

УДК 621.9

doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-11

Модель динамической системы токарного станка при резании труднообрабатываемых материалов

А. А. Игнатъев¹, Т. Г. Насад², В. А. Добряков³, В. А. Ревякин⁴

^{1,2,3,4}Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

¹atp@sstu.ru, ²tnas@mail.ru, ³tmm@sstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обеспечение качества поверхности ответственных изделий авиационной техники, химического, энергетического машиностроения, транспортных систем различного назначения предъявляет определенные требования к оборудованию, на котором осуществляется формирование поверхностей. Большинство деталей, в том числе из труднообрабатываемых материалов, обрабатывается точением на станках с числовым программным управлением, что приводит к необходимости выбора режимов резания, обеспечивающих заданные значения параметров точности и качества. Режимы обработки определяются взаимодействием конкретной пары «инструмент – деталь» и динамическим качеством станка. Обработка на станках токарной группы с использованием средств автоматизации представляет собой сложный процесс, зависящий от свойств динамической системы (ДС) станка. Процесс формообразования на токарном станке сопровождается виброакустическими колебаниями, спектр которых достаточно широк и определяется взаимодействием инструмента и детали, зависящим от силы резания, физико-механических свойств материалов контактирующих тел, процесса стружкообразования, трения в контакте «резец – деталь» и других факторов. Общее влияние этих факторов приближает спектр колебаний силы резания, воздействующей на ДС, к спектру колебаний типа «белый шум». Изменяя режимы резания, можно по характеристикам виброакустический колебаний ДС определить значения, соответствующие наиболее высокому динамическому качеству станка и качеству обработки. *Материалы и методы.* В Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю. А. разработан метод оценки динамического качества станков на различных режимах резания по запасу устойчивости ДС, вычисляемого из ее передаточной функции, идентифицированной по автокорреляционной функции виброакустических колебаний. Режим резания назначается по максимуму запаса устойчивости ДС при сохранении заданных значений макро- и микрогеометрических параметров качества обработки. Метод показал высокую эффективность при точении труднообрабатываемых материалов с учетом специфики обработки. *Результаты и выводы.* В процессе резания труднообрабатываемых материалов изменяются значения параметров обработки, корректируются значения коэффициентов a_0, \dots, a_5 в передаточной функции и, соответственно, изменяется запас устойчивости ДС. Запас устойчивости ДС может служить оценкой динамического качества станка на различных режимах резания при обработке различных групп труднообрабатываемых материалов.

Ключевые слова: точение, труднообрабатываемые материалы, режимы резания, виброакустические колебания, динамическая система токарного станка, качество поверхности

Для цитирования: Игнатъев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А., Ревякин В. А. Модель динамической системы токарного станка при резании труднообрабатываемых

A model of lathe dynamic system when cutting hard-to-work materials

A.A. Ignat'ev¹, T.G. Nasad², V.A. Dobryakov³, V.A. Revyakin⁴

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

¹atp@sstu.ru, ²tgnas@mail.ru, ³tmm@sstu.ru

Abstract. *Background.* Ensuring the surface quality of critical products of aviation equipment, chemical, power engineering, transport systems for various purposes presents certain requirements for the equipment on which surface formation is carried out. Most parts, including those made of hard-to-work materials, are turned on CNC machines, which requires you to select cutting modes that provide specified values for accuracy and quality parameters. Machining modes are determined by the interaction of a specific tool-part pair and the dynamic quality of the machine. Machining on lathe machines using automation tools is a complex process that depends on the properties of the dynamic machine system. The forming process on the lathe is accompanied by vibroacoustic vibrations, the spectrum of which is quite wide and is determined by the interaction of the tool and the part, depending on the cutting force, the physical and mechanical properties of the materials of the contacting bodies, the chip formation process, friction in the cutter-part contact and other factors. The overall influence of these factors brings the oscillation spectrum of the cutting force acting on the DS closer to the oscillation spectrum of the “white noise” type. By changing the cutting modes, you can determine the values corresponding to the highest dynamic quality of the machine and the quality of processing from the characteristics of VA oscillations of the ET. *Materials and methods.* The Gagarin Yu.A. State Technical University has developed a method for assessing the dynamic quality of machines in various cutting modes based on the stability margin of the ET, calculated from its transfer function, identified by the autocorrelation function of VA oscillations. Cutting mode is assigned to maximum stability margin of ET at preservation of preset values of macro- and microgeometric parameters of processing quality. The method has shown high efficiency in turning hard-to-process materials, taking into account the specifics of processing. *Results and conclusions.* During cutting of hard-to-process materials, values of processing parameters are changed, values of coefficients a_0, \dots, a_5 in transfer function are corrected and, accordingly, stability margin of ET is changed. The above is confirmed by the experimental results of research on the cutting process on a CNC lathe. Thus, the stability margin of the ET can serve as an assessment of the dynamic quality of the machine in various cutting modes when processing different groups of hard-to-process materials.

Keywords: turning, hard-to-process materials, cutting modes, vibroacoustic vibrations, dynamic lathe system, surface quality

For citation: Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A., Revyakin V.A. A model of lathe dynamic system when cutting hard-to-work materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(2):148–158. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-11

Введение

Обеспечение высокого качества и надежности изделий для авиационной техники, машино- и приборостроения, транспортных систем различного назначения, химического, энергетического и другого оборудования установ-

ливают соответствующие высокие требования к качеству входящих в них деталей [1]. Большое количество деталей, в том числе из труднообрабатываемых материалов, обрабатывается точением на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), что приводит к необходимости выбора режимов резания, обеспечивающих заданные значения параметров качества, причем режимы в значительной степени определяются взаимодействием конкретной пары «инструмент – заготовка» и динамическим качеством станка [2–4].

Процессы резания труднообрабатываемых материалов рассматривались в работах В. Н. Подураева [5], А. Д. Макарова [6], В. Ф. Безъязычного [7] и других ученых. Известно, что для формирования качества поверхностного слоя деталей, определяемого его физико-механическими характеристиками, и снижения износа инструмента при точении принято назначать режим обработки, при котором поддерживается оптимальная температура в зоне резания. Указанное было обосновано А. Д. Макаровым и получило подтверждение в исследованиях [7–9]. Режим резания, соответствующий приведенному выше условию, обеспечивает минимальные значения высоты микронеровностей обработанной поверхности, глубину и степень наклепа, однородность остаточных напряжений и микротвердости [7]. Это способствует повышению эксплуатационных свойств деталей.

В процессе резания на токарном станке в динамической системе (ДС) возникают виброакустические колебания, спектр которых достаточно широк, причем его наиболее значимые частотные составляющие лежат для станков средних типоразмеров в диапазоне до 4...5 кГц [10, 11]. Колебания, связанные с резанием, определяются взаимодействием резца и заготовки, которое зависит от силы резания, материалов резца и заготовки, процесса стружкообразования, трения в контакте «резец – заготовка» и другими факторами [9, 12, 13]. Суммарное влияние этих факторов приближает спектр колебаний силы резания, воздействующей на ДС, к спектру колебаний типа «белый шум» [14, 15]. Варьируя значениями параметров режима резания (частота вращения заготовки, подача резца, глубина резания) можно по характеристикам виброакустических (ВА) колебаний ДС определить такие их значения, при которых динамическое качество станка и точность обработки деталей более высокие.

В Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю. А. разработан метод оценки динамического качества станков на различных режимах резания по запасу устойчивости ДС, вычисляемого из ее передаточной функции, идентифицированной по автокорреляционной функции ВА колебаний [4]. Режим резания назначался по максимуму запаса устойчивости ДС при сохранении заданных значений макро- и микрогеометрических параметров качества обработки. Представляется целесообразным рассмотреть применение метода при точении труднообрабатываемых материалов, так как процесс резания в этом случае имеет свои особенности [5, 16].

Цель работы – обоснование применения запаса устойчивости, вычисляемого по стохастическим характеристикам ВА колебаний ДС, для выбора целесообразного режима резания при точении труднообрабатываемых материалов.

Материалы и методы

Динамическое качество станка при различных значениях параметров режима резания можно оценить посредством измерения ВА колебаний на

резцовом блоке и их последующей математической обработки для формирования информационной характеристики, которую следует рассматривать в качестве критерия назначения режима резания.

Ранее в работах [4, 13] было обосновано применение запаса устойчивости ДС на токарных и шлифовальных станках с ЧПУ различных моделей в качестве косвенной оценки для выбора режима обработки при стационарном резании. Исходя из изложенного с научной точки зрения важно получить аналитическое обоснование изменения запаса устойчивости ДС станка при изменении значений параметров режима резания при точении труднообрабатываемых материалов.

В качестве модели ДС токарного станка построим передаточную функцию, учитывающую структуру ДС и процесс резания труднообрабатываемых материалов. По аналогии с работой [17] структура ДС содержит два колебательных звена, описывающих шпиндельный узел (ШУ) и суппортную группу (рис. 1).

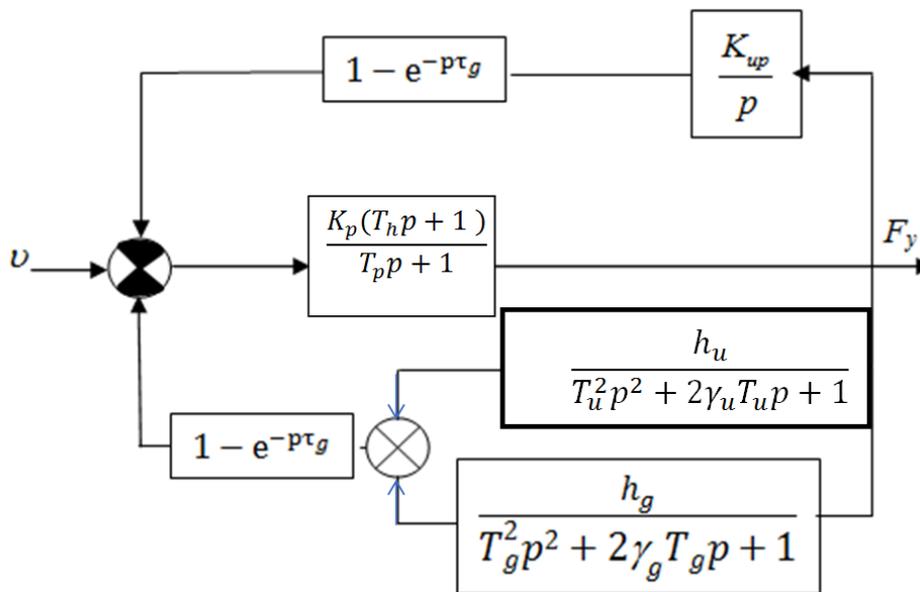


Рис. 1. Структурная схема динамической системы токарного станка (v – заданная глубина резания; F_y – сила резания; τ_g – время одного оборота детали; K_p – коэффициент резания; $h_u, h_g, T_u, T_g, \gamma_u, \gamma_g$ – коэффициенты, описывающие резцовый блок и шпиндельный узел детали; T_p – постоянная времени стружкообразования; T_h – постоянная времени демпфирования; K_{up} – коэффициент износа резца)

Отличием предлагаемой модели является то, что при точении труднообрабатываемых материалов значимым является демпфирование в зоне взаимодействия резца и заготовки, поэтому процесс резания моделируется передаточной функцией $W_p(p)$, предложенной В. А. Кудиновым [12]:

$$W_p(p) = \frac{K_p (T_h p + 1)}{T_p p + 1}, \quad (1)$$

где T_p – постоянная времени стружкообразования; T_h – постоянная времени демпфирования; K_p – коэффициент резания.

В процессе точения заданная глубина резания изменяется из-за износа резца и под воздействием колебаний в параллельно соединенных ШУ детали $W_g(p)$ и суппортной группе с инструментальным блоком $W_u(p)$ с соответствующими передаточными функциями:

$$\begin{cases} W_u(p) = \frac{h_u}{T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1}, \\ W_g(p) = \frac{h_g}{T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1}. \end{cases} \quad (2)$$

В модель включены также два звена, содержащие экспоненту и учитывающие запаздывание при съеме припуска на время оборота детали.

С учетом формул (1) и (2) передаточная функция ДС $W(p)$ записывается в виде

$$W(p) = \frac{K_p \left(\frac{T_h p + 1}{T_p p + 1} \right)}{1 + K_p \frac{T_h p + 1}{T_p p + 1} (1 - e^{-p\tau}) \left(\frac{h_u}{\{M_u\}} + \frac{h_g}{\{M_g\}} + \frac{K_{up}}{p} \right)}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \{M\} &= T_u^2 p^2 + 2\gamma_u T_u p + 1; \\ \{M\} &= T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1. \end{aligned}$$

Для упрощения вычислений экспоненту следует разложить в ряд при малом значении τ_g , тогда имеем $(1 - e^{-p\tau_g}) = p\tau_g$, а затем после алгебраических преобразований формулы (3) получаем

$$\begin{aligned} W(p) &= K_p (T_h p + 1) \{M_u\} \{M_g\} \times \left[(T_p p + 1) \{M_u\} \{M_g\} + \right. \\ &\left. + K_p \tau_g (T_h p + 1) \left[h_u \{M_g\} p + h_g \{M_u\} p + K_{up} \{M_u\} \{M_g\} \right] \right]^{-1}. \quad (4) \end{aligned}$$

Принимается условие, что постоянство коэффициентов передаточной функции рассматривается на время обработки одной детали, когда параметры режима резания постоянны и износ резца незначителен, т.е. ДС линеаризована. При вариации режима резания изменяются значения коэффициентов передаточной функции, что и определяет изменение запаса устойчивости ДС, характеризующего динамическое качество станка.

Таким образом, получена аналитическая модель ДС станка в форме передаточной функции, учитывающая резание труднообрабатываемых материалов через постоянную времени демпфирования T_h .

Установим тенденцию изменения запаса устойчивости ДС станка, используя для этого передаточную функцию (4). Из знаменателя передаточной функции получаем характеристическое уравнение, а затем воспользуемся критерием Гурвица [18]. Искомое уравнение имеет пятый порядок:

$$a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} a_5 &= T_p T_g^2 T_u^2, \quad a_4 = T_g^2 T_u^2 + 2T_p T_g^2 \gamma_u T_u + 2T_p T_u^2 \gamma_g T_g, \\ a_3 &= 2T_g^2 \gamma_u T_u + T_p T_g^2 + 2\gamma_y T_g T_u^2 + T_p T_u^2 + K_p \tau_g h_g T_u^2 + K_p \tau_g h_u T_g^2, \\ a_2 &= T_g^2 + 2T_p \gamma_g T_g + T_u^2 + 2T_p \gamma_u T_u + K_p \tau_g K_{up} T_g^2 + \\ &\quad + K_p \tau_g K_{up} T_u^2 + K_p T_h \tau_g h_u + K_p T_h \tau_g h_g, \\ a_1 &= 2\gamma_g T_g + 2\gamma_u T_u + T_p + K_p \tau_g h_g + K_p \tau_g h_u + K_p T_h \tau_g K_{up}, \quad a_0 = 1 + K_p \tau_g K_{up}. \end{aligned}$$

Коэффициенты a_0, \dots, a_5 получены из знаменателя передаточной функции (4) с учетом введенных в формуле (3) обозначений при условии пренебрежения слагаемыми большого порядка малости.

По критерию Гурвица для устойчивости системы пятого порядка необходимо и достаточно выполнения трех условий:

- 1) все коэффициенты a_0, \dots, a_5 положительны;
- 2) определитель второго порядка: $\Delta_2 = a_4 a_3 - a_5 a_2 > 0$;
- 3) определитель четвертого порядка:

$$\Delta_4 = (a_4 a_3 - a_5 a_2)(a_2 a_1 - a_3 a_0) - (a_4 a_1 - a_5 a_0)^2 > 0.$$

Первое условие соблюдается, а для проверки выполнения второго и третьего условий следует воспользоваться значениями параметров T_p , T_g , h_g , K_p , T_u , h_u , γ_g , γ_u , τ_g , T_h для токарных станков, приведенных в работах [3, 14, 19]. Полученные значения коэффициентов характеристического уравнения следующие: $a_0 = 1$, $a_1 = 5 \cdot 10^{-2}$, $a_2 = 6,8 \cdot 10^{-5}$, $a_3 = 0,2 \cdot 10^{-6}$, $a_4 = 2 \cdot 10^{-13}$, $a_5 = 4 \cdot 10^{-17}$. При указанных значениях коэффициентов второе и третье условия соблюдаются, т.е. ДС устойчива.

При стационарном резании в период нормального износа резца значения коэффициента резания K_p , постоянных времени стружкообразования T_p и демпфирования T_h практически не изменяются, а значение коэффициента износа K_{up} мало, что известно из классической кривой износа инструмента, тогда определители $\Delta_2 > 0$ и $\Delta_4 > 0$, следовательно ДС имеет определенный запас устойчивости.

Если в процессе резания труднообрабатываемых материалов изменяются значения его параметров (снимаемый припуск, частота вращения шпинделя или подача резца), то изменяются значения коэффициента K_p и постоянных T_p и T_h , откуда следует, что изменяются значения коэффициентов a_0, \dots, a_5 в передаточной функции, соответственно изменяется запас устойчивости ДС. Изложенное подтверждается результатами исследований процесса резания на токарном станке с ЧПУ модели ПАБ-350 при обработке колец подшипников из стали ШХ-15, приведенными в работах [13, 20]. Оценка запаса устойчивости выполнялась по показателю колебательности, вычисленному из идентифицированной передаточной функции. Кроме показателя колебательности, для аналогичной задачи на токарных и шлифовальных станках использовались коэффициент затухания автокорреляционной функции (АКФ) ВА колебаний [21], интегральные оценки АКФ и спектральной плотности мощности (СПМ) [13, 20]. Все указанные показатели являются косвенными эквивалентными оценками запаса устойчивости ДС.

Таким образом, запас устойчивости ДС может служить оценкой динамического качества станка на различных режимах резания, что согласуется с результатами исследований В. А. Кудинова [3].

Результаты

Эксперименты по точению труднообрабатываемых сплавов ВТ-5 и 12Х18Н10Т производились на токарном станке высокой точности с ЧПУ модели ТПК-125ВН2. Обрабатывались цилиндрические заготовки резцом с пластиной ВК-8, снимаемый припуск 0,2 мм, подача резца 0,2 мм/об, частоты вращения шпинделя составляли $n = 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800$ об/мин. Одновременно при точении осуществлялось измерение ВА колебаний резцового блока установленным на нем на магнитной опоре датчиком ДН-3 виброизмерителя ВШВ-003М3 в диапазоне 1...4000 Гц. Сигналы с виброизмерителя обрабатывались компьютером, что позволяло вычислить СПМ и АКФ ВА колебаний и коэффициент затухания АКФ, а также интегральные оценки СПМ и АКФ, по которым оценивается динамическое качество станка при различных частотах вращения шпинделя.

Результаты экспериментов на станке модели ТПК-125ВН2 представлены на рис. 2 и 3. Они свидетельствуют о том, что коэффициент затухания АКФ и интегральные оценки СПМ изменяются при варьировании частотой вращения шпинделя. Целесообразный режим резания сплава ВТ-5 при $n = 1400$ об/мин, а сплава 12Х18Н10Т – при $n = 1600$ об/мин, причем они соответствуют максимуму коэффициента затухания АКФ (максимум запаса устойчивости ДС) и минимуму интегральной оценки СПМ.

Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований при точении деталей из труднообрабатываемых материалов выявили возможность назначения режимов резания с использованием предложенных характеристик виброакустических колебаний как показателя динамического качества станков. В процессе резания труднообрабатываемых материалов изменяются значения параметров обработки, корректируются значения коэффициентов a_0, \dots, a_5 в передаточной функции, соответственно изменяется запас устойчивости ДС.

чивости ДС. Изложенное подтверждается экспериментальными результатами исследований процесса резания на токарном станке с ЧПУ. Таким образом, запас устойчивости ДС может служить оценкой динамического качества станка на различных режимах резания.

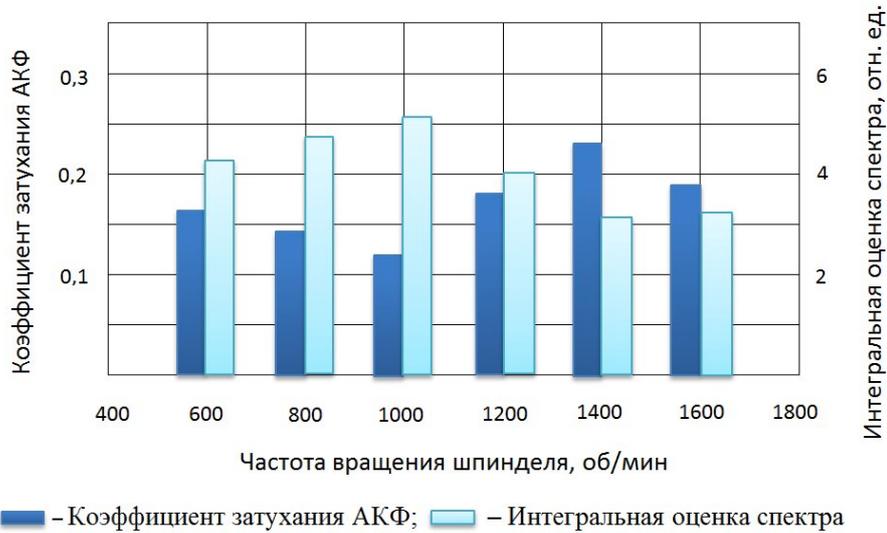


Рис. 2. Результаты экспериментов на станке модели ТПК-125ВН2: материал: ВТ-5; резец: ВК8; скорость резания: 70–100 м/мин ($t = 0,2$ мм; $s = 0,2$ мм/об)

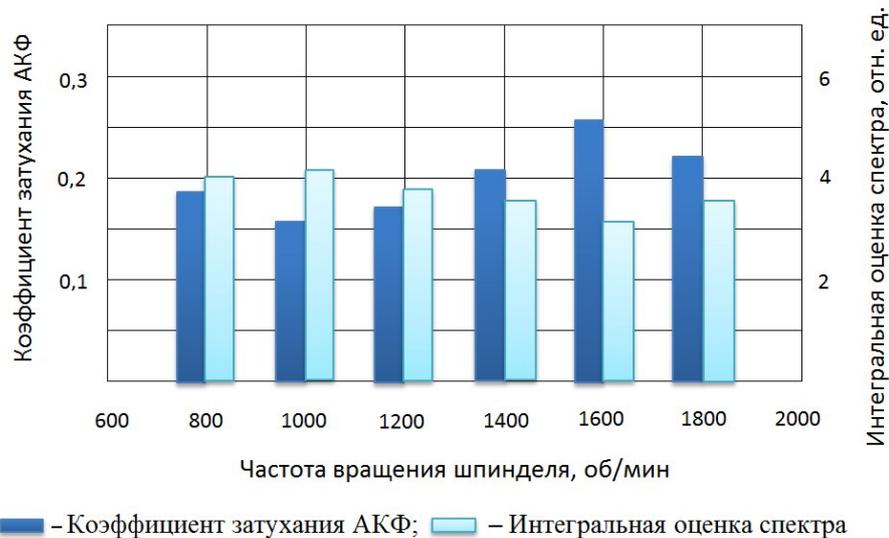


Рис. 3. Результаты экспериментов на станке модели ТПК-125ВН2: материал: 12Х18Н10Т; резец: ВК8; скорость резания: 120–150 м/мин ($t = 0,2$ мм; $s = 0,2$ мм/об)

Список литературы

1. Проников А. С. Параметрическая надежность машин. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 560 с.

2. Гуревич Я. Л., Горохов М. В., Захаров В. И. [и др.]. Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справочник. М. : Машиностроение, 1986. 240 с.
3. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 360 с.
4. Игнатъев А. А., Добряков В. А., Игнатъев С. А. Прикладной системный анализ объектов машиностроения. Саратов : СГТУ, 2021. 160 с.
5. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М. : Высшая школа, 1974. 587 с.
6. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
7. Безъязычный В. Ф. Обоснование целесообразности обработки при оптимальной температуре резания, установленной А. Д. Макаровым // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12, № 4. С. 10–13.
8. Зориктуев В. Ц. Автоматизация процессов резания на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12, № 4. С. 14–19.
9. Насад Т. Г., Шеров К. Т., Насад И. П. Теплофизические аспекты гибридных технологий // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 1 (84). С. 47–52.
10. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. М. : Машиностроение, 1988. 184 с.
11. Аршанский М. М., Щербаков В. П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
12. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 360 с.
13. 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.
14. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев : Техника, 1975. 136 с.
15. 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.
16. Маслов А. Р., Схиртладзе А. Г. Обработка труднообрабатываемых материалов резанием. М. : Инновационное машиностроение, 2018. 208 с.
17. Игнатъев А. А., Казинский Н. А., Игнатъев С. А. Моделирование динамической системы токарного станка с ЧПУ и оценка ее запаса устойчивости при изменении режима резания // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 1 (21) С. 134–141.
18. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1975. 768 с.
19. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков. М. : Машиностроение, 1978. 200 с.
20. Ignatiev A. A., Dobryakov V. A., Ignatiev S. A., Kazinsky A. A., Nasad T. G., Nasad I. P. Automated measurements in process monitoring system in bearing production // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk. 2020. Vol. 1515. P. 052057.
21. Игнатъев А. А., Насад И. П., Насад Т. Г. 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. doi: 10.24143/2072-9502-2023-2-17-22

References

1. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin = Parametric reliability of machines*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002:560. (In Russ.)

2. Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I. et al. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvaemykh materialov: spravochnik = Cutting modes for hard-to-work materials: reference book*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:240. (In Russ.)
3. Kudinov V.A. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1967:360. (In Russ.)
4. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. *Prikladnoy sistemnyy analiz ob"ektov mashinostroeniya = Applied systems analysis of mechanical engineering objects*. Saratov: SGTU, 2021:160. (In Russ.)
5. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov = Cutting difficult to machine materials*. Moscow: Vysshaya shkola, 1974:587. (In Russ.)
6. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya = Optimization of cutting processes*. Moscow: Mashinostroenie, 1976:278. (In Russ.)
7. Bez'yazychnyy V.F. Justification of the feasibility of processing at the optimum cutting temperature established by A.D. Makarov. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2009;12(4):10–13. (In Russ.)
8. Zoriktuev V.Ts. Automation of cutting processes based on the provision on the optimal cutting temperature. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2009;12(4):14–19. (In Russ.)
9. Nasad T.G., Sherov K.T., Nasad I.P. Thermophysical aspects of hybrid technologies. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2020;(1):47–52. (In Russ.)
10. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom = Vibrations during blade tool processing*. Moscow: Mashino-stroenie, 1988:184. (In Russ.)
11. Arshanskiy M.M., Shcherbakov V.P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu obrabotki na metallorezhushchikh stankakh = Vibration diagnostics and control of machining accuracy on metal-cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:136. (In Russ.)
12. Kudinov V.A. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1967:360. (In Russ.)
13. 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 oscillations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2022;(2):38–52. (In Russ.)
14. Popov V.I., Loktev V.I. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Kiev: Tekhnika, 1975:136. (In Russ.)
15. 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.
16. Maslov A.R., Skhirtladze A.G. *Obrabotka trudnoobrabatyvaemykh materialov rezaniem = Processing of difficult-to-machine materials by cutting*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018:208. (In Russ.)
17. Ignat'ev A.A., Kazinskiy N.A., Ignat'ev S.A. Modeling of the dynamic system of a CNC lathe and assessment of its stability margin when changing the cutting mode. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2017;(1):134–141. (In Russ.)
18. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya = Theory of automatic control systems*. Moscow: Nauka, 1975:768. (In Russ.)
19. Kedrov S.S. *Kolebaniya metallorezhushchikh stankov = Vibrations of metal cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1978:200. (In Russ.)
20. Ignatiev A.A., Dobryakov B.A., Ignatiev C.A., Kazinsky A.A., Nasad T.G., Nasad I.P. Automated measurements in process monitoring system in bearing production. *Journal of Physics: Conference Series*. Krasnoyarsk, 2020;1515:052057.

21. Ignat'ev A.A., Nasad I.P., Nasad T.G. Modeling of a 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 the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and information technology*. 2023;(2):17–22. (In Russ.). doi: 10.24143/2072-9502-2023-2-17-22

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

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)

Татьяна Геннадиевна Насад
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, Саратовский
государственный университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

E-mail: tgnas@mail.ru

Tat'yana G. Nasad
Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of engineering
technology, Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov (77 Politehnicheskaya
street, Saratov, Russia)

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: tmm@sstu.ru

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: atp@sstu.ru

Vladislav A. Revyakin
Senior lecturer at 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 14.06.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 11.02.2024

Принята к публикации / Accepted 10.05.2024