

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621.9

doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Обработка виброизмерительной информации при автоматизации распознавания катастрофического износа резца по запасу устойчивости динамической системы

А. А. Игнатьев¹, В. А. Добряков², В. А. Ревякин³

^{1,2,3}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

¹atp@sstu.ru, ³tmm@sstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из доминирующих факторов, влияющих на макро- и микрогеометрические параметры точности деталей, является динамическое качество автоматизированных металлорежущих станков (АМС). Оно оценивается по результатам измерения виброакустических колебаний динамической системы (ДС) станков, которые далее обрабатываются различными методами. Динамическое качество может изменяться для станков одной модели в зависимости от их технического состояния, а также для каждого станка в зависимости от назначенного режима резания, износа резца и других факторов. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю. А., показали, что оценку динамического качества АМС целесообразно выполнять по запасу устойчивости ДС, определяемому в результате специальной обработки виброизмерительной информации и идентификации автокорреляционной функции (АКФ) колебаний ДС. Целью работы является алгоритмизация процесса обработки виброизмерительной информации при формировании оценок динамического качества станка по запасу устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа резца. Для достижения цели, во-первых, проводится теоретическое обоснование вида АКФ колебаний при резании, что используется затем для идентификации АКФ по экспериментальным данным; во-вторых, предлагается методика и алгоритм обработки виброизмерительной информации; в-третьих, выполняется практическая апробация метода распознавания начала катастрофического износа резца на токарном станке с числовым программным управлением. *Материалы и методы.* Можно выделить два основных направления анализа и оценки динамического качества станков, причем первое базируется на теоретических моделях, в которых в определенной степени используются результаты экспериментов, а второе – на экспериментальных исследованиях колебаний различных узлов АМС с дальнейшей математической обработкой измерительной информации для идентификации модели ДС и формирования оценок динамического качества. Результаты многолетних исследований токарных и шлифовальных станков показали, что в производственных условиях именно второе направление позволяет оперативно оценивать динамическое качество АМС при условии компьютерной обработки измерительной информации. *Результаты и выводы.* Ре-

зультаты теоретического анализа стохастических колебаний в динамической системе станка и экспериментальных исследований точности обработки колец подшипников на токарном станке с числовым программным управлением с одновременным автоматизированным измерением виброакустических колебаний и вычислением показателей колебательности динамической системы подтвердили их корреляционную связь и возможность определения критерия для выявления начальной фазы катастрофического износа резца по существенному изменению (более чем на 50 %) первых разностей показателей колебательности.

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

Для цитирования: Игнат'ев А. А., Добряков В. А., Ревякин В. А. Обработка виброизмерительной информации при автоматизации распознавания катастрофического износа резца по запасу устойчивости динамической системы // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 1. С. 75–91. doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Vibration measurement information processing when automating recognition catastrophic cutter wear by dynamic system stability margin

A.A. Ignat'ev¹, V.A. Dobryakov², V.A. Revyakin³

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

¹atp@sstu.ru, ³tmm@sstu.ru

Abstract. Background. One of the dominant factors affecting the macro- and microgeometric accuracy parameters of parts is the dynamic quality of automated metal-cutting machines. It is evaluated based on the results of measuring vibroacoustic vibrations of the dynamic system (DS) of machines, which are then processed by various methods. Dynamic quality can vary for machines of the same model depending on their technical condition, as well as for each machine depending on the assigned cutting mode, cutter wear and other factors. Studies performed at the Yuri Gagarin State Technical University showed that it is advisable to assess the dynamic quality of the machines by the DS stability margin determined as a result of special processing of vibration measurement information and identification of the DS oscillation autocorrelation function (ACF). The purpose of the work is to algorithmize the process of processing vibration measuring information when generating estimates of the dynamic quality of the machine by the stability margin of the dynamic system in order to identify the initial phase of catastrophic wear of the cutter. To achieve the goal, firstly, a theoretical justification of the type of ACF vibrations during cutting is carried out, which is then used to identify ACF from experimental data, secondly, a method and algorithm for processing vibration measuring information is proposed, and thirdly, a practical test of the method for recognizing the beginning of catastrophic wear of a cutter on a CNC lathe is carried out. **Materials and methods.** Two main areas of analysis and evaluation of the dynamic quality of machines can be distinguished, the first being based on theoretical models, in which the results of experiments are used to a certain extent, and the second - on experimental studies of vibrations of various machines nodes with further mathematical processing of measurement information to identify the DS model and form estimates of dynamic quality. The results of many years of research of turning and grinding machines have shown that in production conditions it is the second direction that allows you to quickly assess the dynamic quality of the machines, subject to computer processing of measuring information. **Results and conclusions.** The results of theoretical analysis of

stochastic oscillations in the dynamic system of the machine and experimental studies of the accuracy of machining bearing rings on a CNC lathe with simultaneous automated measurement of vibroacoustic oscillations and calculation of oscillation indicators of the dynamic system confirmed their correlation and the possibility of determining the criterion for detecting the initial phase of catastrophic wear of the cutter by a significant change (by more than 50%) of the first differences in oscillation indicators.

Keywords: machines, dynamic quality, vibroacoustic vibrations, autocorrelation function, spectral density, stability margin, integral estimates, processing quality

For citation: Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Vibration measurement information processing when automating recognition catastrophic cutter wear by dynamic system stability margin. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(1):75–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-1-7

Введение

При прецизионной обработке деталей для изделий машино- и приборостроения одним из доминирующих факторов, влияющих на макро- и микрогеометрические параметры точности деталей, является динамическое качество автоматизированных металлорежущих станков (АМС) [1–5]. Оно оценивается по результатам измерения виброакустических колебаний (ВА) динамической системы (ДС) станков, которые далее обрабатываются различными методами [6–9]. При заключительном проходе резцом формируются заданные параметры точности (размер, волнистость, шероховатость) обработанной поверхности, что вызывает необходимость минимизации ВА колебаний в паре «резец – деталь». Динамическое качество может изменяться для станков одной модели в зависимости от их технического состояния, а также для каждого станка в зависимости от назначенного режима резания, износа резца и других факторов. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю. А., показали, что оценку динамического качества АМС целесообразно выполнять по запасу устойчивости ДС, определяемому в результате специальной обработки виброизмерительной информации и идентификации автокорреляционной функции (АКФ) колебаний ДС [5, 10]. Важным в рассматриваемом случае является метод обработки измерительной информации, решающий задачу оперативного контроля динамического качества станков при решении следующих задач:

1) выбор режима резания, при котором качество обработанной поверхности наиболее высокое, в том числе при изменении материалов заготовки и инструмента;

2) определение момента наступления катастрофического износа резца для его своевременной замены;

3) сравнение станков одной модели по динамическому качеству и выявление имеющих низкие значения для реализации гибкого технического обслуживания.

Практическое решение первой задачи на станках различных моделей подробно рассмотрено в ранее опубликованных работах [11, 12].

Целью данной работы является алгоритмизация процесса обработки виброизмерительной информации при формировании оценок динамического качества станка по запасу устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа резца.

Для достижения цели, во-первых, проводится теоретическое обоснование вида АКФ колебаний при резании, что используется затем для идентификации АКФ по экспериментальным данным; во-вторых, предлагается методика и алгоритм обработки виброизмерительной информации; в-третьих, выполняется практическая апробация метода распознавания начала катастрофического износа резца на токарном станке с числовым программным управлением (ЧПУ).

Методическое обеспечение для формирования оценок динамического качества станков на основе обработки информации о колебаниях динамической системы

Можно выделить два основных направления анализа и оценки динамического качества станков, причем первое базируется на теоретических моделях, в которых в определенной степени используются результаты экспериментов, а второе – на экспериментальных исследованиях колебаний различных узлов АМС с дальнейшей математической обработкой измерительной информации для идентификации модели ДС и формирования оценок динамического качества [5, 13]. С практической точки зрения второе направление более адекватно позволяет оценить реальное динамическое качество станка.

Идентификация ДС также имеет два основных направления. Первое основывается на создании аналитических моделей достаточно высокой размерности и их уточнении по результатам экспериментов с использованием, например, модального анализа; второе – на экспериментальных методах, связанных с формированием на входе ДС сигналов определенной формы и обработкой выходных сигналов по специальным методикам [6]. Результаты многолетних исследований токарных и шлифовальных станков, как указано выше, показали, что в производственных условиях именно второе направление позволяет оперативно оценивать динамическое качество АМС при условии компьютерной обработки измерительной информации [5, 9].

На рис. 1 представлена методика формирования оценок динамического качества станков, которая базируется на построении теоретических моделей колебательных процессов в ДС, необходимых для выявления их особенностей в данном станке и последующей идентификации по экспериментальным данным, а также на экспериментальных исследованиях точности обработки и ее взаимосвязи с колебаниями и на их обработке различными методами для выбора информативных параметров. Следует отметить, что для оценки динамического качества АМС могут использоваться отдельные частоты спектра колебаний ДС [6, 14], интегральные оценки спектральной плотности мощности (СПМ) и интегральные оценки АКФ [15, 16], а также показатель колебательности ДС и коэффициент затухания АКФ [5]. Вычисление двух последних информативных параметров предпочтительно с точки зрения автоматизации обработки измерительной информации.

Для практической реализации автоматизированного распознавания катастрофического износа резца необходимо пройти следующие этапы:

1. Обосновать изменение динамического качества станка на основе оценки запаса устойчивости ДС по мере износа инструмента. Указанное отражено ранее в работах [11, 17] на основе построения модели ДС, учитывающей износ резца.

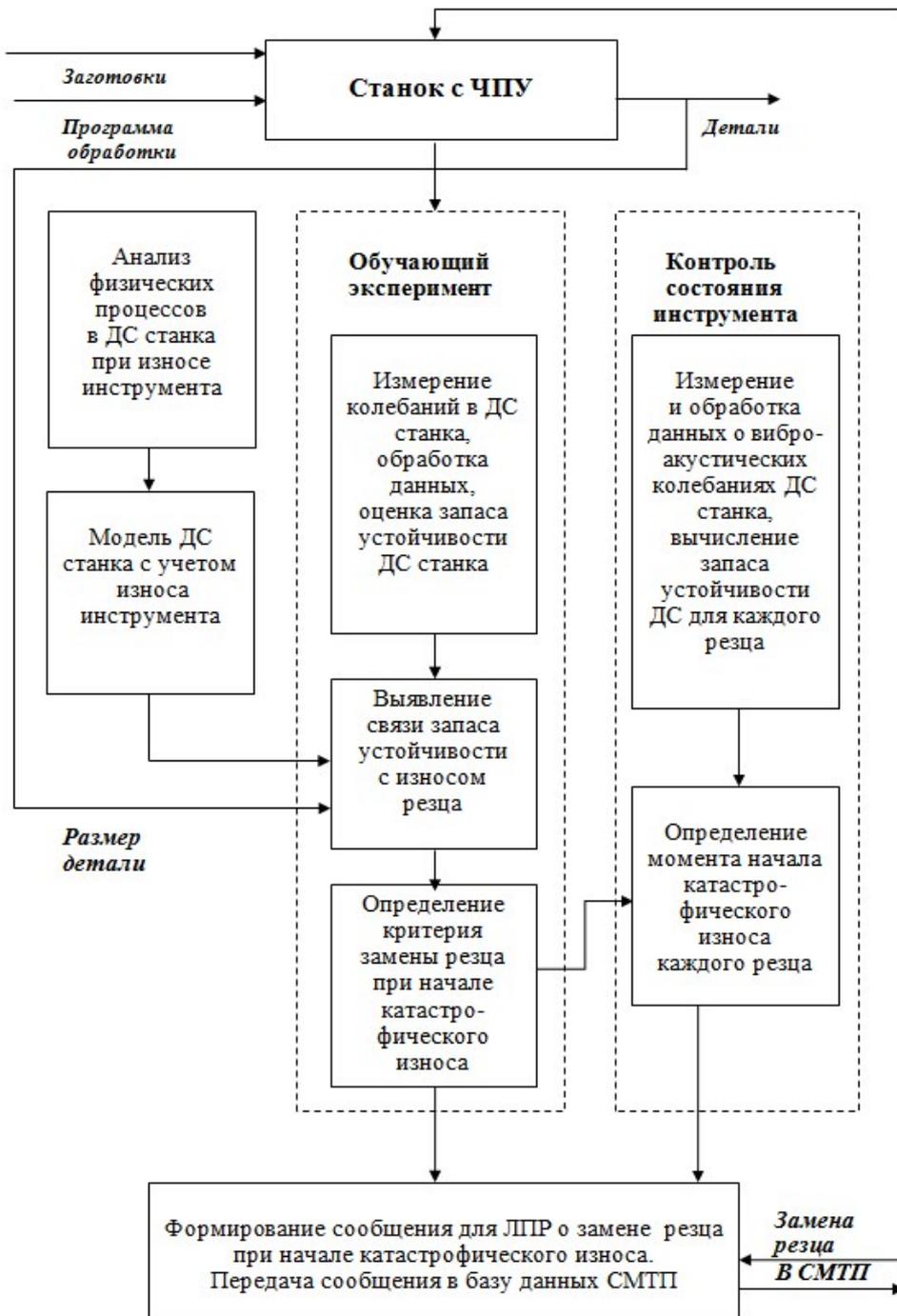


Рис. 1. Алгоритмизация выявления начала катастрофического износа резца по запасу устойчивости на основе обработки измерительной информации о колебаниях динамической системы

2. Выявить связь износа резца с изменением запаса устойчивости ДС на основе измерения колебаний и их последующей обработки для обоснования критерия начала катастрофического износа инструмента. Это реализуется

в рамках обучающего эксперимента с передачей результатов в экспертную систему.

3. Апробировать методику распознавания начальной фазы катастрофического износа резца в производственных условиях на основе использования результатов обучающего эксперимента с передачей результатов по стойкости различных резцов в базу данных системы мониторинга технологического процесса (СМТП). Решение о необходимости замены резца формируется либо автоматически в экспертной системе, либо лицом, принимающим решение (ЛПР).

Наиболее высокое динамическое качество АМС соответствует максимуму запаса устойчивости, который можно оценить, во-первых, по критерию Михайлова, в котором запас устойчивости равен минимальному расстоянию от кривой Михайлова до начала координат; во-вторых, по показателю колебательности ДС, вычисляемому из ее передаточной функции, идентифицированной по АКФ колебаний [5, 10]; во-третьих, по коэффициенту затухания АКФ [17]. Важной в данном случае является автоматизация обработки измерительной информации, решающая задачу оперативного контроля динамического качества станков. С этой точки зрения в производственных условиях достаточно просто вычисляется показатель колебательности ДС. Результаты измерений по каждому станку накапливаются в экспертной системе и передаются в СМТП.

На втором этапе в процессе обучающего эксперимента при реализации методики формирования оценок динамического качества АМС первоначально определяется передаточная функция ДС $W(p)$, а затем показатель колебательности, изменение которого дает представление о снижении запаса устойчивости ДС при износе режущего инструмента.

При определении передаточной функции $W(p)$ предполагается, что входным сигналом для динамической системы, возбуждающим в ней колебания, является сила резания, представляющая собой стохастический сигнал $\xi(t)$ типа ограниченный «белый шум» с АКФ $K_{\xi\xi}(\tau)$ [2, 18]. В этом случае для вычисления $W(p)$ используется формула, полученная в работе [19]:

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W(p) \cdot W(-p), \quad (1)$$

где $K_{yy}(p)$ – изображение по Лапласу АКФ выходного сигнала $K_{yy}(\tau)$.

В качестве выходного сигнала рассматриваются регистрируемые колебания ДС при резании.

Показатель колебательности ДС вычисляется по формуле

$$M = \frac{A_{\max}(\omega)}{A(0)}, \quad (2)$$

где $A_{\max}(\omega)$ – максимальное значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) динамической системы; $A(0)$ – значение АЧХ при $\omega = 0$.

Для расчета АЧХ $A(\omega)$ используется известная формула [20]:

$$A(\omega) = \sqrt{(W(j\omega))^2}, \quad (3)$$

где $W(j\omega)$ – частотная функция, полученная из передаточной функции $W(p)$ заменой $p = j\omega$.

При этом считается, что запас устойчивости максимален для значений показателя колебательности $M = 1,1, \dots 1,5$, а с ростом величины M запас устойчивости снижается.

Далее следует получить математическую модель АКФ выходного сигнала, которая необходима для ее идентификации по данным экспериментальных измерений колебаний при точении и определении в дальнейшем тенденции изменения показателя колебательности ДС при износе резца.

Математическая модель автокорреляционной функции виброакустических колебаний динамической системы станка

Для получения математической модели АКФ колебаний, зарегистрированных на резцовом блоке токарного станка, необходимо выполнить анализ колебаний в паре «резец – деталь» при изложенном выше условии, что возбуждающая ДС сила резания имеет стохастический характер. Дифференциальное уравнение колебаний в паре «резец – деталь» в правой части содержит стохастическую компоненту $F_\xi(t)$:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + H \frac{dy}{dt} + Cy = F_\xi(t), \quad (4)$$

где M, H, C – приведенные к резцу массы, коэффициент демпфирования и жесткость упругой системы станка [2]; $F_\xi(t)$ – сила резания, действующая на систему; $y(t)$ – регистрируемые колебания резцового блока.

Введем обозначения:

$$g = \frac{H}{2M}, \quad \omega_0^2 = \frac{C}{M}, \quad \xi(t) = \frac{F_\xi(t)}{M}, \quad (5)$$

тогда уравнение (4) примет вид

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2g \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \xi(t), \quad (6)$$

где g – показатель демпфирования; ω_0 – частота собственных колебаний.

Стохастический характер правой части уравнения не позволяет в явном виде решить уравнение (6) относительно регистрируемой величины $y(t)$ из-за стохастической компоненты в правой части уравнения. В этом случае можно воспользоваться результатами работ [21, 22], привести уравнение (6) к виду

$$\left(\frac{d^2}{d\tau^2} + 2g \frac{d}{d\tau} + \omega_0^2 \right) K_{yy}(\tau) = K_{\xi\xi}(\tau), \quad (7)$$

где $K_{\xi\xi}(\tau)$ и $K_{yy}(\tau)$ – автокорреляционные функции входного и выходного сигналов соответственно.

Из уравнения (7) следует, что АКФ $K_{yy}(\tau)$ адекватно отражает регистрируемый колебательный процесс в паре «резец – деталь». Решение уравнения (7) относительно $K_{yy}(\tau)$ ранее было получено в работе [9], но объем вычислений значителен. В работе [23] был получен теоретически общий вид АКФ с применением теории вычетов при вычислениях интегралов от комплексных функций, но объем расчетов также значителен, поэтому предлагается более простой метод вычисления АКФ $K_{yy}(\tau)$, основы которого изложены в работе [24].

При условии, что ДС является линейной узкополосной системой, АКФ регистрируемого сигнала вычисляется по формуле [24]:

$$K_{yy}(\tau) = \left[\frac{S_0}{\pi} \int_0^{\infty} A^2(\Omega) \cos \Omega \tau d\Omega \right] \cos \omega_0 \tau, \quad (8)$$

где $\Omega = \omega - \omega_0$.

Динамическая система реально является узкополосной, что показано в работе [9] для токарного станка с ЧПУ модели ПАБ-350.

Передачная функция ДС, адекватно отражающая динамические свойства системы по уравнению (4), соответствует колебательному звену

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2\alpha T p + 1}, \quad (9)$$

где $T = 1/\omega_0$; K – коэффициент передачи; α – коэффициент затухания.

Из формулы (9) можно получить выражение для квадрата АЧХ динамической системы:

$$A^2(\omega) = \frac{K^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (10)$$

Далее формулу (10) приведем к виду

$$A^2(\omega) = \frac{K^2}{\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}. \quad (11)$$

Так как $A(\omega)$ колебательного звена имеет явно выраженную область резонанса, то получаем

$$A^2(\Omega) = \frac{K^2}{\left(\frac{2\Omega}{\omega_0}\right)^2 + 4\alpha^2} = \frac{K^2 \omega_0^2}{4(\Omega^2 + \alpha^2)}, \quad (12)$$

где $\omega_0 \gg \Delta_c$, Δ_c – полоса пропускания системы.

В этом случае из формулы (8) следует

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2}{4\pi} \left[\int_0^\infty \frac{\cos \Omega \tau}{\Omega^2 + \alpha^2} d\Omega \right] \cos \omega_0 \tau = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2 \pi}{4\pi 2\alpha} e^{-\alpha \tau} \cos \omega_0 \tau. \quad (13)$$

Вычисление интеграла дает окончательное выражение для АКФ:

$$K_{yy}(\tau) = \frac{S_0 K^2 \omega_0^2}{8\alpha} e^{-\alpha \tau} \cos \omega_0 \tau. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что АКФ выходного сигнала представляет собой затухающую косинусоиду. Это согласуется с формулой, полученной в работе [23], но значительно проще с точки зрения математических преобразований. Формула (14) используется для идентификации экспериментальной АКФ колебаний, применяемой далее в соответствии с изложенной методикой для оценки запаса устойчивости динамической системы.

Алгоритмизация распознавания начальной фазы катастрофического износа резца по изменению запаса устойчивости динамической системы

Обучающий эксперимент направлен на формирование критерия замены резца при наступлении начальной фазы его катастрофического износа. В ходе эксперимента осуществляется измерение колебаний резцового блока станка в диапазоне до 4 кГц при обработке конкретным резцом. Измерения выполняются с помощью виброизмерителя ВШВ-003М3, датчик которого устанавливается на резцовый блок станка. Затем данные виброизмерений обрабатываются компьютером с помощью специального программного-математического обеспечения [25], которое позволяет последовательно получить автокорреляционную функцию виброакустических колебаний $K_{yy}(\tau)$, передаточную функцию при резании $W(p)$, амплитудно-частотную характеристику ДС, а затем из нее вычислить показатель колебательности M , по которому оценивается запас устойчивости.

Для выявления связи запаса устойчивости ДС с износом резца осуществляется последовательная обработка деталей и контролируется их характерный размер, изменяющийся по мере износа резца, а также вычисляется запас устойчивости.

Как известно, износ резца при наступлении катастрофического износа резко увеличивается и, следовательно, изменяются размеры деталей. Кроме того, в это же время растет амплитуда виброакустических колебаний, что определяет снижение запаса устойчивости. Следовательно, резкое изменение запаса устойчивости может служить критерием замены инструмента и формирования соответствующего сообщения для ЛПР.

В производственных условиях проводятся аналогичные измерения колебаний резцового блока станка с вычислением запаса устойчивости ДС. При существенном снижении запаса устойчивости, как это установлено в обучающем эксперименте, формируется сообщение о начале катастрофического износа режущего инструмента и необходимости его замены. Аналогичные данные получают для каждого из резцов.

Сведения о количестве обработанных деталей конкретным резцом заносятся в базу данных СМТП. Это позволяет накапливать информацию о реальной стойкости инструмента и получать статистические данные о разбросе стойкости каждого из резцов.

Реальные значения запаса устойчивости в условных единицах можно получить, как указано выше, из измеренных колебаний резцового блока путем идентификации передаточной функции ДС. Исходя из полученных экспериментально-аналитическим путем запасов устойчивости для последовательно обработанных деталей можно выявить тенденцию их изменения при наступлении катастрофического износа резца и, соответственно, установить критерий выявления его начальной фазы.

Методика обработки виброизмерительной информации для экспериментально-аналитического определения запаса устойчивости и начала катастрофического износа резца отражена на рис. 2.

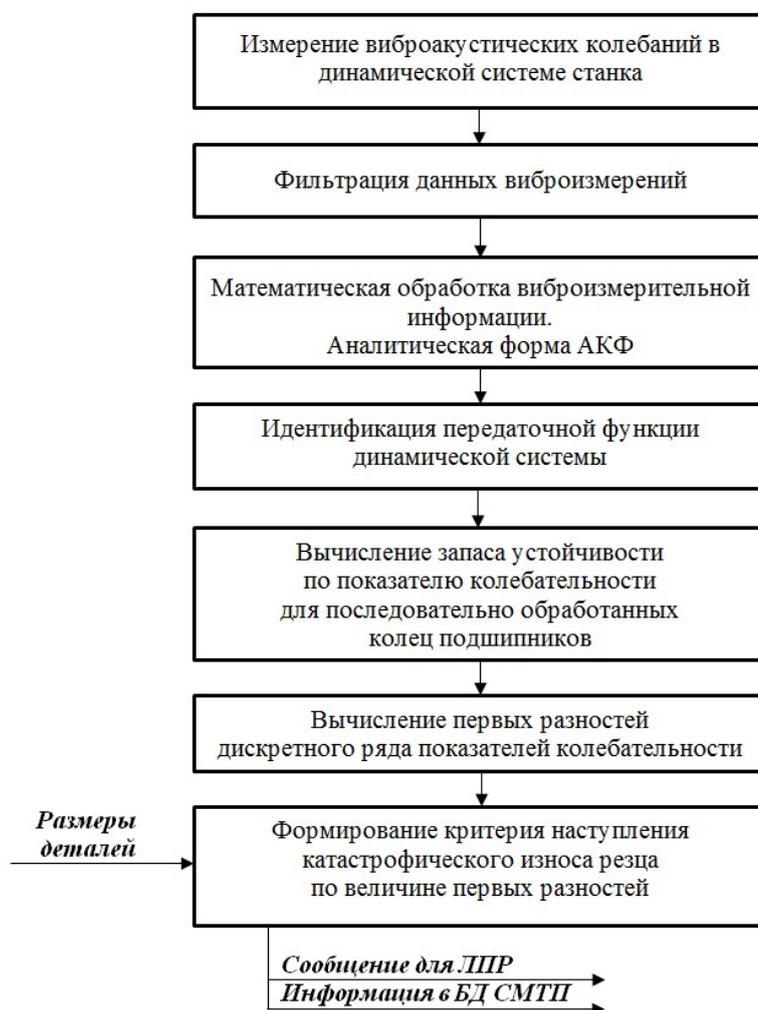


Рис. 2. Последовательность обработки виброизмерительной информации при экспериментально-аналитической оценке запаса устойчивости динамической системы для выявления начальной фазы катастрофического износа инструмента

Методика обработки данных виброизмерений состоит из нескольких этапов:

- 1) измерение виброакустических колебаний на резцовом блоке станка;
- 2) ввод данных виброизмерений в компьютер и их фильтрация для исключения влияния низкочастотных составляющих, связанных с вибрациями механических элементов станка;
- 3) вычисление АКФ и ее аппроксимация формулой (14);
- 4) идентификация передаточной функции по формуле (1);
- 5) расчет из передаточной функции АЧХ по формуле (3) и вычисление показателей колебательности ДС по формуле (2) для последовательно обработанных деталей с формированием дискретного ряда значений;
- 6) вычисление первых разностей сформированного дискретного ряда значений показателей колебательности;
- 7) формирование критерия наступления катастрофического износа резца по установленной величине первых разностей значений показателей колебательности при сравнении с изменением размеров деталей (критерий основан на существенном изменении значений первых разностей, например на 100 %, устанавливается в результате обучающего эксперимента).

При выявлении катастрофического износа резца компьютер формирует сообщение о необходимости замены инструмента для наладчика, а также передает его в базу данных СМТП для накопления статистических данных о стойкости каждого резца.

Таким образом, реализация методики в производственных условиях позволяет выявить начало катастрофического износа каждого резца, участвующего в обработке данной детали.

На рис. 3 представлена точностная диаграмма обработки колец подшипников из стали ШХ-15 на токарном станке с ЧПУ модели ПАБ-350, которая отражает снижение диаметрального размера дорожки качения по мере износа резца. При приближении размера к нижнему полю допуска на 31-й детали наладчиком введена коррекция на размер и обработка продолжилась. Начиная с 43-го кольца отмечено резкое снижение диаметрального размера, что отражает наступление катастрофического износа резца.

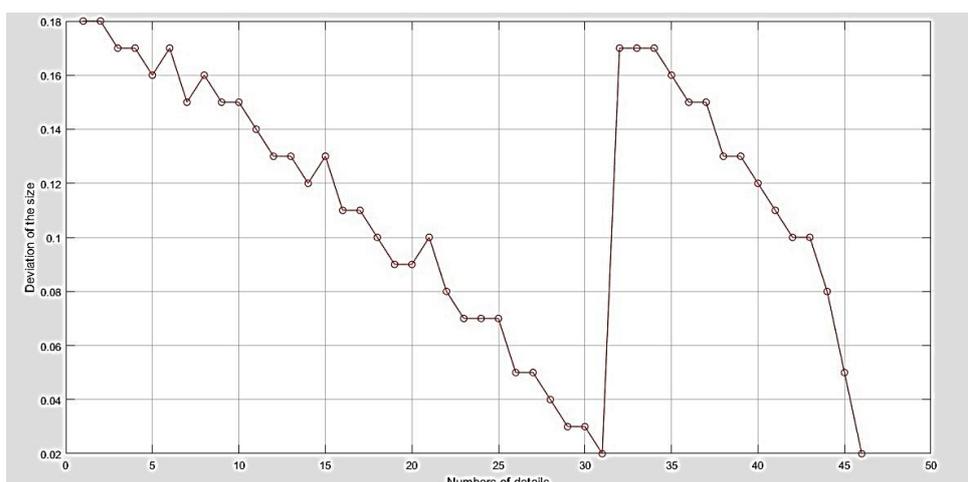


Рис. 3. Точностная диаграмма окончательной обработки дорожки качения кольца 42822 на токарном станке модели ПАБ-350

Результаты расчетов показателей колебательности по приведенным выше формулам представлены на рис. 4. Верхняя диаграмма отражает расчетные данные показателей колебательности, средняя – сглаженный ряд, нижняя – ряд первых разностей.

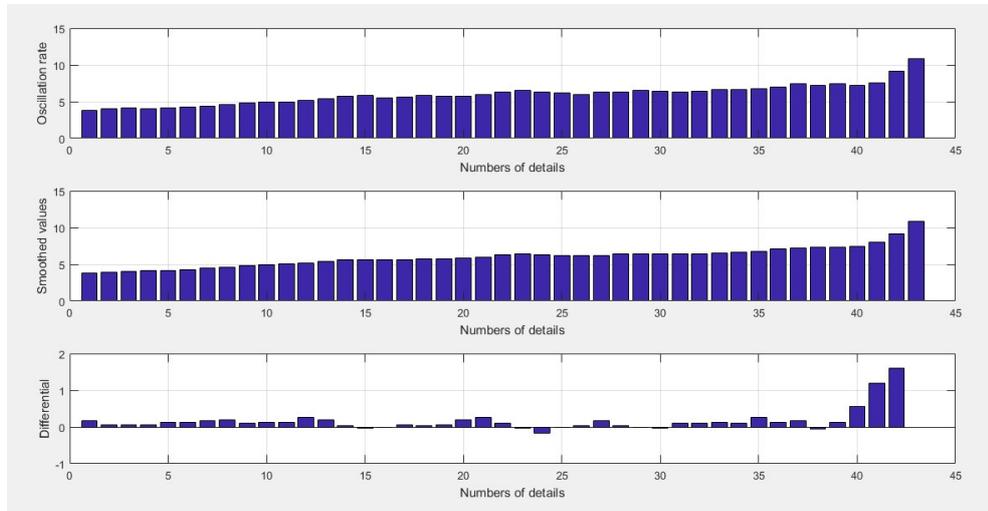


Рис. 4. Изменение показателей колебательности динамической системы и их первых разностей при окончательной обработке дорожки качения кольца 42822/01 на токарном станке модели ПАБ-350

Из рис. 4 видно, что до 43-го кольца показатели колебательности изменялись незначительно (от 4,2 до 5,4), но тренд на повышение прослеживается, т.е. запас устойчивости ДС незначительно снижался. Начиная с 43-го кольца наблюдается достаточно резкое снижение запаса устойчивости ДС (более чем на 20 %), что свидетельствует при сравнении с точностной диаграммой о наступлении катастрофического износа резца.

Для оценки степени связи изменения размеров колец с изменением запаса устойчивости ДС станка для окончательной операции точения дорожки качения выполнен расчет коэффициента парной корреляции по формуле

$$r_{dM} = \frac{n \sum_{i=1}^n M_i d_i - \sum_{i=1}^n M_i \sum_{i=1}^n d_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n M_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n M_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2 \right]}}, \quad (15)$$

где M_i , d_i – пары реализаций корреляционных выборок показателей колебательности и отклонений размеров; n – объем выборок.

Для данных эксперимента, представленных на рис. 3 и 4, коэффициент корреляции равен $r_{dM} = -0,71$, что свидетельствует о достаточно сильной связи изменения размеров колец и показателей колебательности и, следовательно, сильной связи износа резца с запасом устойчивости ДС станка.

Таким образом, наиболее важным для автоматизированной обработки деталей является оперативное выявление начала катастрофического износа резца и своевременная его замена, причем в этом случае не только предот-

вращается брак деталей, но и более полно используются режущие свойства инструмента.

Дальнейшее развитие и внедрение результатов проведенных исследований связано с применением интеллектуальных технологий, в частности экспертных систем и нейронных сетей, что существенно повышает эффективность автоматизированного распознавания начальной фазы катастрофического износа резца при различных сочетаниях материалов инструмента и заготовки.

Заключение

По результатам теоретических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Предложена и реализована методика формирования оценок динамического качества станков на основе автоматизированной обработки измерительной информации о колебаниях динамической системы при резании, применяемая для распознавания начальной фазы катастрофического износа резца по изменению ее запаса устойчивости.

2. Результаты теоретического анализа стохастических колебаний в динамической системе станка позволили установить вид автокорреляционной функции и получить на ее основе передаточную функцию, что дало возможность вычислить показатель колебательности, с помощью которого оценивается запас устойчивости системы.

3. Разработана методика обучающего эксперимента по определению начальной фазы катастрофического износа резца при токарной обработке, включающая алгоритмизацию обработки виброизмерительной информации, основанная на сравнении тенденций изменения диаметральных размеров дорожек качения колец подшипников и запаса устойчивости динамической системы станка.

4. Результаты экспериментальных исследований точности обработки колец подшипников на токарном станке с ЧПУ с одновременным автоматизированным измерением виброакустических колебаний и вычислением показателей колебательности динамической системы подтвердили их корреляционную связь и возможность определения критерия для выявления начальной фазы катастрофического износа резца по существенному изменению (более чем на 50 %) первых разностей показателей колебательности.

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. Козочкин М. П. Влияние динамических характеристик станков на вибрации при резании // СТИН. 2014. № 2. С. 4–9.
4. Тугенгольд А. К., Димитров В. П., Волошин Р. Н., Борисова Л. В. Мониторинг состояния станков и станочных систем // СТИН. 2017. № 3. С. 11–17.
5. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Игнатъев С. А. Экспериментально-аналитическая оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2 (93). С. 38–52.
6. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М. : Машиностроение, 1987. 224 с.

7. Аршанский М. М., Щербаков В. П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
8. Бржозовский Б. М., Игнатъев А. А., Добряков В. А., Мартынов В. В. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков : в 3 ч. Саратов : Сарат. политехн. ин-т, 1994. Ч. 2. 156 с.
9. Игнатъев С. А., Коновалов В. В., Игнатъев С. А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов. Саратов : СГТУ, 2014. 92 с.
10. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Ревякин В. А. Минимизация влияния колебательных процессов на качество деталей при обработке на прецизионных автоматизированных станках на основе системного подхода // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2023. № 3 (98). С. 20–30.
11. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А. [и др.]. Назначение режима точения на основе оценки динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 130–140.
12. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А., Ревякин В. А. Модель динамической системы токарного станка при резании труднообрабатываемых материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 148–158.
13. Игнатъев А. А. Методы идентификации динамического качества станков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении : сб. науч. тр. Саратов : СГТУ, 2013. С. 85–91.
14. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учеб. пособие. СПб. : Севзапучцентр, 2013. 152 с.
15. Игнатъев 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.
16. Игнатъев А. А., Шамсадова Я. Ш., Игнатъев 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.
17. Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Насад И. П. Моделирование динамической системы токарного станка на основе оценки коэффициента затухания автокорреляционной функции колебаний // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 2. С. 17–22.
18. Lin Z. H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures // Int. J. Mach. Tools Manufact. 1988. Vol. 28, № 2. P. 93–101.
19. Складчиков А. Н. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М. : Наука, 1965. 460 с.
20. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1975. 768 с.
21. Адомиан Дж. Стохастические системы / пер. с англ. Н. Г. Волкова. М. : Мир, 1987. 376 с.
22. Болотин В. В. Случайные колебания упругих систем. М. : Наука, 1979. 336 с.
23. Самойлова Е. М., Игнатъев 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.
24. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М. : Советское радио, 1974. 552 с.
25. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Игнатъев С. А. Автоматизированное распознавание катастрофического износа инструмента по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний. Саратов : СГТУ, 2020. 84 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. Kozochkin M.P. The influence of dynamic characteristics of machine tools on vibrations during cutting. *STIN*. 2014;(2):4–9. (In Russ.)
4. Tugengol'd A.K., Dimitrov V.P., Voloshin R.N., Borisova L.V. Monitoring the condition of machines and machine systems. *STIN*. 2017;(3):11–17. (In Russ.)
5. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Experimental and analytical assessment of the dynamic quality of machine tools based on stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2022;(2):38–52. (In Russ.)
6. Dobrynin S.A., Fel'dman M.S., Firsov G.I. *Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin = Methods of automated study of machine vibration*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:224. (In Russ.)
7. Arshanskiy M.M., Shcherbakov V.P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallorezhushchikh stankakh = Vibration diagnostics and precision control on metal-cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:136. (In Russ.)
8. 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 metal-cutting machines: in 3 parts*. Saratov: Sarat. politekhn. in-t, 1994;Pt.2:156. (In Russ.)
9. Ignat'ev S.A., Konovalov V.V., Ignat'ev S.A. *Identifikatsiya v dinamike stankov s ispol'zovaniem stokhasticheskikh metodov = Identification in machine tool dynamics using stochastic methods*. Saratov: SGTU, 2014:92. (In Russ.)
10. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Minimizing the impact of oscillatory processes on the quality of parts when processing on precision automated machines based on a system approach. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Saratov State Technical University*. 2023;(3):20–30. (In Russ.)
11. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A. et al. Assignment of the turning mode based on the assessment of the dynamic quality of the machines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh za-vedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):130–140. (In Russ.)
12. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. Model of the dynamic system of a lathe when cutting difficult-to-machine materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(2):148–158. (In Russ.)
13. Ignat'ev A.A. Methods of identification of dynamic quality of machine tools. *Avtomatizatsiya i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr. = Automation and control in mechanical engineering and instrument making: collected papers*. Saratov: SGTU, 2013:85–91. (In Russ.)
14. Barkov A.V., Barkova N.A. *Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibratsii: ucheb. posobie = Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis: textbook*. Saint Petersburg: Sevzapuchtsentr, 2013:152. (In Russ.)
15. Ignat'ev A.A., Samoylova E.M., Shamsadova Ya.Sh. Evaluation of dynamic quality of machine tools using autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(2):90–98. (In Russ.)
16. Ignat'ev A.A., Shamsadova Ya.Sh., Ignat'ev S.A. Application of integral estimates of spectral densities of vibroacoustic vibrations for assessing the dynamic quality of machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2018;(3):94–98. (In Russ.)

17. Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Nasad I.P. Modeling of the dynamic system of a lathe based on the assessment of the damping coefficient of the autocorrelation function of oscillations. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and information technology.* 2023;(2):17–22. (In Russ.)
18. Lin Z.H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 1988;28(2):93–101.
19. Sklyarevich A.N. *Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem = Operator methods in statistical dynamics of automatic systems.* Moscow: Nauka, 1965:460. (In Russ.)
20. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya = Theory of automatic control systems.* Moscow: Nauka, 1975:768. (In Russ.)
21. Adomian Dzh. *Stokhasticheskie sistemy = Stochastic systems.* Transl. from Eng. by N.G. Volkov. Moscow: Mir, 1987:376. (In Russ.)
22. Bolotin V.V. *Sluchaynye kolebaniya uprugikh system = Random vibrations of elastic systems.* Moscow: Nauka, 1979:336. (In Russ.)
23. Samoylova E.M., Ignat'ev A.A. *Metody i algoritmy intellektualizatsii monitoringa tekhnologicheskikh sistem na osnove avtomatizirovannykh stanochnykh moduley integrirovannogo 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.)
24. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki = Theoretical foundations of statistical radio engineering.* Moscow: Sovetskoe radio, 1974:552. (In Russ.)
25. 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 based on stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations.* Saratov: SGTU, 2020:84. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

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

E-mail: atp@sstu.ru

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

E-mail: atp@sstu.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 Politehnicheskaya street, Saratov,
Russia)

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

Владислав Анатольевич Ревякин

старший преподаватель кафедры
технической механики и мехатроники,
Саратовский государственный
университет имени Гагарина Ю. А.
(Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: tmm@sstu.ru

Vladislav A. Revyakin

Senior lecturer of the sub-department
of technical mechanics and mechatronics,
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov (77 Politehnicheskaya street,
Saratov, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 12.12.2024

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted 02.03.2025