot{y} + Cy = \xi(t), \quad (1)$$

где M , H , C – приведенные к резцу массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы; $\xi(t)$ – сила резания, действующая на систему; $y(t)$ – относительные колебания инструмента и заготовки.

Преобразуем уравнение (1) к виду

$$\ddot{y} + 2\rho\dot{y} + \omega_0^2 y = \xi(t), \quad (2)$$

где $\rho = H / 2M$, $\omega_0^2 = C / M$.

Известно [22], что сигнал типа «белый шум» имеет АКФ вида

$$K_{\xi\xi}(\tau) = S_0 \delta(\tau), \quad (3)$$

где $\delta(\tau)$ – дельта-функция; S_0 – постоянная величина.

Решение уравнения (2) в этом случае имеет вид

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0}{4\omega_0\rho} e^{-p\tau} \cos \omega_1 \tau, \quad (5)$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}$ – собственная частота, вычисленная с учетом демпфирования ($\rho < \omega_0$).

Таким образом, анализ уравнения динамики для системы «инструмент – деталь» в стационарном режиме резания показывает, что АКФ ВА колебаний могут служить оценкой качества процессов с ДС. На основе обработки записей ВА колебаний при резании идентифицируется аналитическое выражение для АКФ $K_{yy}(\tau)$, а затем вычисляется передаточная функция замкнутой ДС $W_3(p)$ по формуле, полученной в работе [23]:

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (6)$$

где $K_{yy}(p)$ – изображение автокорреляционной функции по Лапласу.

На основе идентифицированной $W_3(p)$ оценивается запас устойчивости ДС либо по критерию Михайлова, либо по показателю колебательности ДС (чем ближе показатель колебательности к значению 1,1,...,1,3, тем выше запас устойчивости, повышение его значения снижает запас устойчивости) [22]). Экспериментальные АКФ и СПМ (рис. 1) позволяют вычислить соответствующие интегральные оценки. Указанные показатели динамического качества АМС определяются при различных значениях частоты вращения шпинделя, подачи инструмента и т.п., что позволяет путем сопоставления их значений с результатами контроля качества деталей оценить динамическое качество станков, установить целесообразный режим обработки, обеспечивающий высокую производительность и сохранение заданного качества деталей как при шлифовании, так и при точении, а также другие технологические характеристики [10, 11, 17].

Для оценки динамического качества АМС проведены исследования по установлению связи точности обработки на шести токарных модулях типа ТПАРМ с интегральными оценками АКФ. Выполнены измерения шероховатости цилиндрической поверхности и ВА колебаний при обработке деталей из сплава АК-4Т резцом с синтетическим алмазом. Сравнительный анализ показал (рис. 2), что имеется взаимосвязь точности обработки с интегральными оценками АКФ ВА колебаний, которые регистрировались на резцовом блоке. Станок № 30 имеет наименьшее значение интегральных оценок АКФ, т.е. наиболее высокое динамическое качество, и, соответственно, обеспечивает наиболее низкое значение шероховатости поверхности, что являлось наиболее важным для обработанных деталей. Следует отметить, что при точении резцом с природным алмазом шероховатость поверхности составляла

0,02–0,04 мкм. Экспериментально подтверждено, что интегральные оценки АКФ ВА колебаний ДС токарного АМС могут служить оценкой их динамического качества, что согласуется с положениями теории автоматического управления для систем управления [22].

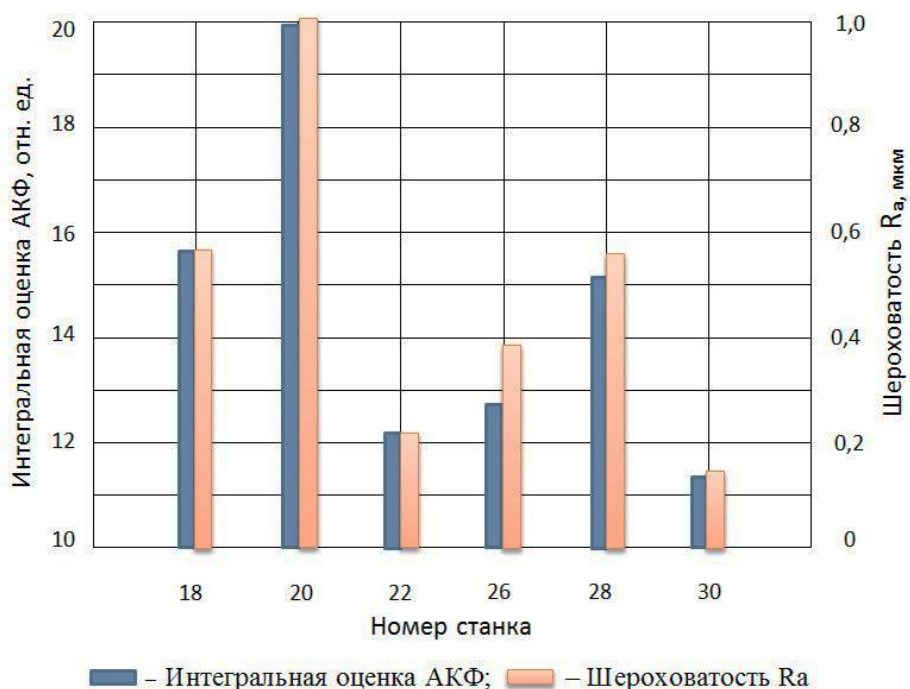


Рис. 2. Значения шероховатости поверхности и интегральные оценки АКФ при обработке деталей на токарных модулях типа ТПАРМ

Коэффициенты запаса устойчивости ДС, АКФ и СПМ, вычисленные для последовательно обработанных деталей, отличаются друг от друга, что характеризует изменение динамического качества АМС, например, в результате изменения значений параметров режима резания или по мере износа инструмента. Ранее это было установлено при исследовании износа резца на токарных станках, когда запас устойчивости, вычисляемый на основе регистрации переходного процесса при врезании резца в заготовку, был принят за основной показатель качества ДС [5]. Апробировано также применение интегральных оценок АКФ для обоснования назначения частоты вращения шпинделя для получения минимальной шероховатости поверхности деталей при алмазной обработке (рис. 3) [6, 24]. Установлено, что целесообразной является частота 1600 об/мин, при которой достигается минимум шероховатости и высокая производительность.

Применение запаса устойчивости ДС для выбора режима шлифования колец подшипников показано на рис. 4, откуда видно, что скорость съема припуска 113 мкм/с является наиболее приемлемой. Указанное качество поверхности в баллах оценивалось вихретоковым методом [4, 18].

Рассмотрим применение разработанного метода для выявления начальной фазы катастрофического износа резца при токарной обработке. Априори известно, что в соответствии с принятой на предприятии технологией при

предварительном точении наружных колец подшипников 42822 замена резца наладчиком осуществлялась через 15–16 колец, это обусловило неполное использование его режущих свойств, что экономически нецелесообразно [17]. В реальных условиях производства измерение ВА колебаний и размеров деталей показало, катастрофический износ наступает после 18–22-й детали.

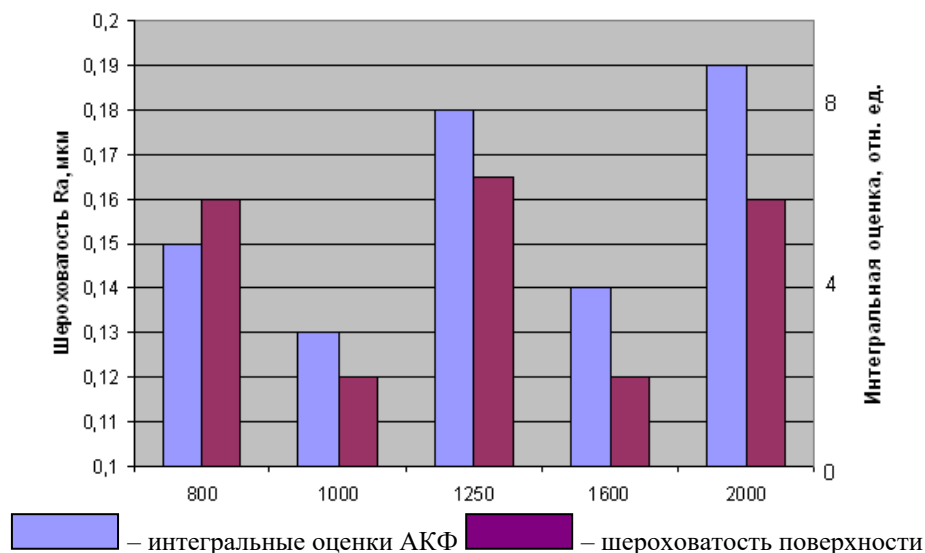


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности (Ra) обработанных деталей и интегральных оценок АКФ виброакустических колебаний резцовой головки модуля ТПАРМ–100М от частоты вращения шпинделя: подача 10 мкм/об, глубина резания 30 мкм, резец АСПК с радиусом при вершине 0,3 мм

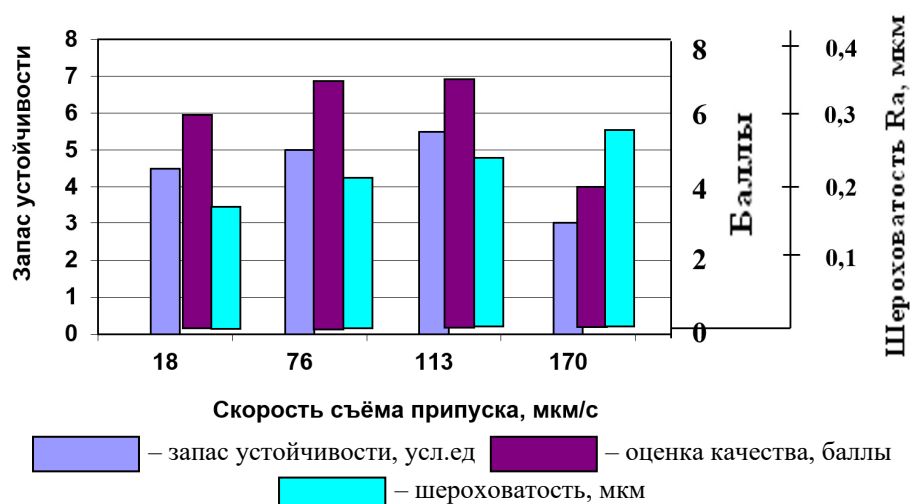


Рис. 4. Связь скорости съема припуска с качеством обработки поверхности на шлифовальном станке SIW-4

Анализ диаграммы изменения показателя колебательности (рис. 5) указывает, что значение показателя колебательности постепенно увеличивается от 1-го до 18-го кольца (от 5,2 до 6,7), а на 19-м и 20-м кольцах резко возрас-

тает (более чем на 20 %). Верхняя диаграмма соответствует исходному ряду показателей колебательности, средняя – сглаженному ряду методом скользящего среднего, нижняя – ряду из первых разностей показателей колебательности. Более четко достаточно существенное изменение показателя колебательности видно на графике изменения его первых разностей, свидетельствующем о соответствующем снижении запаса устойчивости и наступлении начальной фазы катастрофического износа резца на 19-м кольце. Именно первые разности используются в специальном программно-математическом обеспечении для выявления начала катастрофического износа резца. Вычисление запаса устойчивости позволяет оперативно выявлять его начальную фазу и, соответственно, повышает эффективность использования дорогостоящего инструмента.

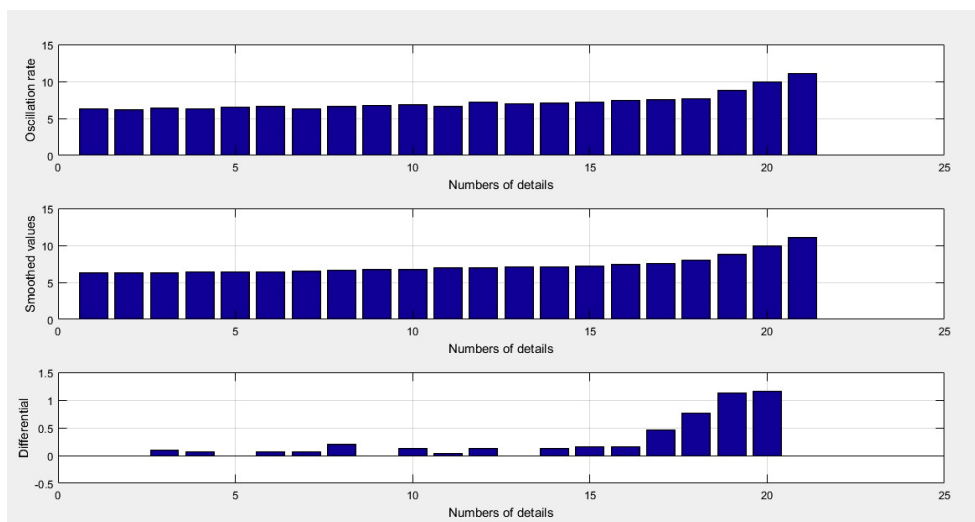


Рис. 5. Изменение показателя колебательности ДС и его первых разностей при предварительной обработке дорожки качения колец 42822/01 на токарном станке модели КМ-205

Далее рассмотрим применение интегральных оценок СПМ ВА колебаний на шлифовальных АМС для обработки дорожек качения колец подшипников [4, 15]. Из результатов исследований внутришлифовальных станков модели SIW-5 видно (рис. 6), что значение параметра качества «волнистость» дорожки качения минимально для станка № 395, имеющего наименьшие значения интегральных оценок СПМ и АКФ.

Заключение

Результаты применения стохастических характеристик ВА колебаний динамической системы токарных и шлифовальных станков различных моделей показали, что целесообразнее оценивать динамическое качество автоматизированных станков, что позволяет осуществлять их сравнение по этому параметру, выбирать значения режима резания при обработке высокоточных деталей с заданным качеством, а также выявлять начальную фазу катастрофического износа резца для своевременной замены и более полного использования его ресурса.

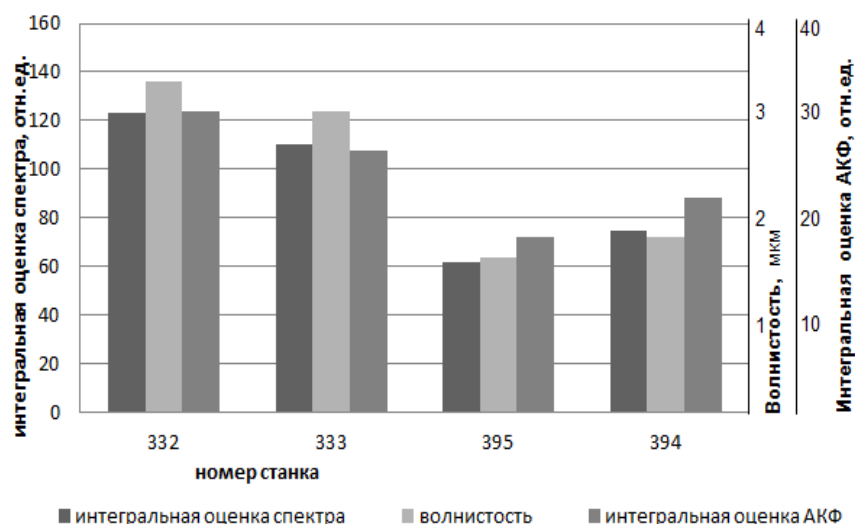


Рис. 6. Сопоставительный анализ волнистости дорожек качения колец подшипников (допустимое значение 2 мкм), интегральных оценок СПМ, АКФ и показателя колебательности внутришлифовальных станков SIW-5

Таким образом, использование запаса устойчивости ДС или интегральных оценок АКФ и СПМ ВА колебаний показало целесообразность их применения для решения целого ряда практических задач, связанных с повышением эффективности функционирования прецизионных автоматизированных станков.

Список литературы

1. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев : Техника, 1975. 136 с.
3. Аршанский М. М., Щербаков В. П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
4. Игнатьев С. А., Горбунов В. В., Игнатьев А. А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 160 с.
5. Бржозовский Б. М., Игнатьев А. А., Добряков В. А., Мартынов В. В. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Саратов : Саратов. политехн. ин-т, 1992. Ч. 1. 160 с.
6. Бржозовский Б. М., Игнатьев А. А., Добряков В. А., Мартынов В. В. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Саратов : Саратов. политехн. ин-т, 1994. Ч. 2. 156 с.
7. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М. : Машиностроение, 1987. 224 с.
8. Мартинов Г. М., Григорьев А. С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 2. С. 23–28.
9. Тугенгольд А. К., Димитров В. П., Волошин Р. Н., Борисова Л. В. Мониторинг состояния станков и станочных систем // СТИН. 2017. № 3. С. 11–17.
10. Игнатьев А. А., Каракозова В. А., Игнатьев С. А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов : СГТУ, 2013. 124 с.
11. Игнатьев С. А., Коновалов В. В., Игнатьев С. А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов : СГТУ, 2014. 92 с.

12. Игнатьев А. А., Гаврилова А. В., Игнатьев С. А. Теоретические экспериментальные исследования динамического качества шлифовальных станков для обработки дорожек качения колец подшипников // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 1. С. 124–133.
13. Игнатьев А. А., Самойлова Е. М., Шамсадова Я. Ш. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2. С. 90–98.
14. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А. [и др.]. Выбор режима резания на автоматизированном токарном станке на основе оценки запаса устойчивости динамической системы // СТИН. 2018. № 6. С. 25–29.
15. Игнатьев А. А., Шамсадова Я. Ш., Игнатьев С. А. Применение интегральных оценок спектральных плотностей виброакустических колебаний для оценки динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 94–98.
16. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А. Автоматизированный контроль в системе управления качеством изготовления деталей подшипников // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 14–25.
17. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А. Автоматизированное распознавание катастрофического износа инструмента по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний. Саратов : СГТУ, 2020. 84 с.
18. Ignat'ev A. A., Dobrykov V. A., Ignat'ev S. A. [et al.]. Automated measurements in process monitoring system in bearing production // Journal of Physics: Conference Series. Metrological Support of Innovative Technologies : International Scientific Conference (ICMIT-2020) (Krasnoyarsk, Russia, March 4, 2020). 2020. Vol. 1515. P. 052057.
19. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. М. : Наука, 1979. 336 с.
20. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Полуэктова А. М. Условия идентификации динамической системы станка по автокорреляционной функции виброакустических колебаний при резании // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении : сб. науч. тр. Саратов : СГТУ, 2020. С. 17–22.
21. Lin Z. H., Hodgson D. C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1988. Vol. 28, № 2. P. 93–101.
22. Бесекерский В. А., Попов Е. В. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1975. 768 с.
23. Складчиков А. Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М. : Наука, 1965. 460 с.
24. Самойлова Е. М., Игнатьев А. А. Методы и алгоритмы интеллектуализации мониторинга технологических систем на основе автоматизированных станочных модулей интегрированного производства : в 3 ч. Ч. 2. Динамическая экспертная система поддержки принятия решения. Саратов : СГТУ, 2018. 100 с.

References

1. Kudinov V.A. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1967:360. (In Russ.)
2. Popov V.I., Loktev V.I. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Kiev: Tekhnika, 1975:136. (In Russ.)
3. Arshanskiy M.M., Shcherbakov V.P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallorезhushchikh stankakh = Vibrodiagnostics and precision control on machine tools*. Moscow: Mashinostroenie. 1988:136. (In Russ.)
4. Ignat'ev S.A., Gorbunov V.V., Ignat'ev A.A. *Monitoring tekhnologicheskogo protsessa kak element sistemy upravleniya kachestvom produktsii = Monitoring of the technology as an element of the quality management system*. Saratov: SGTU, 2018. 100 p.

- cal process as an element of the product quality management system*. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2009:160. (In Russ.)
5. Brzhozovskiy B.M., Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Martynov V.V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallorezhushchikh stankov: v 3 ch. = Accuracy and reliability of automated precision machine tools: in 3 parts*. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1992;1:160. (In Russ.)
6. Brzhozovskiy B.M., Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Martynov V.V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh pretsizionnykh metallorezhushchikh stankov: v 3 ch. = Accuracy and reliability of automated precision machine tools: in 3 parts*. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1994;2:156. (In Russ.)
7. Dobrynin S.A., Fel'dman M.S., Firsov G.I. *Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin = Methods for automated study of machine vibration*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:224. (In Russ.)
8. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. Diagnostics of cutting tools and prediction of residual tool life on CNC machines during machining. *STIN*. 2012;(2):23–28. (In Russ.)
9. Tugengol'd A.K., Dimitrov V.P., Voloshin R.N., Borisova L.V. Condition monitoring of machines and machine systems. *STIN*. 2017;(3):11–17. (In Russ.)
10. Ignat'ev A.A., Karakozova V.A., Ignat'ev S.A. *Stokhasticheskie metody identifikatsii v dinamike stankov = Stochastic identification methods in machine dynamics*. Saratov: SGTU, 2013:124. (In Russ.)
11. Ignat'ev S.A., Konovalov V.V., Ignat'ev S.A. *Identifikatsiya v dinamike stankov s ispol'zovaniem stokhasticheskikh metodov = Identification in machine dynamics using stochastic methods*. Saratov: SGTU, 2014:92. (In Russ.)
12. Ignat'ev A.A., Gavrilova A.V., Ignat'ev S.A. Theoretical experimental studies of the dynamic quality of grinding machines for processing the raceways of bearing rings. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2017;(1):124–133. (In Russ.)
13. Ignat'ev A.A., Samoylova E.M., Shamsadova Ya.Sh. Evaluation of the dynamic quality of machine tools using autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;2:90–98. (In Russ.)
14. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. et al. Choice of cutting mode on an automated lathe based on the assessment of the stability margin of a dynamic system. *STIN*. 2018;(6):25–29. (In Russ.)
15. Ignat'ev A.A., Shamsadova Ya.Sh., Ignat'ev S.A. Application of integral estimates of spectral densities of vibroacoustic oscillations to assess the dynamic quality of machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(3):94–98. (In Russ.)
16. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Automated control in the quality management system for the manufacture of bearing parts. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Saratov State Technical University*. 2020;(1):14–25. (In Russ.)
17. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. *Avtomatizirovannoe raspoznavanie katastroficheskogo iznosa instrumenta po stokhasticheskim kharakteristikam vibroakusticheskikh kolebaniy = Automated recognition of catastrophic tool wear by stochastic characteristics of vibroacoustic oscillations*. Saratov: SGTU, 2020:84. (In Russ.)
18. Ignat'ev A.A., Dobrykov B.A., Ignat'ev S.A. et al. Automated measurements in process monitoring system in bearing production. *Journal of Physics: Conference Series. Metrological Support of Innovative Technologies: International Scientific Conference (IC-MIT-2020)*. (Krasnoyarsk, Russia, March 4, 2020). 2020;1515:052057.
19. Bolotin V.V. *Sluchaynye kolebaniya uprugikh system = Random oscillations of elastic systems*. Moscow: Nauka, 1979:336. (In Russ.)

20. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Poluektova A.M. Conditions for identifying the dynamic system of the machine tool by the autocorrelation function of vibroacoustic vibrations during cutting. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino- i priborostro-enii: sb. nauch. tr. = Automation and control in mechanical engineering and instrumentation: collected articles*. Saratov: SGTU, 2020;17–22. (In Russ.)
21. Lin Z.H., Hodgson D.C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1988;28(2):93–101.
22. Besekerskiy V.A., Popov E.V. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya = Theory of automatic control systems*. Moscow: Nauka, 1975;768. (In Russ.)
23. Sklyarevich A.N. *Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem = Operator methods in statistical dynamics of automatic systems*. Moscow: Nauka, 1965;460. (In Russ.)
24. Samoylova E.M., Ignat'ev A.A. *Metody i algoritmy intellektualizatsii monitoringa tekhnologicheskikh sistem na osnove avtomatizirovannykh stanochnykh moduley integriruyannogo proizvodstva: v 3 ch. Ch. 2. Dinamicheskaya ekspertnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya = Methods and algorithms for intellectualization of monitoring of technological systems based on automated machine modules of integrated production: in 3 parts. Part 2. Dynamic expert decision support system*. Saratov: SGTU, 2018;100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Анатольевич Игнатьев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технической
механики и мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: atp@sstu.ru

Владимир Анатольевич Добряков

кандидат технических наук, доцент
кафедры технической механики
и мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: dobryakovva@mail.ru

Станислав Александрович Игнатьев

доктор технических наук, профессор
кафедры технической механики
и мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: ignatievsa@mail.ru

Aleksandr A. Ignat'ev

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of technical
mechanics and mechatronics, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov
(77 Politekhnikeskaya street, Saratov,
Russia)

Vladimir A. Dobryakov

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of technical mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politekhnikeskaya street,
Saratov, Russia)

Stanislav A. Ignat'ev

Doctor of engineering sciences, professor
of the sub-department of technical
mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politekhnikeskaya
street, Saratov, Russia)

Вера Алексеевна Каракозова

кандидат технических наук, доцент
кафедры технической механики
и мехатроники, Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: karakozova.v@bk.ru

Vera A. Karakozova

Candidate of engineering sciences,
associate professor of the sub-department
of technical mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politekhnikeskaya
street, Saratov, Russia)

Поступила в редакцию / Received 05.03.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 09.08.2022

Принята к публикации / Accepted 04.10.2022