

УДК 621.9

doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-10

Назначение режима точения на основе оценки динамического качества станков

А. А. Игнатьев¹, Т. Г. Насад², В. А. Добряков³, И. П. Насад⁴, А. А. Казинский⁵

^{1,2,3,4,5}Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

¹atp@sstu.ru, ²tnas@mail.ru, ³dobryakovva@mail.ru, ⁵aak@sstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обработка на станках токарной группы с использованием средств автоматизации представляет собой сложный процесс, зависящий от свойств динамической системы (ДС) станка, поэтому определение режимов резания по минимальному значению коэффициента затухания автокорреляционной функции виброакустических колебаний является актуальной задачей машиностроения. *Материалы и методы.* Колебания, возникающие при обработке ответственных деталей, определяют динамическое качество станков, качество поверхностного слоя и стойкость режущего инструмента, поэтому необходимо выявить способы управления. Повышение производительности процесса обеспечивается форсированными режимами резания, которые могут привести к ухудшению качества обработки и преждевременному износу режущего инструмента. Теоретическое определение рациональных режимов резания вызывает определенные трудности, поэтому экспериментальный поиск решения поставленной задачи наиболее актуален. В работе для выбора рациональных режимов резания на станках токарной и шлифовальной групп в качестве наиболее информативной характеристики предлагается использовать запас устойчивости ДС станка, который следует определять из передаточной функции ДС с применением автокорреляционной функции (АКФ) колебаний. Условием идентификации ДС станка является предварительная идентификация АКФ, что можно реализовать, используя записи колебаний при резании. Предварительно осуществляется фильтрация колебаний, чтобы исключить низкочастотный диапазон, содержащий частоты, вызванные колебаниями элементов станочной системы, и оставить частоты, связанные с процессом резания. Режимы резания назначаются по наибольшему значению запаса устойчивости, что обеспечивает высокое качество поверхности. *Результаты и выводы.* Имеется однозначная аналитическая связь показателя колебательности и коэффициента затухания АКФ, что позволяет вычислить именно коэффициент α , по значению которого можно оценить запас устойчивости ДС на различных режимах резания и выбрать наиболее целесообразный. Исследование вибраций станков для обработки высокоточных деталей дает возможность соответствующим образом управлять технологическим режимом, используя уровень вибраций как один из показателей его качества.

Ключевые слова: точение, автокорреляционная функция, интегральные оценки, режимы резания, коэффициент затухания, виброакустические колебания, запас устойчивости

Для цитирования: Игнатьев А. А., Насад Т. Г., Добряков В. А., Насад И. П., Казинский А. А. Назначение режима точения на основе оценки динамического качества станков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 130–141. doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-10

Assigning the turning mode based on assessment of the dynamic quality of machine tools

A.A. Ignat'ev¹, T.G. Nasad², V.A. Dobryakov³, I.P. Nasad⁴, A.A. Kazinskiy⁵

^{1,2,3,4,5}Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

¹atp@sstu.ru, ²tnas@mail.ru, ³dobryakovva@mail.ru, ⁵aak@sstu.ru

Abstract. *Background.* Machining on lathe machines using automation means is a complex process that depends on the properties of the dynamic system (DS) of the machine, therefore, determining cutting modes based on the minimum value of the attenuation coefficient of the autocorrelation function of vibration acoustic oscillations is an urgent task of machine building. *Materials and methods.* The vibrations that occur during the processing of critical parts determine the dynamic quality of the machines, the quality of the surface layer and the resistance of the cutting tool, therefore, it is necessary to identify control methods. Increased efficiency of the process is provided by forced cutting modes, which can lead to deterioration of processing quality and premature wear of the cutting tool. The theoretical definition of rational cutting modes causes certain difficulties, so the experimental search for a solution to the problem is most relevant. In order to select rational cutting modes on turning and grinding groups machines, it is proposed to use the stability reserve of the DS of the machine as the most informative characteristic, which should be determined from the transfer function of the DS using the autocorrelation function (ACF) of vibrations. A condition for the identification of the DS machine is the preliminary identification of the ACF, which can be implemented using vibration records during cutting. Pre-filtering of oscillations is carried out to exclude low-frequency range containing frequencies caused by oscillations of machine system elements and to leave frequencies associated with cutting process. Cut modes are assigned to the highest stability margin, which ensures high surface quality. *Results and conclusions.* There is an unambiguous analytical relationship between the oscillation index and the damping coefficient of the ACF, which makes it possible to calculate the α coefficient, by the value of which it is possible to estimate the stability margin of the ET in various cutting modes and select the most appropriate one. The study of vibrations of machines for processing high-precision parts makes it possible to appropriately control the technological mode, using the level of vibrations as one of the indicators of its quality

Keywords: turning, autocorrelation function, integral estimates, cutting modes, attenuation factor, vibroacoustic oscillations, stability margin

For citation: Ignat'ev A.A., Nasad T.G., Dobryakov V.A., Nasad I.P., Kazinskiy A.A. Assigning the turning mode based on assessment of the dynamic quality of machine tools. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2023;(2):130–141. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-10

Введение

Процесс обработки деталей на автоматизированных металлорежущих станках сопровождается виброакустическими (ВА) колебаниями динамической системы (ДС), спектр которых достаточно сложен, причем он изменяется под влиянием различных факторов, в частности, при вариации значений параметров режима резания и износе инструмента, изменении состава смазочно-охлаждающей жидкости, технического состояния станка и др. [1–5]. Амплитудно-частотные характеристики колебаний ДС определяют динамическое качество станков, от которого существенно зависит качество обработанной поверхности [6–8]. Если ранее стремились к минимизации ВА коле-

баний в станках особо высокой точности, так как показатели точности обработки зависели от их уровня, то в настоящее время из-за повышения требований к точности деталей для изделий авиа- и машиностроения снижение колебаний стало необходимым для станков высокой и повышенной точности. Кроме того, снижение вибраций в паре «резец-деталь» существенно снижает износ инструмента [9, 10]. Теоретические расчеты режима резания, обеспечивающие заданную точность обработки, достаточно сложны ввиду влияния многих факторов [3, 6, 11], поэтому на практике более распространенным является его экспериментальное определение путем варьирования значениями параметров режима резания при условии наличия заданного критерия качества обработки. Указанное обуславливает необходимость обоснования такого критерия, который устанавливается на основе специальной обработки зарегистрированных ВА колебаний ДС при резании.

Материалы и методы

Значения макро- и микрогеометрических параметров точности обработанных поверхностей деталей определяются многими факторами, среди которых существенную роль играет именно динамическое качество технологической системы. Для снижения влияния колебаний на качество обработанной поверхности, как при токарной, так и при шлифовальной обработке, необходимо определить такие значения параметров режима резания, при которых достигаются минимальные значения параметров точности (овальность, волнистость, шероховатость) [8, 12, 13].

Результаты исследований, выполненных в Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А., показали, что с практической точки зрения для оценки динамического качества станков можно использовать интегральные оценки автокорреляционных функций (АКФ) ВА колебаний при резании [14, 15]. Применение интегральных оценок АКФ для выбора режима резания рассмотрено для прецизионного токарного модуля ТПАРМ-100М. Вибродатчик ДН-3 виброизмерителя ВШВ-003М3 устанавливался на магнитной опоре на резцовый блок. Колебания фиксировались в диапазоне до 4 кГц, а далее вибросигналы подавались для обработки на компьютер. Измерения выполнялись при различных частотах вращения шпинделя при точении высокоточных деталей приборов из алюминиевых сплавов. В качестве критерия для назначения частоты вращения шпинделя принят минимум квадратичной интегральной оценки I АКФ ВА колебаний $K(\tau)$ резцового блока модуля

$$I = \int_0^{\tau_k} K^2(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где τ_k – интервал корреляции.

Такая оценка была рассмотрена в работе [4] для анализа динамических свойств линейных систем управления, а данном случае применена для станков.

При исследованиях установлено, что минимум интегральной оценки (1) соответствует минимальной шероховатости поверхности Ra обрабатываемой детали, причем это выявлено для двух частот вращения шпинделя: 1000 и 1600 об/мин (рис. 1). Рекомендуемой частотой является 1600 об/мин, при ко-

торой обеспечивается шероховатость Ra , не превышающая 0,1 мкм при алмазном точении и более высокая производительность обработки.

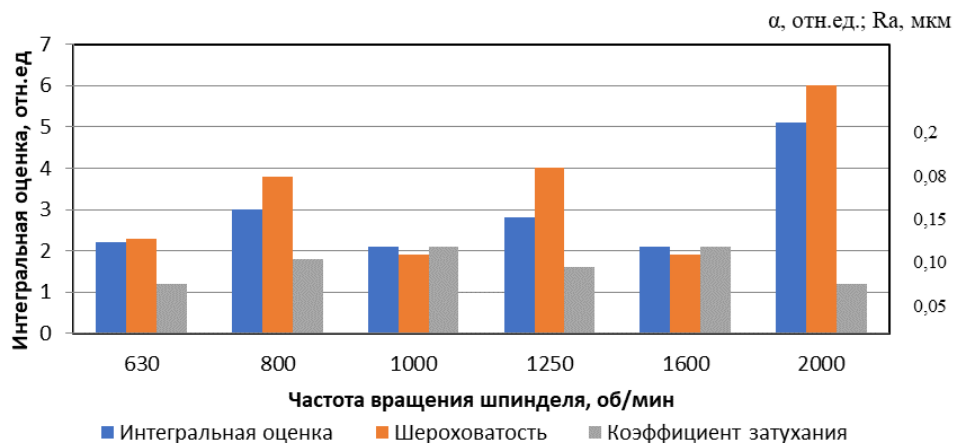


Рис. 1. Интегральные оценки автокорреляционной функции колебаний динамической системы при точении на модуле ТПАМ-100М, шероховатость обработанной поверхности и коэффициент затухания АКФ

Полученные экспериментально АКФ аппроксимировались затухающей косинусоидой

$$K(\tau) = K_0 e^{-\alpha\tau} \cos \omega\tau, \quad (2)$$

где α – коэффициент затухания; ω – частота колебаний.

Результаты

Научный и практический интерес представляет выявление связи интегральной оценки (1) с коэффициентом затухания АКФ α . Покажем, что функция $I(\alpha)$ является убывающей при увеличении значения параметра α . Примем без потери общности $K_0 = 1$. После подстановки выражения (2) в формулу (1) имеем

$$I = \int_0^{\tau_k} e^{-2\alpha\tau} \cos^2 \omega\tau d\tau. \quad (3)$$

Далее необходимо вычислить производную от интеграла I по α и показать, что $dI/d\alpha < 0$. С учетом того, что АКФ (2) является затухающей и вне интервала $[0, \tau_k]$ практически равна нулю, верхний предел можно увеличить, и вместо интеграла (3) можно вычислить интеграл

$$I_\infty = \int_0^\infty e^{-2\alpha\tau} \cos^2 \omega\tau d\tau. \quad (4)$$

В результате получаем выражение

$$I_\infty = \frac{2\alpha^2 + \omega^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega^2)}. \quad (5)$$

Далее вычисляем производную

$$\frac{dI_{\infty}}{d\alpha} = -\frac{2\alpha^4 + \alpha^2\omega^2 + \omega^4}{4\alpha^2(\alpha^2 + \omega^2)}. \quad (6)$$

Выражение (6) всегда меньше нуля, т.е. функции (1) и (3) являются монотонно убывающими по параметру α . Таким образом, практически было установлено, что наибольшему значению α соответствовало наименьшее значение интегральной оценки I (рис. 1) и наименьшее значение шероховатости ($Ra \leq 0,1$ мкм) при точении алюминиевых сплавов.

Для выбора режима резания в качестве основной информативной характеристики возможно также использование запаса устойчивости ДС станка [8, 16]. По наибольшему значению запаса устойчивости выбирается режим резания, которому соответствует минимум вибраций в паре «инструмент – деталь», что обеспечивает наиболее высокое качество обработки. Запас устойчивости определяется из передаточной функции ДС, полученной из АКФ колебаний при различных значениях параметров режима резания. Для этого используется соотношение, полученное в работе [17], которое связывает передаточную функцию ДС $W(p)$ с АКФ $K(\tau)$ выходного сигнала при входном сигнале типа «белый шум»

$$W(p)W(-p) = K(p) + K(-p), \quad (7)$$

где $K(p)$ – изображение по Лапласу $K(\tau)$.

В известных работах [7, 12] показано, что сила резания, возбуждающая колебания в ДС, имеет стохастическую компоненту типа «белый шум». Кроме того, за время обработки одной детали (не более 3...5 мин) характеристики ДС практически не изменяются, т.е. ее можно рассматривать как линейную. Указанное обосновывает справедливость применения формулы (7) для ДС станка. При последовательной обработке деталей характеристики ДС изменяются и, следовательно, изменяются передаточная функция ДС и запас устойчивости.

Применив к выражению (2) преобразование Лапласа и подставив его в формулу (7), получаем выражение для передаточной функции ДС в виде

$$W(p) = \frac{K}{T_0^2 p^2 + 2\alpha T_0 p + 1}, \quad (8)$$

где p – оператор Лапласа; $T_0 = 1/\omega_0$ – постоянная времени; $K = K_0/\omega_0^2$; для систем второго порядка $0 \leq \alpha < 1$.

Далее из передаточной функции вычисляется амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ (АЧХ), типичный вид которой, соответствующий колебательному звену для ДС токарного станка с числовым программным управлением модели ПАБ-350, представлен на рис. 2.

Аналитическое выражение для АЧХ имеет вид

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + (2\alpha T_0 \omega)^2}}. \quad (9)$$

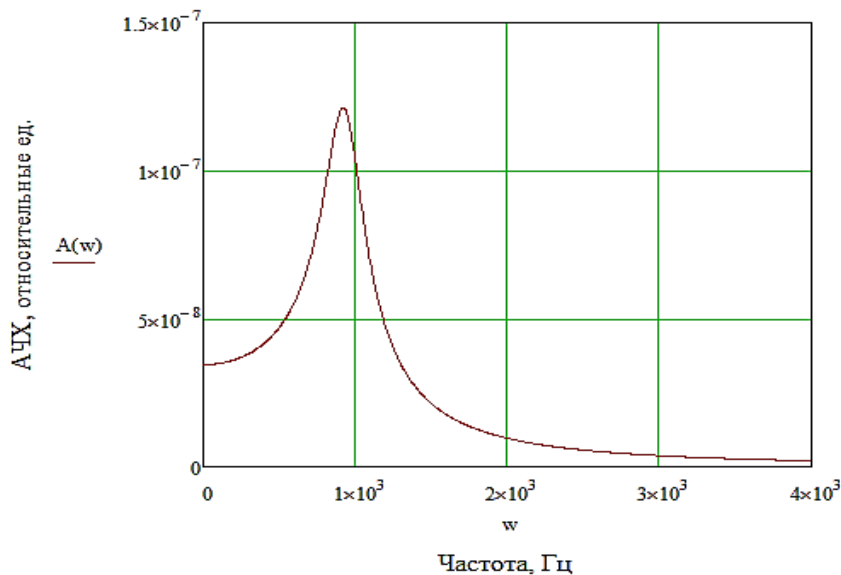


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика динамической системы станка

Оценка запаса устойчивости ДС проводится косвенным методом по показателю колебательности M , вычисляемому по формуле [18]:

$$M = \frac{A(\omega)_{\max}}{A(0)}, \quad (10)$$

где $A(\omega)_{\max}$ – максимальное значение АЧХ; $A(0)$ – значение АЧХ при $\omega = 0$.

Значения $M = 1,1 \dots 1,5$ соответствуют наибольшему запасу устойчивости ДС. Увеличение показателя колебательности снижает запас устойчивости ДС.

Анализ результатов измерений ВА колебаний токарных и шлифовальных станков, выполненных в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» по выбору режима резания по запасу устойчивости ДС [8, 15, 16], показал целесообразность сокращения расчетов на основе определения зависимости между коэффициентом затухания α и показателем колебательности M .

Во-первых, используя формулу (9), можно установить, что статический коэффициент передачи системы $A(0) = K$. Во-вторых, для определения $A(\omega)_{\max}$ необходимо вычислить производную от $A(\omega)$ из той же формулы и найти значение частоты, соответствующей максимальному значению АЧХ, приравняв производную к нулю:

$$\frac{dA(\omega)}{d\omega} = \frac{d \left(K \left[\left(1 - T_0^2 \omega^2 \right)^2 + \left(2\alpha T_0 \omega \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right)}{d\omega} = 0. \quad (11)$$

Уравнение для производной имеет следующий вид:

$$\frac{dA(\omega)}{d\omega} = \frac{K(-2T_0^4\omega^3 + 2T_0^2\omega - 4\alpha^2T_0^2\omega)}{(1 - T_0^2\omega^2)^2 + (2\alpha T_0\omega)^2} = 0. \quad (12)$$

Затем приравниваем к нулю числитель выражения (12) и получаем уравнение для определения частоты $\omega_{\max}$, при которой имеет максимальное значение АЧХ $A(\omega)_{\max}$:

$$T_0^2\omega^2 - 1 + 2\alpha^2 = 0. \quad (13)$$

Далее получаем выражение для частоты $\omega_{\max}$:

$$\omega_{\max} = \omega_0\sqrt{1 - 2\alpha}. \quad (14)$$

Используя выражения (10) и (14), получаем формулу для вычисления показателя колебательности, в которой фигурирует только коэффициент затухания:

$$M = \frac{1}{2\alpha\sqrt{1 - \alpha^2}}. \quad (15)$$

Далее находим коэффициент затухания АКФ как функцию от показателя колебательности:

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt{1 - M^{-2}}}{2}. \quad (16)$$

Таким образом, установлено, что коэффициент затухания АКФ является монотонно убывающей функцией от показателя колебательности ДС, причем при $M \rightarrow 1$ $\alpha \rightarrow 0,707$, при $M \rightarrow \infty$ $\alpha \rightarrow 0$ (при α больше 0,707 колебательность в ДС отсутствует). Отсюда следует, что чем больше значение коэффициента затухания АКФ в указанных пределах, тем выше запас устойчивости ДС.

Из приведенных примеров оценки запаса устойчивости для токарной обработки на станках различных моделей следует, что в соответствии с установленной связью интегральных оценок АКФ с коэффициентом затухания и показателя колебательности с коэффициентом затухания АКФ, на практике быстрее можно вычислить именно коэффициент α . Наибольшему значению коэффициента затухания соответствует наибольшее значение запаса устойчивости ДС, что позволяет выбрать режим резания, целесообразный с точки зрения качества и производительности обработки.

Изложенное иллюстрируется результатами измерений на двухшпиндельном токарном станке модели ПАБ-350, на котором обрабатываются наружные кольца подшипника 42726 из материала ШХ-15 (рис. 3). Окончательное точение поверхности качения колец осуществлялось при подаче резца $n = 0,4$ мм/об (материал резца PSKNR16CA-12, пластина SNMG120412) на частотах вращения заготовки 200, 400, 500, 600 об/мин. Параллельно измерялись ВА колебания резцового блока в диапазоне до 4 кГц датчиком ДН-3,

установленным на магнитной опоре, сигналы с которого подавались на виброизмеритель ВШВ-003М3, сигналы с выхода которого обрабатывались компьютером по специальной программе, обеспечивающей вычисление АКФ, ее коэффициента затухания, передаточной функции, АЧХ динамической системы и показателя колебательности. Волнистость поверхностей качения колец после обработки измерялась кругломером Talyrond-73.

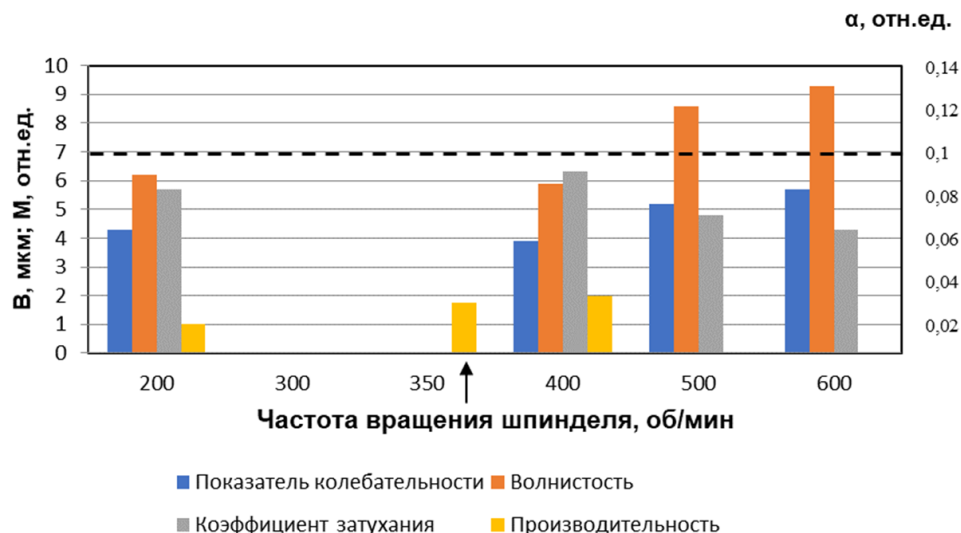


Рис. 3. Сопоставление результатов измерений показателей динамического качества станка ПАБ-350 и точности обработки при вариации частоты вращения шпинделя при точении колец подшипников (штриховой линией показано допустимое значение волнистости дорожки качения 7 мкм; стрелкой показано значение частоты вращения шпинделя 350 об/мин, на которой выполнялось точение на предприятии)

На предприятии в соответствии с установленным технологическим режимом обработка колец на станке ПАБ-350 осуществлялась при частоте вращения шпинделя 350 об/мин. При проведении экспериментов частота вращения варьировалась от 200 до 600 об/мин. На частотах вращения 200 и 400 об/мин измерено по 4 последовательно обработанных кольца и вычислены средние значения волнистости. Производительность на частоте вращения 200 об/мин условно принята за 1. На частотах вращения 500 и 600 об/мин уровень вибраций существенно повысился, снизился запас устойчивости ДС (повысился показатель колебательности и снизился коэффициент затухания), а волнистость дорожки качения превысила допустимый уровень, поэтому было обработано только по одному кольцу и производительность не оценивалась. Результаты измерений показали, что на частоте 400 об/мин обеспечивается волнистость поверхности, не превышающая заданную, а производительность выше на 20 % по сравнению с существующим режимом резания, т.е. более целесообразной является обработка колец с указанной частотой вращения шпинделя.

Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований при точении высокоточных деталей подтвердили возможность назначения значений пара-

метров режима резания используя предложенные характеристики виброакустических колебаний как показатели динамического качества станков. Обоснована целесообразность сокращения расчетов по оценке запаса устойчивости динамической системы на основе математической зависимости между коэффициентом затухания АКФ α и показателем колебательности M . Это позволило получить искомую оценку запаса устойчивости непосредственно по коэффициенту α и дать рекомендации по назначению режима резания, при котором коэффициент затухания и, соответственно, запас устойчивости ДС максимален, а значения параметров качества колец подшипников соответствуют техническим требованиям.

Список литературы

1. Бармин Б. П. Вибрации и режимы резания. М. : Машиностроение, 1972. 72 с.
2. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. М. : Машиностроение, 1988. 184 с.
3. Аршанский М. М., Щербаков В. П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. М. : Машиностроение, 1988. 136 с.
4. Добрынин С. А., Фельдман М. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М. : Машиностроение, 1987. 224 с.
5. Козочкин М. П., Жедь О. В., Маунг Т. Х. Исследование связей параметров вибраций, сопровождающих различные технологические процессы с изменением температурного режима // Контроль. Диагностика. 2019. № 10. С. 56–63.
6. Кудинов В. А. Динамика станков. М. : Машиностроение, 1967. 360 с.
7. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев : Техника, 1975. 136 с.
8. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А. Экспериментально-аналитическая оценка динамического качества станков по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 2 (93). С. 38–52.
9. Мартинов Г. М., Григорьев А. С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИИ. 2012. № 2. С. 23–28.
10. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С., Попиков А. Н. Исследование процесса твердого течения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12, № 4 (33). С. 24–29.
11. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М. : Машиностроение, 1976. 278 с.
12. Lin Z. H. 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.
13. Shamsadova Y. S., Mintshev M. S., Ignatiev A. A. [et al.]. Assessment of the Machine Dynamic Quality on the Basis of the Integrated Assessment of the Spectrum of Vibroacoustic Vibrations // Proceedings of the International Symposium Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental research. 2018. Vol. 177. P. 467–470.
14. 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.
15. Игнатьев А. А., Добряков В. А., Игнатьев С. А. [и др.]. Modelling and practical application of autocorrelation function of vibroacoustic oscillations in machine dynamic system // Материаловедение и техника : сб. тр. Междунар. конф. Красноярск : Сибир. федер. ун-т, 2020.

16. Игнат'ев А. А., Виноградов М. В., Добряков В. А. [и др.]. Выбор режима резания на автоматизированном токарном станке на основе оценки запаса устойчивости динамической системы // СТИН. 2018. № 6. С. 25–29.
17. Складчиков В. А. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М. : Наука, 1965. 475 с.
18. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1975. 768 с.

References

1. Barmin B.P. *Vibratsii i rezhimy rezaniya = Vibrations and cutting conditions*. Moscow: Mashinostroenie, 1972:72. (In Russ.)
2. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviynym instrumentom = Vibrations when processing with blade tools*. Moscow: Mashino-stroenie, 1988:184. (In Russ.)
3. Arshanskiy M.M., Shcherbakov V.P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu obrabotki na metallovezhushchikh stankakh = Vibration diagnostics and control of machining accuracy on metal-cutting machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:136. (In Russ.)
4. 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.)
5. Kozochkin M.P., Zhed' O.V., Maung T.Kh. The study of connections between vibration parameters accompanying various technological processes with changes in temperature conditions. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2019;(10):56–63. (In Russ.)
6. Kudinov V.A. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Moscow: Mashinostroenie, 1967:360. (In Russ.)
7. Popov V.I., Loktev V.I. *Dinamika stankov = Machine dynamics*. Kiev: Tekhnika, 1975:136. (In Russ.)
8. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. Experimental and analytical assessment of the dynamic quality of machine tools based on the stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Saratov State Technical University*. 2022;(2):38–52. (In Russ.)
9. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. Diagnosis of cutting tools and prediction of residual life on CNC machines during processing. *STIN = Russian Engineering Research*. 2012;(2):23–28. (In Russ.)
10. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Popikov A.N. The study of hard turning process. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2009;12(4):24–29. (In Russ.)
11. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya = Optimization of cutting processes*. Moscow: Mashinostroenie, 1976:278. (In Russ.)
12. Lin Z.H. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1988;28(2):93–101.
13. Shamsadova Y.S., Mintsaeve M.S., Ignatiev A.A. et al. Assessment of the Machine Dynamic Quality on the Basis of the Integrated Assessment of the Spectrum of Vibroacoustic Vibrations. *Proceedings of the International Symposium Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental research*. 2018;177:467–470.
14. 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. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(2):90–98. (In Russ.)
15. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A. et al. Modelling and practical application of autocorrelation function of vibroacoustic oscillations in machine dynamic system. *Ma-*

- terialovedenie i tekhnika: sb. tr. Mezhdunar. konf. = Materials Science and Engineering: proceedings of the International conference. Krasnoyarsk: Sibir. feder. un-t, 2020.*
16. Ignat'ev A.A., Vinogradov M.V., Dobryakov V.A. et al. Selection of cutting mode on an automated lathe based on an assessment of the stability margin of the dynamic system. *STIN = Russian Engineering Research*. 2018;(6):25–29. (In Russ.)
17. Sklyarevich V.A. *Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem = Operator methods in statistical dynamics of automatic systems*. Moscow: Nauka, 1965:475. (In Russ.)
18. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya = Theory of automatic control systems*. Moscow: Nauka, 1975:768. (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

Aleksandr A. Ignatiev

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)

Татьяна Геннадиевна Насад

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

E-mail: tgnas@mail.ru

Tatyana G. Nasad

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of mechanical
engineering technologies, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov
(77 Politekhnikeskaya street,
Saratov, Russia)

Владимир Анатольевич Добряков

кандидат технических наук, доцент,
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

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 Politekhnikeskaya street,
Saratov, Russia)

Ирина Павловна Насад

аспирант, Саратовский государственный
технический университет имени
Гагарина Ю. А. (Россия, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77)

Irina P. Nasad

Postgraduate student, Yuri Gagarin
State Technical University of Saratov
(77 Politekhnikeskaya street,
Saratov, Russia)

Алексей Алексеевич Казинский

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

E-mail: aak@sstu.ru

Aleksey A. Kazinskiy

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

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

Поступила в редакцию / Received 15.03.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.04.2023

Принята к публикации / Accepted 05.06.2023