ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ШПИНДЕЛЬНОМ УЗЛЕ СТАНКА С ПОМОЩЬЮ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

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

ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

СГТУ им. Ю. А. Гагарина, Саратов, Россия

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 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 (ВА) колебаний.

Результаты. Предлагаемая методика обнаружения дефектов в шпиндельном узле шлифовального станка SW-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.

Проблема повышения технологической надежности автоматизированных станков является весьма актуальной для современного производства высокоточных деталей для машино- и приборостроения и служит одним из основных обоснований мониторинга технологического процесса с целью управления качеством изделий в условиях гибкого автоматизированного производства. 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 занимают

динамические испытания, основанные на измерении и анализе виброакустических (ВА) колебаний основных формообразующих 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

Рис. 1. Модифицированная схема эквивалентной динамической системы шлифовального станка

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).

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, оборотной 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 резании возбуждаются вибрации с достаточно равномерным спектром в диапазоне до 4...5 кГц, то есть 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]. Расчёт частот вибраций для основных дефектов подшипников приведён в [15]. В этом случае в АКФ наблюдаются незатухающие колебания, то есть 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, то есть 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 гармонической с той же частотой, что и исходный сигнал $U(t)$. Последнее утверждение следует из приведенных ниже вычислений.

Регистрируемый сигнал, учитывая формулу (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

а

б

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

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:

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

то есть результирующая АКФ также содержит все гармонические составляющие, что и исходный сигнал.

В качестве экспериментальной иллюстрации изложенного на рис. 2а изображена АКФ ВА колебаний, зарегистрированных на внутришлифовальном станке модели SIW-5 при обработке дорожек качения колец подшипников 42726/01 из стали 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. 2а 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, то есть фактически выполнить диагностирование ШУ. После устранения дисбаланса круга АКФ приобрела вид затухающей косинусоиды, изображенный на рис. 2б. Её можно использовать для оценки динамического качества станков и выбора режима резания по методике, изложенной в работах [7, 10].

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
2. Расторгуев Г.А. Системный обзор испытаний технологического оборудования // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 1. С. 3-10.
3. Диагностика и надежность автоматизированных систем / Б.М. Бржозовский, А. А, Игнатъев, В. В, Мартынов, А.Г. Схиртладзе. Саратов: СГТУ, 2007. 352 с.
4. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.
5. Оперативный контроль и динамические испытания металлорежущих станков: обзор. информ. / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 61 с.
6. Тугенгольд А.К., Димитров В.Р., Волошин Р.Н. Мониторинг состояния станков и станочных систем // СТИН. 2017. № 3. С. 11-17.
7. Игнатъев А.А., Каракозова В.А., Игнатъев С.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
8. Добрынин С.А., Фельдман М.С., Фирсов Г.И. Методы автоматизированного исследования вибрации машин. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудование. Анализ вибрации. СПб.: Севзапучцентр, 2013. 152 с.
10. Игнатъев А.А., Самойлова Е.М., Шамсадова Я.Ш. Оценка динамического качества станков с применением автокорреляционных функций виброакустических колебаний // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. №2. С. 90-98.
11. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
12. Пуш А.В. 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., Сабиров Ф.С. Виброакустическая диагностика шпиндельных узлов // СТИН. 2009. № 5. С. 8-12.
15. 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. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.

DETECTION OF DEFECTS IN SPINDLE ASSEMBLY OF MACHINE USING AUTOCORRELATION FUNCTIONS OF VIBRATION-ACOUSTIC OSCILLATIONS

© Ya. Sh. Shamsadova, A. A. Ignatiev, V. A. Dobryakov

GSOTU named after acad. M. D. Millionschikov, Grozny, Russia

SSTU named after Yu. A. Gagarina, Saratov, Russia.

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 spindle 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.

Keywords: the automated machine, dynamic system, vibroacoustic vibrations, autocorrelated function, a spindle unit, identification of defects.

REFERENCES

1. Pronikov, A. S. (1985) Programmnyi metod ispytaniya metallovezhushchikh stankov. [Software testing method for metal cutting machines]. M.: Engineering. p. 288.
2. Rastorguev, G. A. (2013) 'Sistemnyi obzor ispytaniy tekhnologicheskogo oborudovaniya'. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. [Systematic review of technological equipment tests // Reference. *Engineering Journal*]. № 1. pp. 3-10.
3. Brzhozovskii, B. M., Ignat'ev, A. A., Martynov, V. V., and Skhirtladze, A. G. (2007) Diagnostika i nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem. [Diagnostics and reliability of automated systems]. Saratov: SGTU. p. 352.
4. Arshanskii M.M. and Shcherbakov V.P. (1988) Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'yu na metallovezhushchikh stankakh. [Vibrodiagnostics and precision control on metal cutting machines]. M.: Mashinostroenie. p. 136.
5. Brzhozovskii, B. M., Ignat'ev, A. A., Dobryakov, V. A. and Martynov, V. V. (1991) Operativnyi kontrol' i dinamicheskie ispytaniya metallovezhushchikh stankov: obzor. inform. [Operational control and dynamic testing of metal cutting machines: a review. Inform]. M.: VNIITEMR. p. 61.
6. Tugengol'd, A. K., Dimitrov, V. R. and Voloshin, R. N. (2017) Monitoring sostoyaniya stankov i stanochnykh sistem. *STIN*. [Monitoring the status of machine tools and machine systems. *STIN*]. № 3. pp. 11-17.
7. Ignat'ev, A. A., Karakozova, V. A. and Ignat'ev, S. A. (2013) Stokhasticheskie metody identifikatsii v dinamike stankov. [Stochastic methods of identification in the dynamics of machine tools]. Saratov: SGTU. p. 124.
8. Dobrynin, S. A., Fel'dman, M. S. and Firsov, G. I. (1987) Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin. [Methods of automated vibration studies of machines]. M.: Mashinostroenie. p. 224.

9. Barkov, A. V. and Barkova, N. A. (2013) Vibratsionnaya diagnostika mashin i oborudovanie. Analiz vibratsii. [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. SPb. Sevzapuchtsentr. p. 152.
10. Ignat'ev, A. A., Samoilova, E. M. and Shamsadova, Ya. Sh. (2017) Otsenka dinamicheskogo kachestva stankov s primeneniem avtokorrelyatsionnykh funktsii vibroakusticheskikh kolebaniy. *Izvestiya vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*. [Assessment of the dynamic quality of machine tools using the autocorrelation functions of vibroacoustic vibrations. News of Universities. Volga region. Technical science]. №2. pp. 90-98.
11. Kudinov, V. A. (1967) Dinamika stankov. *Mashinostroenie*. [Machine dynamics. Engineering] M.: p. 360.
12. Push, A. V. Shpindel'nye uzly: kachestvo i nadezhnost'. *Mashinostroenie*. [Spindle units: quality and reliability. Engineering.] M, 1992. p. 288.
13. Kozochkin, M. P., Sabirov, F. S., Dudko, E. M. and others. 'Diagnostika i monitoring opor shpindel'nykh uzlov'. [Diagnostics and monitoring of supports of spindle units]. *STIN*. 2013. №6. pp. 2-15.
14. Kozochkin, M. P. and Sabirov, F. S. (2009) 'Vibroakusticheskaya diagnostika shpindel'nykh uzlov.' [Vibroacoustic diagnostics of spindle units]. *STIN*. №5. Pp. 8-12.
15. Bal'mont, V. B., Samokhin, O. I., Varlamov, E. B. and Avdeev, A. M. (1987) Vibratsiya i shum podshipnikov kacheniya: obzor [Vibration and noise of rolling bearings: an overview]. M.: TsNIITEIavtoprom. 82 p.
16. Grigor'ev, S. N., Gurin V. D., Kozochkin, M. P. and others. (2011) Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva. *Mashinostroenie*. [Automated production diagnostics. Engineering]. M.: 600 p.
17. Mirskii, G. Ya. (1982) Kharakteristiki stokhasticheskoi vzaimosvyazi i ikh izmereniya. M.: Energoizdat. [Characteristics of stochastic interconnection and their measurement. M.: Energy Publishing House]. 320 p.