

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА СТАНКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Повышение требований к качеству металлообработки деталей точного машино- и приборостроения на современных автоматизированных станках с применением новых инструментальных материалов определяет внимание к динамическому качеству станков. Актуальным является установление значений параметров режима резания с минимальным уровнем виброакустических колебаний, в частности, при прецизионной токарной обработке с использованием алмазного точения. Целью данной работы является формирование оценок динамического качества прецизионных токарных модулей на основе вычисления автокорреляционных функций и определения зон значений параметров режима точения с наиболее высокой точностью обработки при минимальном уровне виброакустических колебаний.

Материалы и методы. Теоретически и экспериментально установлено соответствие интегральных оценок и запасов устойчивости динамической системы токарного модуля, полученных на основе автокорреляционных функций виброакустических колебаний, с шероховатостью обработанной поверхности.

Результаты. Установлено монотонное уменьшение интегральных оценок автокорреляционных функций и аналогичное снижение запаса устойчивости динамической системы по мере увеличения значения параметра затухания автокорреляционной функции. Результаты экспериментальных исследований связи шероховатости поверхности деталей, обработанных на прецизионном токарном модуле типа ТПАРМ, показали, что для выбора режима точения с минимальной шероховатостью применимы обе указанные оценки.

Выводы. По максимуму запаса устойчивости динамической системы токарного модуля установлена частота вращения заготовки, при которой достигается минимум шероховатости поверхности при наибольшей производительности алмазного точения, согласуется с ранее полученными результатами по назначению режима точения по интегральным оценкам автокорреляционных функций виброакустических колебаний.

Ключевые слова: токарный станок, динамическое качество, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, интегральная оценка, передаточная функция, запас устойчивости, шероховатость поверхности.

А. А. Ignat'ev, E. M. Samoylova, Ya. Sh. Shamsadova

EVALUATION OF DYNAMIC QUALITY OF MACHINE TOOLS USING AUTOCORRELATION FUNCTIONS OF VIBROACOUSTIC OSCILLATIONS

Abstract.

Background. Raised metal-processing quality standards for parts of precision mechanical engineering and instrumentation on modern automated machines using new tool materials determine the quality of attention to dynamic machines. Quite topical

is setting cutting mode parameters with minimal vibroacoustic oscillations, in particular, when precision diamond turning. The aim of this work is to develop estimates of dynamic qualities of precision turning modules on the basis of calculating the autocorrelation function (ACF) and the definition of zones of turning parameters mode values with the highest precision machining with minimal VA fluctuations.

Materials and methods. The authors have theoretically and experimentally established the correspondence of integral estimates and the stability margin of a turning module's dynamic system, obtained on the basis of the autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations, with machined surface roughness.

Results. The researchers have established a monotonous decrease of integral estimates of the autocorrelation functions and the same decrease in the stability margin of a dynamical system with increasing values of the autocorrelation function decay parameter. The results of experimental studies of the relationship of surface roughness of parts machined on a precision turning module of TPARM type show that the mode of turning with minimal surface roughness is applicable to both these estimates.

Conclusions. At the maximum stability margin of a turning module's dynamic system the authors have revealed a frequency of a workpiece rotation, at which it is possible to achieve the minimum surface roughness at the maximum diamond turning performance. Herewith, these finding correspond with the previously obtained results regarding selection a turning mode by integral estimates of the autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations.

Key words: turning machine, dynamic quality, vibroacoustic oscillations, autocorrelation function, integral estimation, transfer function, stability, surface roughness.

Введение

Повышение требований к макро- и микрогеометрической точности деталей машино- и приборостроения, а также физико-механическим характеристикам их поверхностного слоя, применение на современных автоматизированных металлорежущих станках (МРС) новых обрабатываемых материалов и новых инструментальных материалов определило возрастание роли динамического качества станков, являющегося одним из существенных факторов, влияющих на их параметрическую надежность [1–3].

Для повышения точности обработки и снижения влияния виброакустических (ВА) колебаний на качество обработанной поверхности следует минимизировать уровень внешних воздействий по отношению к процессу резания и повышать устойчивость динамической системы МРС [1, 4–6]. Указанное особенно актуально для реализации алмазного точения на прецизионных станках [7].

Следует выделить два основных направления анализа динамических характеристик станков, причем первое базируется на теоретических моделях колебаний в станках, в которых в той или иной степени используются результаты экспериментальных исследований [1, 3, 5], а второе – на экспериментальных исследованиях ВА-колебаний формообразующих узлов МРС с дальнейшей обработкой результатов на ЭВМ и идентификации моделей с помощью специального программно-математического обеспечения (ПМО) [8–9]. Результаты подобных исследований направлены на формирование рекомендаций по повышению динамического качества МРС и выбор режима резания с минимальным уровнем ВА-колебаний.

Экспериментальные исследования ВА-колебаний станков в производственных условиях направлены на оценку уровня колебаний основных узлов при нормальном режиме функционирования и при приближении к границе устойчивости. Для этого используются спектральные и корреляционные методы обработки ВА колебаний, кепстры и функции когерентности, идентификация моделей упругой системы и процесса резания, определяются коэффициенты демпфирования и оценивается запас устойчивости [4, 6, 8, 9]. Целью данной работы является формирование оценок динамического качества прецизионных токарных модулей на основе вычисления автокорреляционных функций (АКФ) и определения зон значений параметров режима точения с наиболее высокой точностью обработки при минимальном уровне ВА колебаний.

Основная часть

В работах [10, 11] было показано, что с практической точки зрения для оценки динамического качества МРС целесообразно использовать полученные из зарегистрированных ВА-колебаний автокорреляционные функции с последующим формированием на их основе определенных критериев качества станков. Ранее применение АКФ ВА-колебаний для выбора режима резания рассмотрено в [7, 12] для прецизионного токарного модуля ТПАРМ-100М. Вибродатчик ДН-3 виброизмерителя ВШВ-003М2 устанавливался на магнитной опоре на резцовый блок токарного модуля, а далее сигнал подавался для обработки на компьютер. Измерения ВА-колебаний выполнялись при различных частотах вращения шпинделя при алмазном точении высокоточных деталей из алюминиевых и медных сплавов.

В качестве критерия для назначения частоты вращения шпинделя как одного из изменяемых параметров режима обработки был обоснован 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 – время корреляции.

Такая оценка была предложена в работе [4] для анализа динамических свойств линейных систем.

При исследованиях на модуле ТПАРМ-100М установлено, что минимум интегральной оценки (1) соответствует минимальной шероховатости поверхности R_a обрабатываемой детали, причем рекомендуемая частота вращения шпинделя равна 1600 об/мин, при которой обеспечивается наиболее высокая производительность (рис. 1).

Следует отметить, что в указанных экспериментах АКФ представляла собой затухающую косинусоиду

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

Покажем, что интегральная оценка (1) стремится к минимуму при увеличении значения параметра α , т.е. функция $I(\alpha)$ является убывающей. Без

потери общности примем $K_0 = 1$. После подстановки выражения (2) в формулу (1) имеем

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

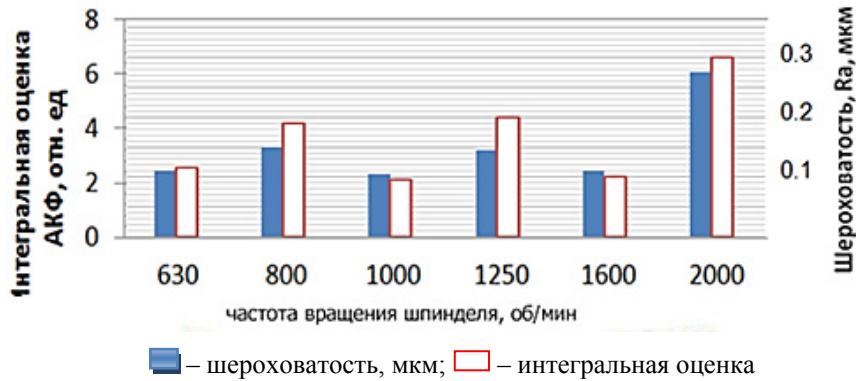


Рис. 1. Интегральная оценка АКФ и шероховатость поверхности при обработке на токарном модуле ТПАРМ-100М

Вычисление интеграла приводит к выражению

$$I = -\frac{e^{-2\alpha\tau_k}}{2(\alpha^2 + \omega^2)} \left(\alpha \cos^2 \omega\tau_k - \omega \sin \omega\tau_k \cos \omega\tau_k - \frac{\omega^2}{2\alpha} \right) - \frac{2\alpha^2 + \omega^2}{4(\alpha^2 + \omega^2)\alpha}. \quad (4)$$

Следующим шагом является вычисление производной по α последнего выражения и обоснование того, что $\frac{dI}{d\alpha} < 0$. Вычисление производной выражения (4) достаточно объемное, поэтому без потери общности с учетом того, что АКФ (2) является затухающей, а вне интервала $[0, \tau_k]$ практически равна нулю, вместо интеграла (3) можно определить интеграл

$$I_\alpha = \int_0^\alpha e^{-2\alpha\tau} \cos^2 \omega\tau d\tau. \quad (5)$$

Вычисление этого интеграла дает выражение

$$I_\alpha = \frac{2\alpha^2 + \omega^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega^2)}. \quad (6)$$

Далее имеем

$$\frac{dI_\alpha}{d\alpha} = -\frac{2\alpha^4 + \alpha^2\omega^2 + \omega^4}{4\alpha^2(\alpha^2 + \omega^2)}. \quad (7)$$

Выражение (7) всегда меньше нуля, т.е. функции (3) и (6) являются монотонно убывающими по параметру α .

На практике было реально зафиксировано, что наименьшему значению I соответствовало наибольшее значение α . В этом случае АКФ близка к δ – импульсу, который описывает АКФ сигнала типа «белый шум» [13]. Реальный спектр ВА-колебаний действительно близок к ограниченному «белому шуму» с относительно малой амплитудой без явных пиков амплитуд отдельных составляющих спектра, что и обуславливает наименьшее значение шероховатости ($Ra \leq 0,1$ мкм) при точении алюминиевых сплавов [12, 14].

Рассмотрим применение запаса устойчивости динамической системы (ДС) МРС для выбора режима резания. Данные понятия используются в теории автоматического управления для оценки динамического качества систем. В работе [12] эта методика была реализована, но не автоматизирована. В нашем случае оценка запаса устойчивости проводится косвенным методом по показателю колебательности ДС МРС, вычисление которого автоматизировано.

Последовательность вычисления следующая:

- виброизмерителем регистрируются ВА-колебания резцового блока токарного МРС при различных частотах вращения шпинделя;
- вычисляется АКФ ВА-колебаний, которая затем аппроксимируется аналитической функцией вида (2);
- с использованием связи изображений по Лапласу АКФ и передаточной функции ДС, полученной А. Н. Скляревичем [15]:

$$K(p) + K(-p) = W(p)W(-p), \quad (8)$$

определяется $W(p)$;

- из передаточной функции вычисляется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ДС $A(\omega)$, из которой находится показатель колебательности [13]:

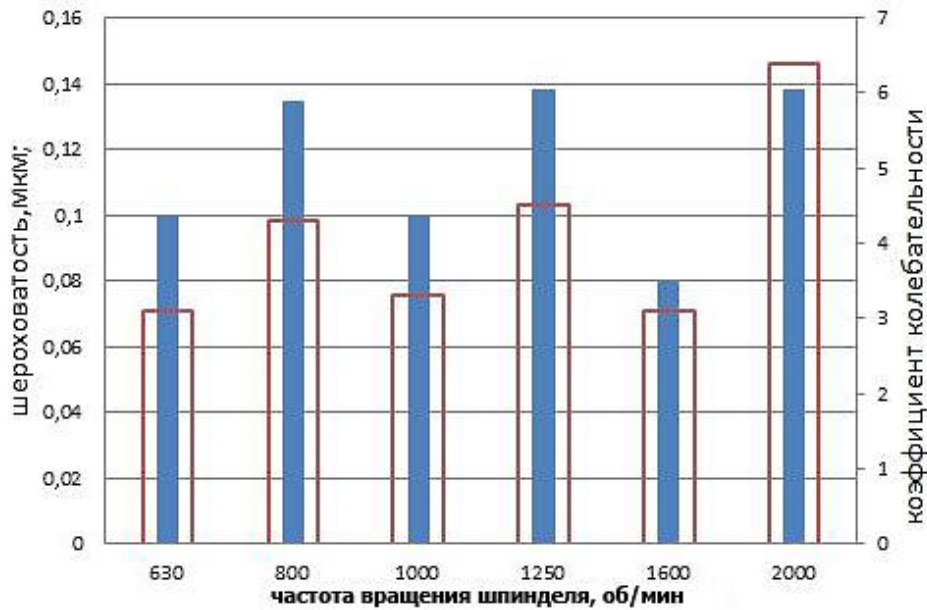
$$M = \frac{A_{\max}(\omega)}{A(0)}, \quad (9)$$

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

Из практики исследования систем автоматического управления установлено, что наибольший запас устойчивости достигается при $M = 1,1 \dots 1,5$, причем чем больше значение M , тем меньше запас устойчивости.

Применение данной методики в производственных условиях на токарном модуле типа ТПАРМ для выбора частоты вращения шпинделя при алмазном точении показало, что по максимуму запаса устойчивости можно определить ту частоту вращения, при которой достигается максимум производительности обработки с обеспечением минимальной шероховатости поверхности (рис. 2).

Для модуля типа ТПАРМ целесообразной является частота вращения 1600 об/мин, при которой наблюдается максимум запаса устойчивости – минимум показателя колебательности, причем шероховатость обрабатываемой поверхности не превышает допустимой величины 0,1 мкм [7, 12].



■ – шероховатость поверхности Ra, мкм; □ – показатель колебательности

Рис. 2. Изменение уровня шероховатости поверхности при точении на ультрапрецизионном модуле типа ТПАРМ и коэффициент колебательности

Покажем, что показатель колебательности M является монотонно убывающей функцией по параметру α из формулы для АКФ (1).

Известно [11], что ДС станка в ряде случаев может быть описана колебательным звеном с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2gTp + 1}, \quad (10)$$

где T – постоянная времени, определяемая собственной частотой колебаний шпинделя; K – коэффициент передачи, определяемый жесткостью шпинделя; g – коэффициент затухания, характеризующий безвозвратные потери энергии.

Показатель колебательности, определяемый из АЧХ для указанного звена, равен [16]:

$$M = \frac{1}{2g\sqrt{1-g^2}}, \quad (11)$$

причем $g = \alpha T$.

Производная от M по g равна

$$\frac{dM}{dg} = -\frac{1-g^2(1-g^2)}{2\sqrt{1-g^2}}. \quad (12)$$

Так как для реальной ДС станка значение $g = 0,1, \dots, 0,5$, то всегда $dM/dg < 0$. Тогда в силу линейности связи α и g показатель колебательно-

сти $M(g)$, а следовательно, и $M(\alpha)$ являются монотонно убывающими функциями.

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, во-первых, что характер изменения как интегральных оценок АКФ, так и запаса устойчивости ДС станка в зависимости от параметра α совпадает; во-вторых, экспериментальные данные показывают совпадение характера связи точности обработки деталей с предложенными оценками. Необходимо, однако, отметить, что интегральные оценки АКФ отражаются только результатом обработки экспериментальных данных, а запас устойчивости отражает качество динамической системы.

Следовательно, применение АКФ ВА-колебаний при резании для оценки динамического качества станков и назначения режима обработки достаточно обоснованно и эффективно.

Библиографический список

1. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, И. Н. Янкин, М. Б. Бровкова. – Саратов : СГТУ, 2008. – 312 с.
3. **Игнатьев, А. А.** Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции / А. А. Игнатьев, В. В. Горбунов, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2009. – 160 с.
4. **Добрынин, С. А.** Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
5. **Игнатьев, А. А.** Экспериментально-аналитическое определение передаточной функции и запаса устойчивости динамической системы шлифовального станка / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев // СТИН. – 2014. – № 8. – С. 4–7.
6. **Аршанский, М. М.** Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 136 с.
7. **Игнатьев, А. А.** Динамические испытания прецизионных токарных модулей / А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Куранов // Известия вузов. Машиностроение. – 1992. – № 4. – С. 98–104.
8. Методическое и программное обеспечение автоматизированного эксперимента в динамике машин / М. Б. Левин, А. Б. Одуло, Д. Е. Резенберг, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Наука, 1989. – 294 с.
9. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А. А. Игнатьев, М. В. Виноградов, В. В. Горбунов, В. А. Добряков, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2004. – 124 с.
10. **Игнатьев, А. А.** Стохастические методы идентификации в динамике станков / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2013. – 124 с.
11. **Игнатьев, А. А.** Идентификация в динамике станков с использованием стохастических методов / А. А. Игнатьев, В. В. Коновалов, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2014. – 92 с.
12. Точность и надежность автоматизированных металлорежущих станков : в 3 ч. / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. – Саратов : СПИ, 1994. – Ч. 2. – 156 с.

13. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. В. Попов. – М. : Наука, 1975. – 768 с.
14. Точность и надежность автоматизированных металлорежущих станков: в 3 ч. / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, В. В. Мартынов. – Саратов : СПИ, 1992. – Ч. 1. – 160 с.
15. **Скляревич, А. Н.** Операторные методы в статистической динамике автоматических систем / А. Н. Скляревич. – М. : Наука, 1965. – 460 с.
16. **Никулин, Е. Н.** Основы теории автоматического управления / Е. Н. Никулин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 630 с.

References

1. Kudinov V. A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 360 p.
2. Brzhozovskiy B. M., Martynov V. V., Yankin I. N., Brovkova M. B. *Dinamicheskiiy monitoring tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Dynamic monitoring of technological equipment]. Saratov: SGTU, 2008, 312 p.
3. Ignat'ev A. A., Gorbunov V. V., Ignat'ev S. A. *Monitoring tekhnologicheskogo protsessa kak element sistemy upravleniya kachestvom produktsii* [Technological process monitoring as an element of the product quality management system]. Saratov: SGTU, 2009, 160 p.
4. Dobrynin S. A., Fel'dman M. S., Firsov G. I. *Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin* [Methods of automatic machine vibration research]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p.
5. Ignat'ev A. A., Karakozova V. A., Ignat'ev S. A. *STIN*. 2014, no. 8, pp. 4–7.
6. Arshanskiy M. M., Shcherbakov V. P. *Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallo-rezhushchikh stankakh* [Virbodiagnosics and precision management on metal-cutting machine tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 136 p.
7. Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Kuranov V. V. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University proceedings. Mechanical engineering]. 1992, no. 4, pp. 98–104.
8. Levin M. B., Odulo A. B., Rezenberg D. E., Fel'dman M. S., Firsov G. I. *Metodicheskoe i programnoe obespechenie avtomatizirovannogo eksperimenta v dinamike mashin* [Methodology and software for automatic experiments in machine dynamics]. Moscow: Nauka, 1989, 294 p.
9. Ignat'ev A. A., Vinogradov M. V., Gorbunov V. V., Dobryakov V. A., Ignat'ev S. A. *Monitoring stankov i protsessov shlifovaniya v podshipnikovom proizvodstve* [Monitoring of machine tools and grinding processes in bearing production]. Saratov: SGTU, 2004, 124 p.
10. Ignat'ev A. A., Karakozova V. A., Ignat'ev S. A. *Stokhasticheskie metody identifikatsii v dinamike stankov* [Stochastic methods of identification in machine tool dynamics]. Saratov: SGTU, 2013, 124 p.
11. Ignat'ev A. 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 p.
12. Brzhozovskiy B. M., Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Martynov V. V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh metallo-rezhushchikh stankov: v 3 ch.* [Precision and reliability of automatic metal-cutting machine tools: in 3 parts]. Saratov: SPI, 1994, part 2, 156 p.
13. Besekerskiy V. A., Popov E. V. *Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [The theory automatic control systems]. Moscow: Nauka, 1975, 768 p.
14. Brzhozovskiy B. M., Ignat'ev A. A., Dobryakov V. A., Martynov V. V. *Tochnost' i nadezhnost' avtomatizirovannykh metallo-rezhushchikh stankov: v 3 ch.* [Precision and

reliability of automatic metal-cutting machine tools: in 3 parts]. Saratov: SPI, 1992, part 1, 160 p.

15. Sklyarevich A. N. *Operatornye metody v statisticheskoy dinamike avtomaticheskikh sistem* [Operator methods in statistical dynamics of automatic systems]. Moscow: Nauka, 1965, 460 p.
16. Nikulin E. N. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Basic automatic control theory]. Saint-Petersburg: BVV-Peterburg, 2004, 630 p.

Игнат'ев Александр Анатольевич

доктор технических наук, профессор, кафедра автоматизации, управления, мехатроники, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: acm@sstu.ru

Ignat'ev Aleksandr Anatol'evich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of automation, control, mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya street, Saratov, Russia)

Самойлова Елена Михайловна

кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации, управления, мехатроники, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: acm@sstu.ru

Samoylova Elena Mikhaylovna

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of automation, control, mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya street, Saratov, Russia)

Шамсадова Яха Шаидовна

соискатель, кафедра автоматизации, управления, мехатроники, Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: acm@sstu.ru

Shamsadova Yakha Shaidovna

Applicant, sub-department of automation, control, mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Politekhnikeskaya street, Saratov, Russia)

УДК 681.5

Игнат'ев, А. А.

Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний / А. А. Игнат'ев, Е. М. Самойлова, Я. Ш. Шамсадова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 90–98. DOI 10.21685/2072-3059-2017-2-8