

**ПРИМЕНЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЕ СТАНКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
В ШПИНДЕЛЬНОМ УЗЛЕ**

А. А. Игнатьев, В. А. Добряков, С. А. Игнатьев, Я. Ш. Шамсадова

**APPLICATION OF AUTOCORRELATED FUNCTIONS
OF VIBROACOUSTIC VIBRATIONS IN THE DYNAMIC
SYSTEM OF THE MACHINE FOR IDENTIFICATION
OF DEFECTS IN THE SPINDLE UNIT**

A. A. Ignatyev, V. A. Dobryakov, S. A. Ignatyev, Ya. Sh. Shamsadova

Аннотация. *Актуальность и цели.* Одним из наиболее эффективных методов выявления дефектов в работающем оборудовании является вибродиагностический, в основе которого лежит регистрация виброакустических колебаний в динамической системе станка, выделение спектральных составляющих и установление их связи с дефектами. Целью работы является обоснование возможности применения автокорреляционных функций виброакустических (ВА) колебаний в динамической системе станка при шлифовании дорожки качения колец подшипников для выявления дефектов в шпиндельном узле. *Материалы и методы.* На основе предложенной модифицированной схемы динамической системы станка выполнен теоретический анализ возможности выделения основных частот вибраций, связанных с дефектами в шпиндельном узле, с использованием автокорреляционных функций (АКФ) зарегистрированных виброакустических колебаний. *Результаты.* Предлагаемая методика обнаружения дефектов в шпиндельном узле шлифовального станка SIW-5 позволила распознать дефект, заключающийся в дисбалансе абразивного круга. Путем разложения АКФ в ряд Фурье можно установить наличие других дефектов подшипниковых опор шпиндельного узла. *Выводы.* Теоретические и экспериментальные исследования ВА колебаний динамической системы шлифовальных станков показали, что с помощью АКФ можно достаточно эффективно отделить случайные составляющие колебаний от детерминированных, связанных с дефектами шпиндельного узла.

Ключевые слова: автоматизированный станок, динамическая система, виброакустические колебания, автокорреляционная функция, шпиндельный узел, выявление дефектов.

Abstract. *Background.* One of the most effective methods of identification of defects in the working equipment is vibrodiagnostic which cornerstone registration of vibroacoustic vibrations in the dynamic system of the machine, allocation of spectral components and establishment of their communication with defects is. The purpose of work is justification of a possibility of application of autocorrelated functions of vibroacoustic vibrations in the dynamic system of the machine when grinding a path of swing of rings of bearings for identification of defects in a spindle unit. *Materials and methods.* On the basis of the offered modified scheme of dynamic system of the machine the theoretical analysis of a possibility of allocation of base frequencies of the vibrations connected with defects in a spin-

dle unit, with use of autocorrelated functions (AKF) of the registered vibroacoustic (VA) fluctuations is made. *Results.* The offered technique of detection of defects in a spindle unit of the SIW-5 grinder allowed to recognize the defect consisting in an imbalance of an abrasive wheel. By decomposition of AKF in a row Fourier can establish availability of other defects of bearing support of a spindle unit. *Conclusions.* Theoretical and pilot studies of VA of fluctuations of dynamic system of grinders showed that by means of AKF it is possible to separate rather effectively accidental components of fluctuations from determined, connected with defects of a spindle unit.

Key words: automated machine, dynamic system, vibroacoustic vibrations, autocorrelated function, spindle unit, identification of defects.

Проблема обеспечения заданной технологической надежности автоматизированных станков является весьма актуальной для современного производства высокоточных деталей для машино- и приборостроения. Важное место при этом отводится как приемо-сдаточным испытаниям станков, так и испытаниям в производственных условиях, осуществляемым после технического обслуживания или ремонта [1–3].

Среди всего комплекса методов испытания станков значительное место отводится динамическим испытаниям, основанным на измерении и анализе виброакустических колебаний основных узлов станков [4–6]. Результаты испытаний, проведенных по научно обоснованным методикам, обеспечивают достоверную оценку динамического качества станков, контроль технического состояния и диагностирование узлов (в том числе контроль состояния инструмента), а также корректировку значений параметров режима обработки, направленную на повышение ее эффективности [7].

Обработка регистрируемых ВА колебаний осуществляется по различным методикам с помощью специального программно-математического обеспечения [8, 9] для формирования характеристик, отвечающих решению поставленной задачи испытаний станков.

Исследования динамических характеристик автоматизированных токарных и шлифовальных станков, выполненные в Саратовском государственном техническом университете, позволили обосновать эффективность использования как спектральной плотности мощности (СПМ), так и автокорреляционных функций (АКФ) ВА колебаний динамической системы (ДС) станков для оценки их динамического качества и определения целесообразных значений параметров режима резания на основе вычисления запаса устойчивости ДС [3, 5, 7, 10].

В соответствии с работой В. А. Кудинова динамическая система станка образуется совокупностью упругой системы (УС) и рабочих процессов в их взаимодействии [11]. В свою очередь, УС включает в себя собственно станок, деталь, инструмент, приспособление.

При обработке деталей, например, при круглом или внутреннем шлифовании колец подшипников, основными источниками ВА колебаний в УС являются процесс резания и шпиндельные узлы (ШУ) инструмента и детали. В этом случае известная схема эквивалентной ДС станка (по В. А. Кудинову) может быть модифицирована выделением в УС двух ШУ (рис. 1).

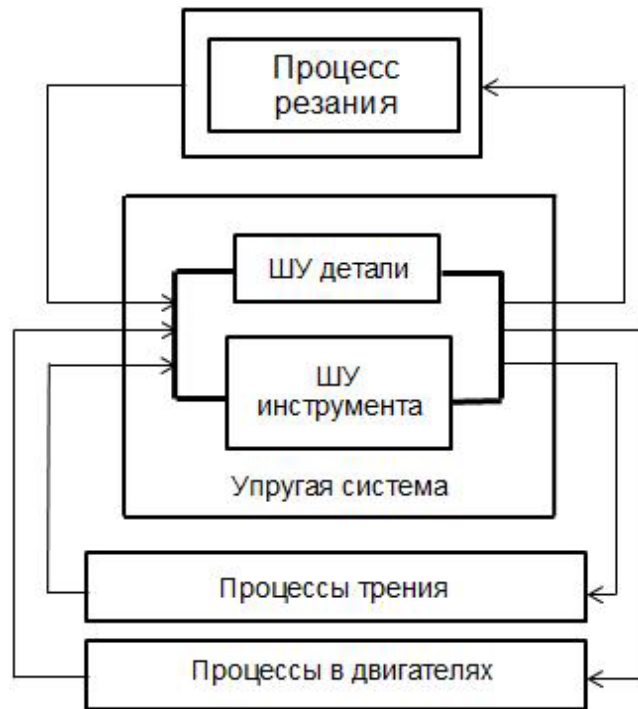


Рис. 1. Модифицированная схема эквивалентной динамической системы шлифовального станка

В силу того, что техническое состояние ШУ станков существенно влияет на точность обработки деталей [12], измерению их ВА колебаний уделяется большое внимание [5, 13]. Следует отметить, что основные частоты в спектре вибраций ШУ рассчитаны [14], тогда каждая из подшипниковых опор шпинделей может быть представлена в виде параллельного соединения колебательных звеньев с передаточными функциями вида

$$W_i(p) = \frac{K_i}{T_i^2 p^2 + 2\varepsilon_i T_i p + 1},$$

где K_i , ε_i – коэффициент передачи и параметр затухания i -го звена; p – оператор Лапласа; T_i – постоянная времени, определяющая частоту колебаний одной из компонент спектра вибраций.

В соответствии с данными работы [14] параллельно соединенных колебательных звеньев пять, собственные частоты которых определяются, во-первых, обратной частотой вращения шпинделя ($W_1(p)$), во-вторых, частотой вращения сепаратора ($W_2(p)$), в-третьих, частотой перекачивания шариков по наружному кольцу ($W_3(p)$), в-четвертых, частотой перекачивания шариков по внутреннему кольцу ($W_4(p)$), в-пятых, частотой вращения шариков ($W_5(p)$).

Авторами установлена возможность применения АКФ ВА колебаний ШУ шлифовального станка для его диагностирования. Это объясняется тем, что в процессе функционирования в технически исправном станке при реза-

нии возбуждаются вибрации с достаточно равномерным спектром в диапазоне до 4...5 кГц, т.е. спектр близок с определенным допущением к сигналу типа «белый шум» [5, 10], причем его АКФ является быстро затухающей функцией. Если в процессе эксплуатации в ШУ возникает какой-либо дефект, например, нарушается балансировка шпинделя или наблюдается дефект в элементах подшипников, то амплитуда соответствующих гармоник спектра вибраций увеличивается [8, 9, 14]. Расчет частот вибраций для основных дефектов подшипников приведен в [15]. В этом случае в АКФ наблюдаются незатухающие колебания, т.е. спектр АКФ будет содержать одну или несколько гармонических составляющих с достаточно большой амплитудой, определяемых тем или иным дефектом в подшипнике ШУ.

В нашем случае основной задачей является обнаружение дефектов в ШУ непосредственно при обработке для признания его работоспособным или неработоспособным в зависимости от амплитуды гармоник. Детальный анализ дефектов в отличие от анализа по методике, изложенной в работе [16], выполняется на специальном стенде для диагностирования и испытаний ШУ.

Математическим обоснованием указанного выше служит следующее. При условии, что УС станка возбуждается сигналом типа «белый шум», регистрируемый на ШУ вибросигнал $Y(t)$ будет в простейшем случае какого-либо одного дефекта в подшипнике содержать гармонический сигнал $U(t) = A \sin \omega t$ и стохастический сигнал типа «белый шум» $\xi(t)$:

$$Y(t) = U(t) + \xi(t). \quad (1)$$

Автокорреляционная функция выходного сигнала $K_{yy}(\tau)$ является моментной функцией 2-го порядка [17]

$$K_{yy}(\tau) = M\{[U(t) + \xi(t)][U(t + \tau) + \xi(t + \tau)]\}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$K_{yy}(\tau) = K_{uu}(\tau) + K_{\xi\xi}(\tau) + K_{u\xi}(\tau) + K_{\xi u}(\tau). \quad (3)$$

В последней формуле первые два слагаемых соответствуют АКФ исходных сигналов, а два других слагаемых – взаимокорреляционным функциям исходных сигналов. Известно [17], что АКФ сигнала типа «белый шум» $K_{\xi\xi}(\tau)$ по форме близка к дельта-функции, т.е. быстро затухает, а взаимокорреляционные функции $K_{\xi u}(\tau)$ и $K_{u\xi}(\tau)$ равны нулю, так как корреляция между сигналами $u(t)$ и $\xi(t)$ отсутствует. Исходя из этих соображений при достаточно большой величине τ из формулы (3) следует

$$K_{yy}(\tau) \approx K_{uu}(\tau). \quad (4)$$

Следовательно, результирующая АКФ $K_{yy}(\tau)$ фактически будет АКФ гармонического сигнала, которая, в свою очередь, также является гармониче-

ской с той же частотой, что и исходный сигнал $U(t)$. Последнее утверждение следует из приведенных ниже вычислений.

Регистрируемый сигнал с учетом формулы (1) имеет вид

$$Y(t) = A \sin \omega t + \xi(t). \quad (5)$$

Для вычисления АКФ в формуле (4) используем формулу [15]:

$$K_{uu}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T Y(t) Y(t + \tau) dt. \quad (6)$$

Используя выражение (5) из формулы (6) имеем:

$$K_{uu}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin \omega t \sin \omega(t + \tau) dt. \quad (7)$$

Тогда получаем для регистрируемого сигнала

$$K_{yy}(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega \tau. \quad (8)$$

Если в подшипниках ШУ присутствует несколько дефектов, то регистрируемый ВА сигнал является суммой полигармонического сигнала и сигнала типа «белый шум»:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin \omega_i t + \xi(t), \quad (9)$$

где $A_i \sin \omega_i t$ – гармоника, определяемая i -м дефектом.

В этом случае по аналогии с формулой (8) будем иметь

$$K_{yy}(\tau) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{2} \cos \omega_i \tau, \quad (10)$$

т.е. результирующая АКФ также содержит все гармонические составляющие, что и исходный сигнал.

В качестве экспериментальной иллюстрации на рис. 2,а изображена АКФ ВА колебаний, зарегистрированных на внутришлифовальном станке модели SIW-5 при обработке дорожек качения колец подшипников 42726/01 из стали марки ШХ-15 при следующих значениях режима резания: частота вращения кольца 280 об/мин, частота вращения круга 6200 об/мин, подача круга 0,2 мм/мин. В станке используется бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделей, что исключает появление «зубчатых частот» в спектре колебаний ШУ. Для измерения ВА колебаний при резании использовался виброизмеритель ВШВ-003-М2 с датчиком ДН-3, устанавливавшимся на ШУ инструмента на магнитной опоре. Диапазон фиксируемых частот – до 4 кГц. Далее сигналы с виброизмерителя подавались на компьютер и обрабатывались с помощью программного продукта Matlab.

Из анализа рис. 2,а можно сделать вывод, что в АКФ присутствует периодическая составляющая с частотой 112 Гц, которая соответствует частоте вращения шпинделя инструмента и обусловлена дисбалансом абразивного круга. Это позволяет выявить дефект и его локализовать, т.е. фактически выполнить диагностирование ШУ. После устранения дисбаланса круга АКФ приобрела вид затухающей косинусоиды, изображенной на рис. 2,б. Ее можно использовать для оценки динамического качества станков и выбора режима резания по методике, изложенной в работах [7, 10].

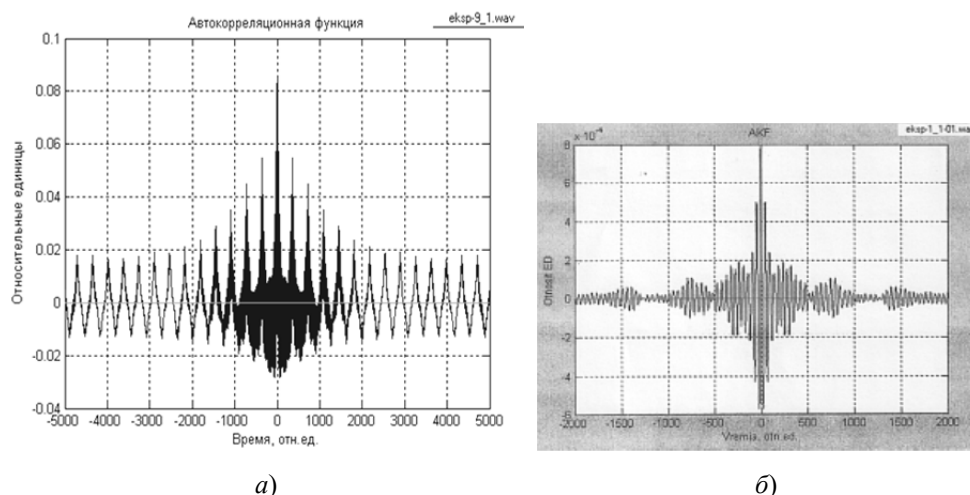


Рис. 2. Автокорреляционные функции при обработке наружных колец подшипников на внутришлифовальном станке SIW-5, где 1отн. ед. времени = $2 \cdot 10^{-5}$ с

Таким образом, проведенный теоретический анализ вибрационных процессов в динамической системе станка показал возможность идентификации дефектов в шпиндельном узле, связанных с дисбалансом абразивного круга и других дефектов в подшипниковых опорах по спектру АКФ виброакустических колебаний. Указанное получило экспериментальное подтверждение при анализе реальных АКФ виброакустических колебаний в динамической системе шлифовального станка SIW-5 при обработке дорожки качения колец подшипников.

Библиографический список

1. Проников, А. С. Программный метод испытания металлорежущих станков / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1985. – 288 с.
2. Расторгуев, Г. А. Системный обзор испытаний технологического оборудования / Г. А. Расторгуев // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. – № 1. – С. 3–10.
3. Бржозовский, Б. М. Диагностика и надежность автоматизированных систем / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. В. Мартынов, А. Г. Схиртладзе. – Саратов : СГТУ, 2007. – 352 с.
4. Аршанский, М. М. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках / М. М. Аршанский, В. П. Щербаков. – М. : Машиностроение, 1988. – 136 с.

5. Бржозовский, Б. М. Оперативный контроль и динамические испытания металло-режущих станков : обзор. информ. / Б. М. Бржозовский, А. А. Игнатьев, В. А. Добрыков, В. В. Мартынов. – М. : ВНИИТЭМР, 1991. – 61 с.
6. Тугенгольд, А. К. Мониторинг состояния станков и станочных систем / А. К. Тугенгольд, В. Р. Димитров, Р. Н. Волошин // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 11–17.
7. Игнатьев, А. А. Стохастические методы идентификации в динамике станков / А. А. Игнатьев, В. А. Каракозова, С. А. Игнатьев. – Саратов : СГТУ, 2013. – 124 с.
8. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
9. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : Сев-запучцентр, 2013. – 152 с.
10. Игнатьев, А. А. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний / А. А. Игнатьев, Е. М. Самойлова, Я. Ш. Шамсадова // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 90–98.
11. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 360 с.
12. Пуш, А. В. Шпиндельные узлы: качество и надежность / А. В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 288 с.
13. Диагностика и мониторинг опор шпиндельных узлов / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, Е. М. Дудко и др. // СТИН. – 2013. – № 6. – С. 2–15.
14. Козочкин, М. П. Виброакустическая диагностика шпиндельных узлов / М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров // СТИН. – 2009. – № 5. – С. 8–12.
15. Бальмонт, В. Б. Вибрация и шум подшипников качения : обзор / В. Б. Бальмонт, О. И. Самохин, Е. Б. Варламов, А. М. Авдеев. – М. : ЦНИИТЭИавтопром, 1987. – 82 с.
16. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Козочкин и др. – М. : Машиностроение, 2011. – 600 с.
17. Мирский, Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Энергоиздат, 1982. – 320 с.

Игнатьев Александр Анатольевич
 доктор технических наук, профессор,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 имени Ю. А. Гагарина
 E-mail: atp@sstu.ru

Ignatyev Alexander Anatolyevich
 doctor of technical sciences, professor,
 sub-department of automation,
 control, mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Добряков Владимир Анатольевич
 кандидат технических наук, доцент,
 кафедра автоматизации, управления,
 мехатроники,
 Саратовский государственный
 технический университет
 имени Ю. А. Гагарина
 E-mail: atp@sstu.ru

Dobryakov Vladimir Anatolyevich
 candidate of technical sciences,
 associate professor,
 sub-department of automation,
 control, mechatronics,
 Saratov State Technical University
 named after Yu. A. Gagarin

Игнатъев Станислав Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: atp@sstu.ru

Ignatyev Stanislav Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of automation,
control, mechatronics,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin

Шамсадова Яха Шаидовна

соискатель,
кафедра автоматизации, управления,
мехатроники,
Саратовский государственный
технический университет
имени Ю. А. Гагарина
E-mail: atp@sstu.ru

Shamsadova Yakha Shaidovna

applicant,
sub-department of automation, control,
mechatronics,
Saratov State Technical University
named after Yu. A. Gagarin

УДК 681.5

Игнатъев, А. А.

Применение автокорреляционных функций виброакустических колебаний в динамической системе станка для выявления дефектов в шпиндельном узле / А. А. Игнатъев, В. А. Добряков, С. А. Игнатъев, Я. Ш. Шамсадова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 122–129.