

## Автоматизированная оценка динамического качества шлифовальных станков при изготовлении деталей подшипников

*А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, С.А. Игнатьев, А.В. Каракозова*

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.*

**Аннотация:** Приводятся результаты автоматизированной оценки динамического качества шлифовальных станков в системе мониторинга технологического процесса. Аналитически получена передаточная функция динамической системы, из неё выведена формула для частотной функции, на основе чего построены модели спектров колебаний, в которых присутствуют частоты, адекватные реальным виброакустическим колебаниям динамической системы станка при обработке колец. Для экспериментальной оценки динамического качества станков используются интегральные оценки низкочастотных составляющих спектра вибраций, характеризующих взаимосвязь качества обработки колец подшипников и динамического качества станков.

**Ключевые слова:** динамическое качество шлифовального станка, виброакустические колебания, кольца подшипников, качество обработки, система мониторинга.

### Введение

Для принятия решения по поддержанию заданного качества изготовления деталей высокоточных изделий на автоматизированных металлорежущих станках (АМС) необходимо учитывать влияние процессов, протекающих в технологической системе с различной скоростью, основными из которых являются колебательные, тепловые, износ инструмента и ряд других [1, 2]. Именно их влияние определяет реальное качество АМС и, соответственно, качество обработанной поверхности, характеризуемое её макро- и микрогеометрическими погрешностями, а также однородностью физико-механических характеристик поверхностного слоя [3]. Соответственно возникает задача обеспечения контроля ряда параметров изготовленных деталей, АМС и процесса обработки (рис. 1), что решается в рамках системы мониторинга технологического процесса (СМТП) [4, 5] (рис. 2). Если рассматривать шлифование колец подшипников, то одним из доминирующих факторов являются виброакустические (ВА) колебания в системе «деталь-круг», что анализировалось авторами ранее [6]. С этой точки зрения интерес представляют методические аспекты практического

---

применения результатов анализа взаимосвязи динамического качества АМС и качества шлифовальной обработки дорожек качения колец в подшипниковом производстве.

### **Цели и задачи**

Важнейшим фактором, от которого зависит качество шлифования является динамическое состояние станка, которое определяется характером колебательных процессов в узлах формообразующей подсистемы.

Обобщенными показателями динамических характеристик станка, влияющих на формирование отклонения от круглости и волнистости колец, а также на неоднородность физико-механических свойств поверхностей качения, являются уровень и частотный состав виброакустических (ВА) колебаний без резания и при резании, являющиеся важными, а иногда единственными показателями нормального функционирования станка.

Автоматизация процессов измерения и обработки вибросигналов с помощью микропроцессорной техники, а также диагностирования возможна с применением методов виброакустического контроля, так как существует тесная связь динамических процессов, протекающих в станках с информацией, содержащейся в виброакустических сигналах.

### **Методы и средства**

Исходя из вышеизложенного, можно заметить, что существует тесная связь динамических процессов, протекающих в станках, с информацией, содержащейся в виброакустических сигналах, являющаяся основой формирования методов и средств оценки динамического качества шлифовальных станков.

Для предварительного анализа колебательных процессов в шлифовальном АМС целесообразно использовать математическую модель ДС в виде передаточной функции.

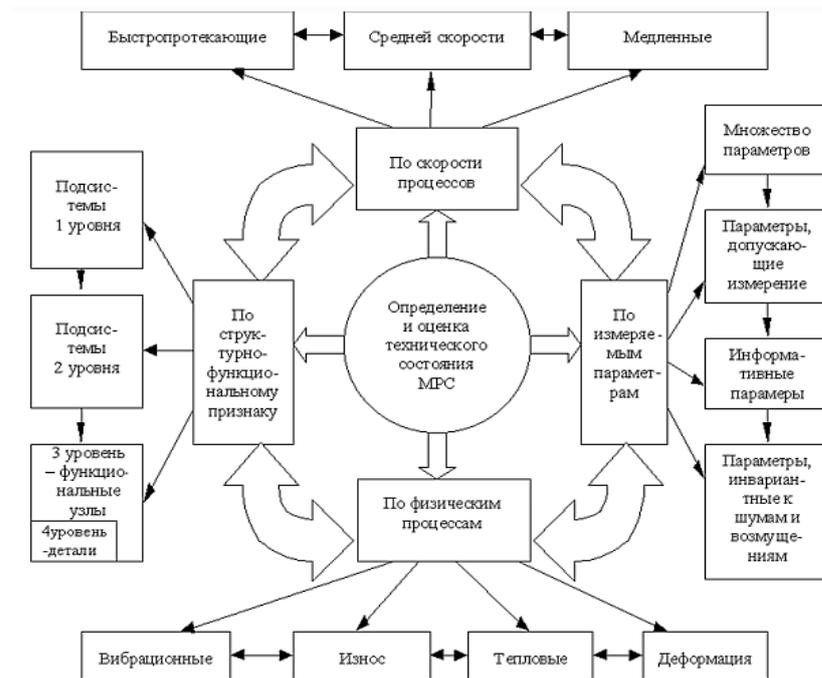


Рис. 1 – Контроль основных параметров АМС

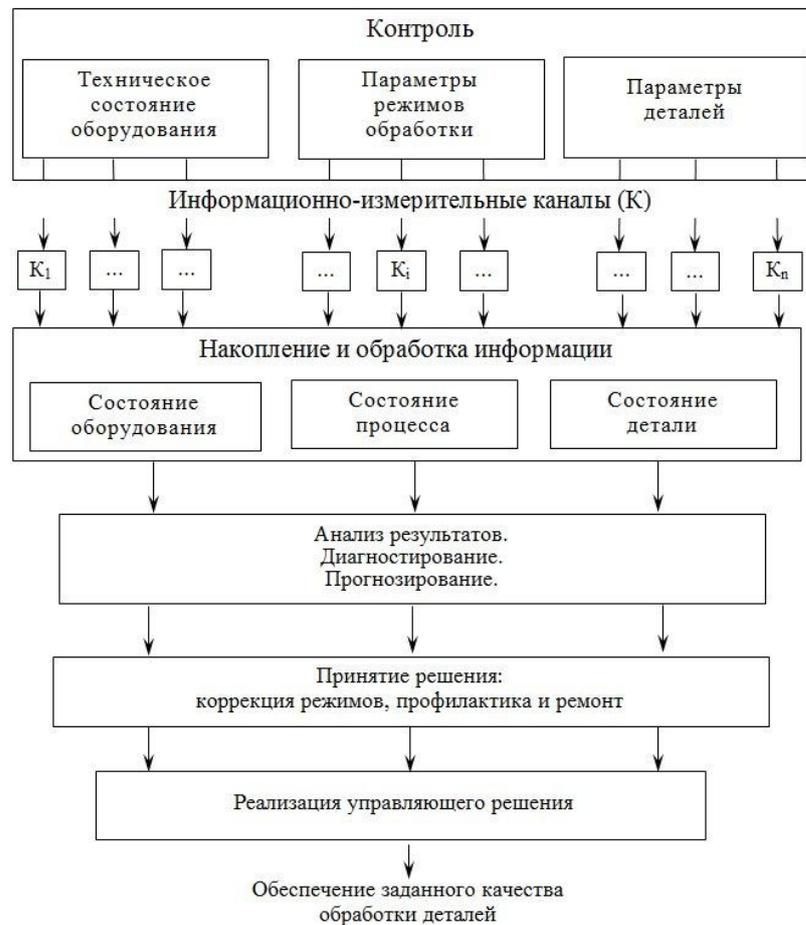


Рис. 2 – Схема мониторинга процесса шлифования колец

Для её построения используются положения, изложенные в работах В.А. Кудинова [7] и В.Н. Михелькевича [8]. Далее из передаточной функции, в которой учитываются колебательные процессы, возникающие в шпиндельных узлах (ШУ) шлифовального круга и обрабатываемой детали (не учитывается износ круга), выводится выражение для частотной функции ДС, а затем выполняется моделирование спектра колебаний с помощью пакета программ Matlab. Далее спектр колебаний, полученный аналитически, сравнивается с реальными спектрами, полученными в результате обработки измеренных ВА колебаний на АМС при резании. Указанное направлено на подтверждение адекватности теоретических и практических результатов. Следующим этапом является установление связи интегральных оценок спектра с качеством обработанной поверхности, что обеспечивает возможность оперативной автоматизированной оценки динамического качества АМС непосредственно в производственных условиях.

### Результаты

Передаточная функция ДС составляется на основе функциональной схемы, в наиболее удобной форме, отображающей её основные узлы и их взаимосвязи, входные и выходные величины и возмущающие воздействия. В производственных условиях возможно технически реализовать измерения ВА колебаний ШУ круга (инструмента)  $x_{и}(t)$  и ШУ детали  $x_{д}(t)$ , и в дальнейшем использовать их в СМТП.

При выводе передаточной функции за основу принята модель ДС, полученная В.Н. Михелькевичем [8], в которой дополнительно учитываются динамические характеристики ШУ [9]. Регулирующим воздействием на процесс взята скорость суппорта поперечной подачи шлифовального круга  $v_c$ , а выходной переменной ДС - радиальная составляющая силы резания  $F_p$ . Исходя из схемы ДС станка, приведенной в работе [7], приходим к заключению, что упругая система состоит из параллельно соединенных ШУ

---

детали и ШУ инструмента, следовательно,  $W_{yc}(p) = W_{и}(p) + W_{д}(p)$ . Следовательно, по аналогии с моделью из работы [8], передаточная функция процесса резания при врезном шлифовании будет иметь вид:

$$W_p(p) = \frac{1}{p} \left(1 - e^{-p\beta\tau_d}\right) \frac{K_{рез}}{1 + K_{рез} \left(1 - e^{-p\tau_d}\right) \left[W_d(p) + W_{и}(p)\right]}, \quad (1)$$

где  $K_{рез}$ ,  $\beta$  – коэффициенты, определяющие процесс резания;  $\tau_d$  – время оборота детали.

Образованные совокупностью колебательных звеньев [5] и имеющие в общем случае сложную структуру, передаточные функции ШУ детали  $W_d(p)$  и ШУ инструмента  $W_{и}(p)$  имеют вид:

$$W_d(p) = \sum_{i=1}^n \frac{h_{дi}}{T_{дi}^2 p^2 + 2\gamma_{дi} T_{дi} p + 1}, \quad W_{и}(p) = \sum_{j=1}^m \frac{h_{иj}}{T_{иj}^2 p^2 + 2\gamma_{иj} T_{иj} p + 1}, \quad (2)$$

где  $h_{дi}$ ,  $h_{иj}$  – коэффициенты, обусловленные статической жесткостью отдельных элементов ШУ;  $T_{дi}$ ,  $T_{иj}$  – постоянные времени, обусловленные собственными частотами отдельных элементов ШУ;  $\gamma_{дi}$ ,  $\gamma_{иi}$  – относительные коэффициенты демпфирования отдельных элементов ШУ.

Тогда, для упрощения передаточной функции  $W_p(p)$ , ШУ можно рассматривать как колебательные звенья с одной основной частотой, и, в первом приближении они будут иметь вид:

$$W_p(p) = \frac{K_{рез} \tau_d}{T_{иp}^2 p^2 + 2[\gamma_{и} + K_{рез} \tau_d (h_{д} + h_{и})] T_{иp} p + 1}. \quad (3)$$

Сила резания  $F_p(t)$  имеет детерминированную составляющую  $\tilde{F}_p(t)$ , определяемую подачей круга, и стохастическую составляющую  $\overset{\circ}{F}_p(t)$ , определяемую совокупностью различных факторов, таких, как, неравномерность скорости подачи круга, неравномерность припуска заготовки, колебания в ДС и ряд других [9]. Следовательно, составляющую

$\mathring{F}_p(t)$  можно рассматривать как ограниченный "белый шум" с постоянной спектральной плотностью  $S_0$ .

Выражающиеся формулами выходные измеряемые величины (без учета возмущающих воздействий на ШУ детали и ШУ инструмента) имеют вид:

$$x_d(p) = \frac{W_d(p)F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_d(p) + W_i(p)]}, \quad x_i(p) = \frac{W_i(p)F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_d(p) + W_i(p)]}. \quad (4)$$

В условиях производства измерение ВА колебаний осуществляется на опоре кольца, тогда воздействия со стороны ШУ детали и ШУ инструмента суммируются, следовательно, имеем:

$$x_0(p) = \frac{[W_d(p) + W_i(p)]F_p(p)}{1 + W_p(p)[W_d(p) + W_i(p)]}. \quad (5)$$

Таким образом, составляющая  $\mathring{F}_p(t)$  определяет формирование микрогеометрии поверхности, а составляющая  $\tilde{F}_p(t)$  устанавливает закономерность съема припуска, задаваемую управляющей программой, и спектр сигнала на выходе ДС с частотной функцией  $W(j\omega)$  связан со спектром входного сигнала соотношением [10, 11]:

$$S_{\text{ВЫХ}}(\omega) = |W(j\omega)|^2 S_{\text{ВХ}}(\omega). \quad (6)$$

В нашем случае принято, что  $S_{\text{ВХ}}(\omega) = S_0$ , тогда  $S_{\text{ВЫХ}}(\omega)$  целиком определяется частотной функцией ДС и, следовательно, спектр выходного сигнала  $x_0(t)$  – ВА колебания ДС – содержит основные частоты ШУ. Из формулы (5) следует, что передаточная функция ДС имеет вид:

$$W_{\text{ДС}}(p) = \frac{W_d(p) + W_i(p)}{1 + W_p(p)[W_d(p) + W_i(p)]}. \quad (7)$$

Далее после ряда упрощений получаем выражение для  $|W(j\omega)|^2$ :

$$|W(j\omega)|^2 = \frac{(h_d + h_i - h_d T_i^2 \omega^2)^2 + 4h_d^2 \gamma_i^2 T_i^2 \omega^2}{(1 - T_i^2 \omega^2)^2 + 4\gamma_i^2 T_i^2 \omega^2}. \quad (8)$$

При воздействии сигнала типа «белый шум» модель спектра процесса  $x_0(t)$  представлена на рис. 3а и содержит две частотные составляющие, как и предполагалось.

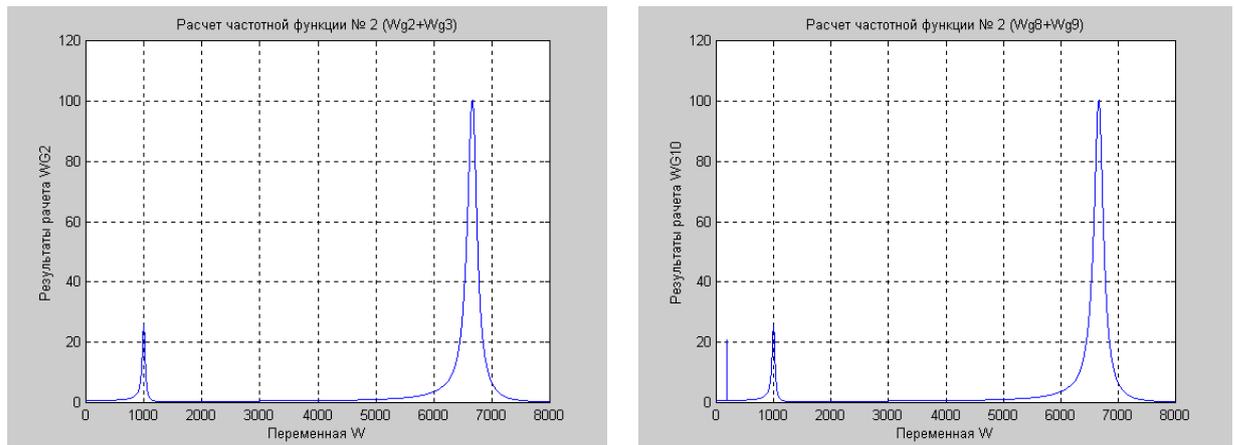
Низкочастотное возмущение из-за дисбаланса круга, возникающее при эксплуатации ДС, описывается выражением:

$$F_{\text{ИБ}}(t) = F_D \sin \omega_k t, \quad (9)$$

где  $\omega_k$  – угловая частота вращения круга.

В формулу (7), в процессе моделирования, вводится дополнительная составляющая:

$$x_{\text{ОВ}}(p) = \frac{[W_D(p) + W_{\text{И}}(p)]F_p(p) + F_{\text{ИБ}}(p)W_{\text{И}}(p)}{1 + W_p(p)[W_D(p) + W_{\text{И}}(p)]}. \quad (10)$$



а

б

Рис. 3 – Результаты моделирования спектра колебаний динамической системы (по оси абсцисс отложено значение амплитуды

в относительных единицах, по оси ординат – круговая частота  $w$ ):

а – при учете по одной существенной частоте ШУ инструмента и ШУ детали;

б – при тех же допущениях и учете возмущения от дисбаланса круга.

Вклад возмущения от дисбаланса круга в спектр колебаний проявляется в появлении в нем дополнительной составляющей на частоте  $\omega_k$ , амплитуда которой зависит от величины дисбаланса (рис. 3б).

Экспериментальные спектры, представленные в работе [9], имеют более сложный состав, но в общем соответствуют построенным моделям. Для оценки динамического качества станка, на практике, результаты измерений колебаний  $x_0(t)$  и  $x_{OB}(t)$  обрабатываются методами теории случайных процессов, в частности, необходимо вычислить авто- и взаимные спектральные функции (АСФ и ВСФ).

Интегральные оценки от спектральных функций вычисляются как численные оценки динамического качества шлифовального АМС, при этом используются АСФ и ВСФ колебаний основных узлов ДС, причем вид интегральной оценки, адекватно отражающей динамическое качество и коррелированной с качеством обработанных деталей, определяется экспериментально.

На ОАО «Саратовский подшипниковый завод» (в настоящее время ОАО ЕПК-Саратов) при оценке качества обработки дорожек качения колец выполнены измерения ВА колебаний на круглошлифовальных автоматах модели SWaAGL-50. Использовались два виброизмерителя ВШВ-003-М2 с датчиками ДН-3 и компьютер. Вибродатчики устанавливались с помощью магнитных опор на узле крепления обрабатываемого кольца и ШУ инструмента. Диапазон регистрируемых частот 1...4000 Гц. Результаты обрабатывались на компьютере в среде Matlab. Установлено изменение спектра ВА колебаний в процессе технологического цикла. Одновременно проводилось исследование волнистости и отклонения от круглости колец на кругломере Talyrond-73 после окончательной обработки на станках модели SWaAGL-50 (таблица).

---

Таблица

Точность обработки колец на станках модели SWaAGL-50

№ станка	Тип кольца	Волнистость, мкм		Отклонение от круглости, мкм	
		предварительная обработка	окончательная обработка	предварительная обработка	окончательная обработка
436	208.02	3,44	0,68	1,22	0,92
166	308.02	3,24	2,87	1,68	3,20

После окончательной обработки на станке № 166 значение отклонения от круглости стало выше, а значение волнистости уменьшилось незначительно, что подтверждает вывод о несбалансированности шлифовального круга.

Исходя из оценки физико-механических свойств поверхностного слоя дорожек качения колец на автоматизированной установке вихретокового контроля [7], можно сделать вывод, что качество поверхностей качения коррелирует с результатами виброизмерений, так как погрешности обработки колец подшипников на станке № 436 выше, чем на станке № 166.

Для проведения анализа качества обработки колец шарикоподшипников были выполнены измерения вибраций на четырех круглошлифовальных АМС модели SWaAGL-50. В качестве информативных характеристик использовались интегральные оценки спектров (рис. 4, 5).

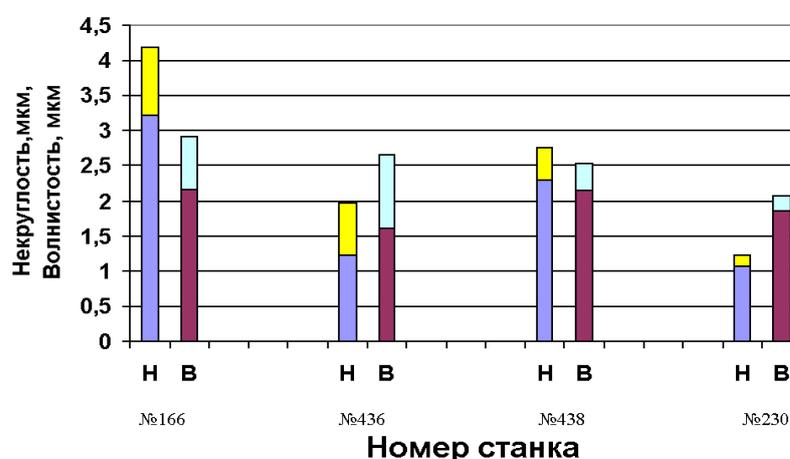


Рис. 4 – Результаты измерений отклонения от круглости (Н) и волнистости (В) колец, обработанных на станках SWaAGL-50 (другим цветом в столбиках

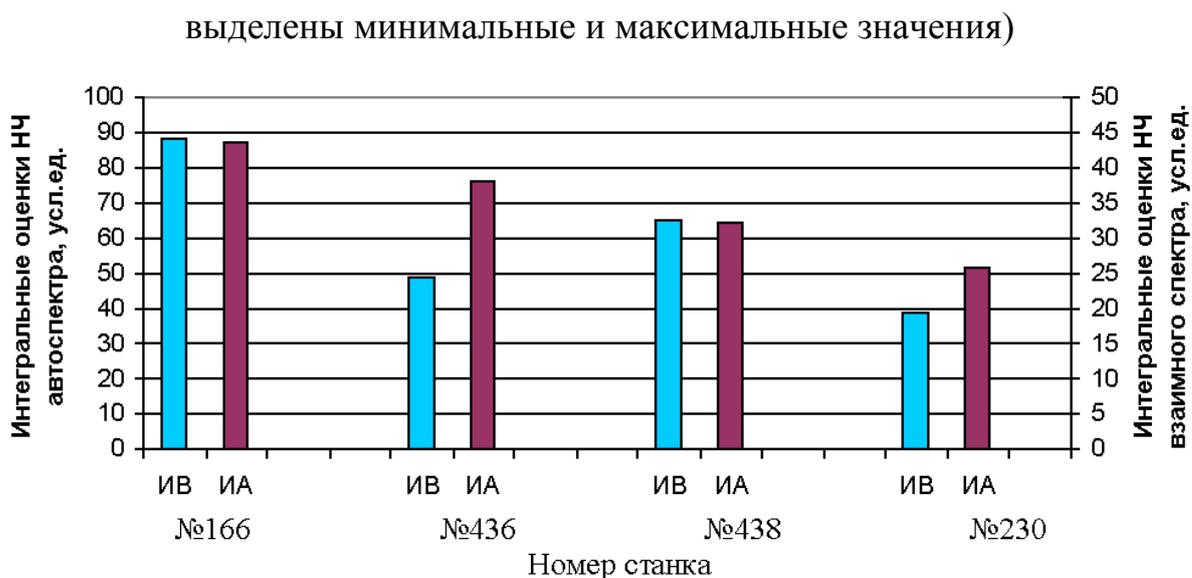


Рис. 5 – Значения интегральных оценок низкочастотного спектра колебаний станков SWaAGL-50: ИА – интегральная оценка автоспектра колебаний опоры кольца, ИВ – интегральная оценка взаимного спектра колебаний опоры кольца и ШУ круга

Как показал сопоставительный анализ результатов измерений, интегральные оценки спектров коррелируют с параметрами точности поверхностей качения колец.

Изложенные результаты проведенных исследований, которые способствовали реализации комплекса организационно-технических мероприятий, явились основой для разработки методики мониторинга процесса шлифования в рамках СМТП и позволили практически исключить брак при шлифовании колец подшипников.

### Заключение

1. По результатам автоматизированного контроля уровня ВА колебаний шлифовальных станков достоверно оценивается динамическое качество АМС, влияющее на качество обработки колец подшипников.

2. Построенная модель ДС шлифовального АМС в виде передаточной функции позволила осуществить моделирование спектров регистрируемых процессов, адекватных реальным ВА колебаниям ДС при обработке колец.

3. Для оценки динамического качества АМС в рамках СМТП в качестве информационных характеристик колебаний основных узлов ДС целесообразно использовать интегральные оценки низкочастотных составляющих автоспектра вибраций опоры кольца и взаимного спектра вибраций опоры кольца и ШУ круга, коррелирующих, соответственно, с волнистостью и отклонением от круглости поверхности качения.

### Литература

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

2. Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г. Обеспечение качества деталей при обработке резанием в автоматизированном производстве. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 412 с.

3. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.

4. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.

5. Курило А.А., Сорокин М.А., Стародубцев Ю.И. Методика обработки результатов мониторинга с динамически изменяемым уровнем разрешающей способности базы данных // Инженерный вестник Дона: электронный научный журнал. 2021. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/)

6. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Захарченко М.Ю. и др. Автоматизированный неразрушающий контроль в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников // Инженерный вестник Дона, 2021. № 9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193/)

---

7. Кудинов В.А. Динамика станков. М: Машиностроение, 1967. 360 с.
8. Михелькевич В.Н. Автоматическое управление шлифованием. М.: Машиностроение, 1975. 304 с.
9. Ignatyev A. A., Samoylova E.M., Zakharchenko M. Yu. et al. Modelling and practical application of autocorrelation functions of vibroacoustic oscillations in a machine dynamic system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) № 012005 (Scopus).
10. Бесекерский В.А., Попов Е.В. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975. 768 с.
11. Lin Z.H., Hodgson D.C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures. Int. J. Mach. Tools and Manufact. 1988. V. 28. № 2. pp. 93-101.

#### References

1. Pronikov A.S. Parametricheskaya nadezhnost' mashin [Parametric reliability of machines]. М.: Izd-vo MGTU im.N.E. Baumana, 2002. 560 p.
  2. Grigoriev S.N., Maslov A.R., Shirladze A.G. Obespechenie kachestva detalej pri obrabotke rezaniem v avtomatizirovannom proizvodstve [Quality assurance of parts during cutting processing in automated production]. Staryj Oskol: TNT, 2012. 412 p.
  3. Starkov V.K. Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve [Cutting processing. Stability and quality management in automated production] М.: Mashinostroenie, 1989. 296 p.
  4. Push A.V. STIN. 2000. № 9. pp. 12-20.
  5. Kurilo A.A., Sorokin M.A., Starodubcev Ju.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6882/)
  6. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Zaharchenko M.Yu. et al. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193)
-



7. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Dynamics of machine tools]. M.: Mashinostroenie, 1967. 360 p.
8. Mihel'kevich V.N. Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem [Automatic grinding control]. M.: Mashinostroenie, 1975. 304 p.
9. Ignatyev A. A., Samoylova E.M., Zakharchenko M. Yu. et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1047 (2021) № 012005.
10. Besekerskiy V.A., Popov E.V. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. M.: Nauka, 1975. 768 p.
11. Lin Z.H., Hodgson D.C. Int. J. Mach. Tools Manufact., 1988, V. 28, № 2, pp. 93-101.