

УДК 621.9.06. – 233.1

Данильченко Ю.М., д.т.н.; Петришин А.И.

НТУУ «Киевский политехнический институт» г. Киев, Украина

ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СБОРКИ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ

Danylchenko Yu., Petryshyn A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

DIAGNOSTIC OF MANUFACTURING AND ASSEMBLING FAULTS OF SPINDLE UNITS ON ROLLING BEARINGS

Разработан резонансный метод, позволяющий диагностировать дефекты изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения, вызывающие низкочастотные вибрации. Метод базируется на проведении экспериментальных и теоретических исследований динамического поведения шпиндельного узла, закрепленного на специальном стенде. Стенд состоит из упруго закрепленной на массивном основании рамы, на которой крепится шпиндельный узел. Суть метода состоит в определении величины колебаний шпинделя относительно корпуса шпиндельного узла при резонансе рамы стенда на характерных частотах дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов. Экспериментальная часть метода состоит в определении первой собственной частоты рамы стенда и измерении вибраций корпуса на частотах вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы стенда на характерных частотах дефектов. Теоретическая часть состоит в моделировании спектров вибраций конца закрепленной в шпинделе оправки, соответствующих экспериментальным спектрам вибраций корпуса шпиндельного узла с последующим определением амплитуд относительных колебаний оправки на характерных частотах дефектов. Приведены результаты вибродиагностики дефектов изготовления и сборки шлифовальной головки мод. ВСЗ 27-65.250 А.

Ключевые слова: шпиндельный узел, дефекты изготовления и сборки, резонансный метод вибродиагностики

Введение

Наиболее действенными методами оценки технического состояния роторных машин, в том числе и шпиндельных узлов, являются методы вибродиагностики.

Преимущества этих методов объясняются достаточно высокой степенью детерминированности механических вибраций по частотному составу, что позволяет с достаточной степенью уверенности идентифицировать их причины и источники.

Так в спектре вибраций ротора, смонтированного на подшипниках качения, можно выделить 4 основные области, которые характеризуют [1]: 1) наличие и величину дисбаланса (вибрации с частотой, равной частоте вращения ротора); 2) перекос подшипников опор вследствие дефектов сборки или восприятия ротором внешних нагрузок (вибрации с частотой, равной двукратной частоте вращения ротора); 3) качество привода вращения (вибрации на характерных частотах приводного механизма); 4) дефекты изготовления дорожек и тел качения (так называемые «подшипниковые вибрации», связанные с частотами, определяемыми кинематикой подшипников).

Системы вибродиагностики шпиндельных узлов современных металлорежущих станков, прежде всего, направлены на диагностику технического состояния их подшипниковых узлов [2, 3].

При этом отмечается, что при оценке уровня вибраций на характерных частотах нельзя забывать, что в шпиндельном узле происходит сложное взаимодействие вынуждающих сил в подшипнике с собственными частотами всего узла [2].

Но именно это свойство шпиндельного узла может быть использовано для обнаружения зарождающихся дефектов подшипников качения его опор [3]. Для этого необходимо, чтобы частоты ударных импульсов, возникающих при периодическом попадании дефектов элементов подшипника в зону контакта, совпадали с одной и той же резонансной частотой механической системы.

В свою очередь, необходимо отметить, что резонансные частоты шпиндельных узлов имеют достаточно высокие значения. Например, для вертикально-фрезерного станка [4] первая собственная частота шпиндельной бабки равна 315 Гц, а шпинделя – 1410 Гц. Такие значения собственных частот не позволяют непосредственно на станке использовать резонансный метод для диагностики погрешностей, вызывающих низкочастотные вибрации.

Но для этого можно использовать специальные стенды, с достаточно низкими собственными частотами несущих элементов. Использование такого стенда [5] и положено в основу разработки резонансного метода

вибродіагностики дефектів виготовлення і сборки шпindelних вузлів на опорах качення в низькочастотній області.

Цель

Целью роботи являється розробка резонансного методу, дозволяючого діагностувати дефекти виготовлення і сборки шпindelних вузлів на опорах качення, викликаючі низькочастотні вібрації.

Описание резонансного метода диагностики дефектов изготовления и сборки шпindelных узлов на опорах качення.

Розроблюваний метод базується на проведенні експериментальних і теоретических досліджень динамічного поведіння шпindelного вузла, закріпленого на експериментальному стенді.

Експериментальний стенд [5], представляє собою раму 1, упрugo закріплену на масивному основанні 2, з можливістю кутового повороту в вертикальній площині (рис. 1). На рамі 1 закріплюється шліфувальна головка 3 з оправкою 4. Кутова жорсткість рами регулюється за рахунок змінення жорсткості пружини розтягнення 5, замість якої може встановлюватися жорсткий стержень. За рахунок регулювання кугової жорсткості рами, можна змінювати значення її першої власної частоти в діапазоні 5-37 Гц.

Ісследуються шліфувальна головка мод. ВСЗ 27-65.250 А.3. Вона має корпус гильзового виконання, в якому на дуалексированих радіально-упорних шарикових підшипниках смонтований шпindel.

Ізмерення вібрації на стенді проводилось з використанням пьезоелектрического датчика мод. РСВ 353В15 і передувилителя РСВ 480Е09. Сигнал реєструвався з допомогою АЦП NI USB-9215 і оброблявся в Matlab.

При теоретических дослідженнях [5] стенд со шліфувальною головкою розглядається як механіческа колебательна система, состоящая из четырех подсистем: оправки, шпинделя, гильзового корпуса і рами (рис. 2).

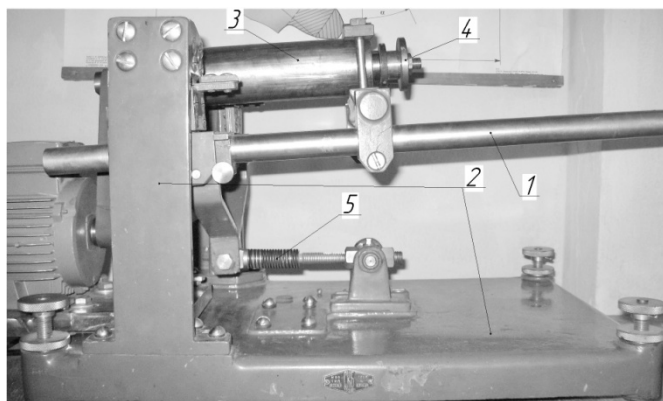


Рис. 1. Експериментальний стенд: 1 – рама; 2 – основанье; 3 – шпindelний вузол; 4 – оправка; 5 – пружина розтягнення

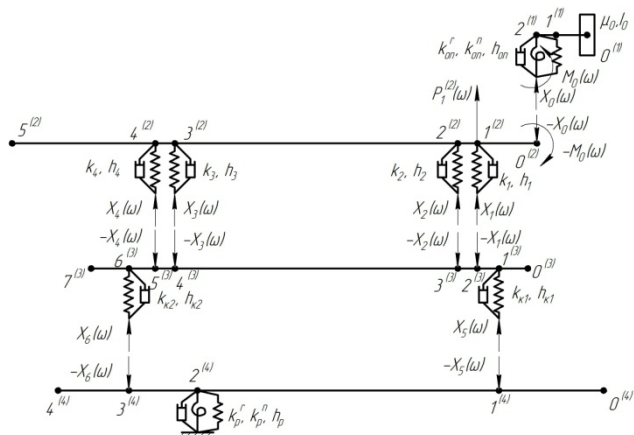


Рис. 2. Расчетные схемы парциальных подсистем механіческой колебательной системы «стенд»

Експериментальна часть метода предусматривает:

- определение первой собственной частоты рамы стенда;
- определение частот вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы на характерных частотах дефектов изготовления и сборки шпindelных узлов;
- измерение вибраций гильзы шпинделя на этих частотах вращения.

Первая собственная частота рамы определяется по спектру ее колебаний, полученному при импульсном возмущении, приложенном к концу рамы. Пьезоелектрический датчик устанавливается на раме. Экспериментально полученное значение первой собственной частоты рамы $P_1 = 33 \text{ Гц}$.

Характерные частоты дефектов и соответствующие им частоты вращения шпинделя приведены в таблице.

Теоретическая часть метода предусматривает:

- моделирование спектров вибраций конца закріпленной в шпинделе оправки, соответствующих экспериментальным спектрам вибраций гильзы шпинделя;
- расчет спектров колебаний закріпленной в шпинделе оправки относительно гильзы;
- определение амплитуд относительных колебаний оправки на характерных частотах дефектов изготовления и сборки шпindelных узлов.

Для моделирования спектров вибраций конца закріпленной в шпинделе оправки, используется метод расчета колебаний шпинделя по результатам измерения колебаний корпуса шпindelного узла [5] с использованием расчетной функции соответствия $W(\omega)$, характеризующей соотношение амплитуд колебаний в точках расчета и измерения (рис.2):

$$W(\omega) = \frac{q_0^{(1)}(\omega)}{q_2^{(3)}(\omega)}. \quad (1)$$

где $q_0^{(1)}(\omega)$ и $q_2^{(3)}(\omega)$ - функции амплитуд перемещения точек $0^{(1)}$ (оправки) и $2^{(3)}$ (корпуса шпиндельного узла) от действия единичного гармонического возмущения, приложенного к шпинделю в месте расположения первого подшипника передней опоры (точка $1^{(2)}$).

Эти функции, по сути, являются локальными динамическими податливостями оправки и гильзы шпинделя и рассчитываются по зависимостям [5].

Основные частоты дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения

№	Частоты дефектов	Расчетная формула	Частота вращения шпинделя f_o , при которых частота дефекта равна P_1 , Гц
1	Частота вращения шпинделя	$f_o = n / 60$	$f_o = 33$
2	Вторая гармоника частоты вращения шпинделя	$2f_o$	$f_o = 16.5$
3	Третья гармоника частоты вращения шпинделя	$3f_o$	$f_o = 11$
2	Частота вращения сепаратора	$f_c = \frac{1}{2} \cdot f_o \cdot \left(1 - \frac{d_{ш}}{d_c} \cdot \cos \alpha\right)$	$f_o = 85.77$
3	Частота перекачивания тел качения по наружному кольцу	$f_n = f_c \cdot z$	$f_o = 9.55$
4	Частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу	$f_s = (f_o - f_c) \cdot z$	$f_o = 5.96$
5	Частота вращения шариков относительно собственной оси	$f_{ш} = \frac{1}{2} \cdot f_o \cdot \frac{d_c}{d_{ш}} \cdot \left(1 - \frac{d_{ш}^2}{d_c^2} \cdot \cos^2 \alpha\right)$	$f_o = 16.1$
Примечание: n – частота вращения шпинделя, об/мин; $d_{ш}$ – диаметр шариков, мм; z – количество шариков; d_c – средний диаметр подшипника, мм; α – угол контакта подшипника; P_1 – первая собственная частота рамы станда.			

Расчет спектров вибраций конца закрепленной в шпинделе оправки по соответствующим экспериментальным спектрам вибраций гильзы шпинделя, проводится по зависимости:

$$A_0^{(1)}(\omega_i) = A_2^{(3)}(\omega_i) \cdot W(\omega_i) \quad (2)$$

где $A_0^{(1)}(\omega_i)$ и $A_2^{(3)}(\omega_i)$ - амплитуды i -х спектральных составляющих вибраций оправки и гильзы шпинделя.

Необходимо отметить, что оба спектра являются спектрами абсолютных колебаний. Спектр колебания конца закрепленной в шпинделе оправки относительно гильзы шпинделя получается путем векторного вычитания соответствующих спектральных составляющих спектров абсолютных колебаний.

Результаты процедуры теоретического определения спектров колебания оправки относительно гильзы шпинделя, представлены на рис. 3-6.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики локальных динамических податливостей оправки $q_0^{(1)}(\omega)$ и гильзы шпинделя $q_2^{(3)}(\omega)$. На рис. 4 представлена амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики функции соответствия $W(\omega)$. На рис. 5 представлен экспериментально полученный спектр вибраций гильзы шпинделя и соответствующий ему расчетный спектр вибраций оправки. На рис. 6 представлены расчетные спектры относительных колебаний конца оправки для частот вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы на характерных частотах дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов.

Как видно из рис. 3, в низкочастотном диапазоне (до 70 Гц) находятся две резонансные зоны, соответствующие первой $P_1 = 33$ Гц и второй $P_2 = 334,5$ Гц собственным частотам рамы станда. При этом функция соответствия $W(\omega)$ (рис. 4) представляет собой практически линейную зависимость, что означает, что характер абсолютных колебаний и гильзы шпинделя и оправки определяется колебаниями рамы. Это подтверждается и подобием экспериментального спектра вибраций гильзы шпинделя и соответствующего ему расчетного спектра вибраций оправки (рис. 5).

Из расчетных спектров относительных колебаний конца оправки (рис. 6) можно сделать такие выводы:
 - в нерезонансном режиме на низких частотах вращения шпинделя влияние дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов на формирование спектра вибраций оправки не наблюдается (рис. 6, а);

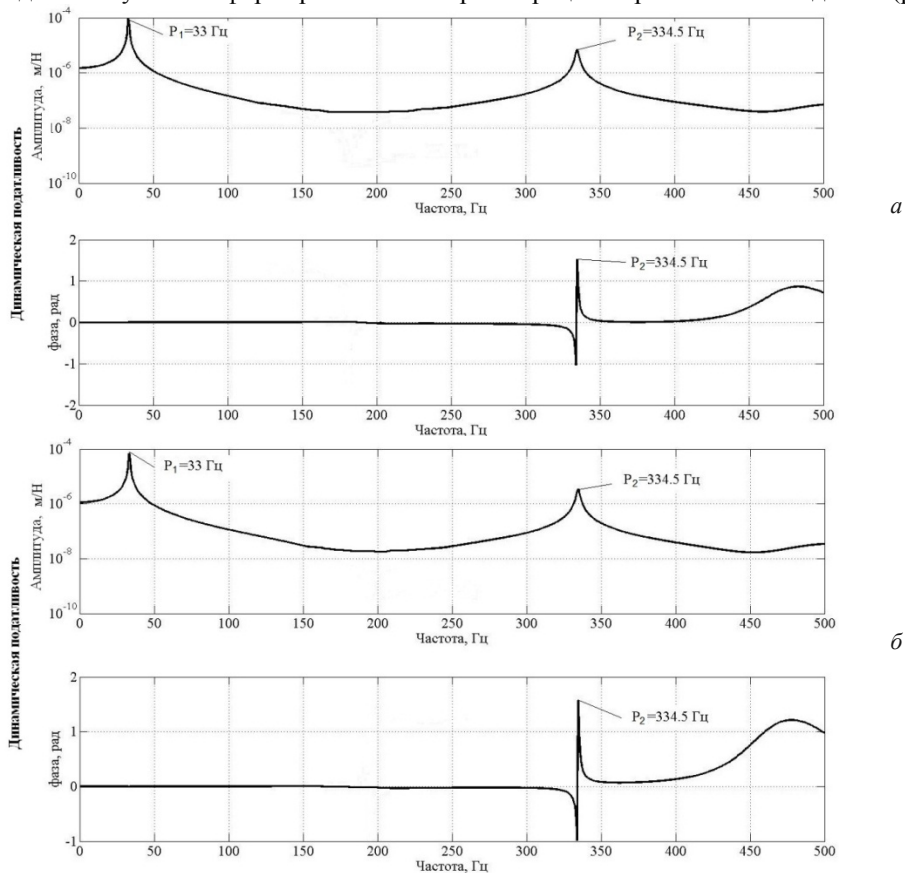


Рис. 3. Локальные динамические податливости: а) оправки $q_0^{(1)}(\omega)$; б) гильзы шпинделя $q_2^{(3)}(\omega)$

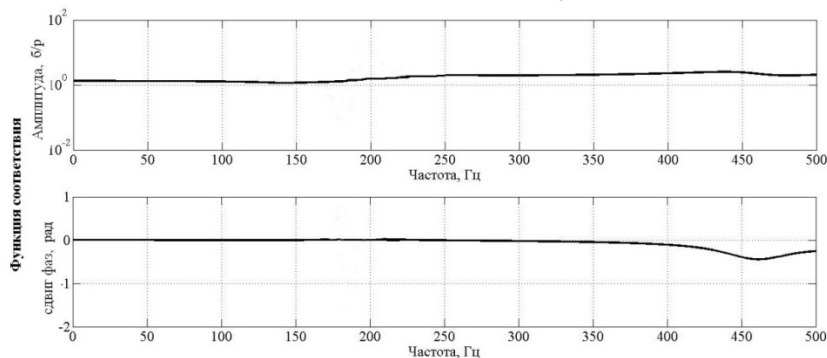


Рис. 4. Функция соответствия $W(\omega)$

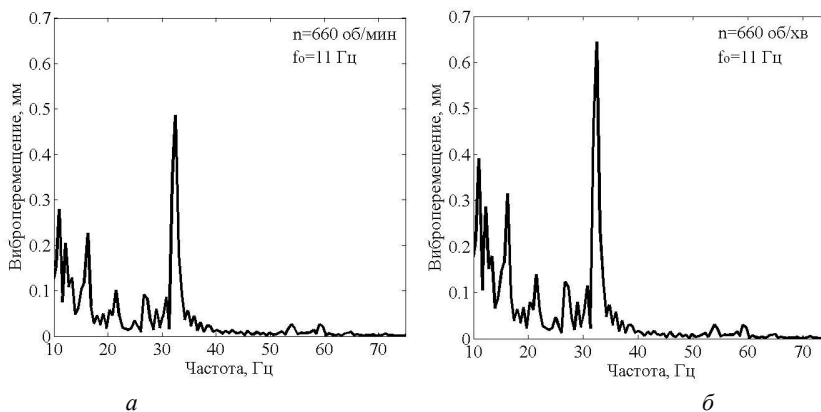


Рис. 5. Экспериментальный спектр вибраций гильзы (а) и расчетный спектр вибраций конца оправки (б)

- высокие амплитуды резонансных колебаний на первой f_0 (рис. 6, е), второй $2f_0$ (рис. 6, д) и третьей $3f_0$ (рис. 6, г) гармониках частоты вращения шпинделя свидетельствуют о наличии существенного дисбаланса шпинделя и несоосности посадочных мест подшипников опор [6, 7].

- высокая амплитуда резонансных колебаний на частоте перекатывания тел качения по наружному кольцу f_H свидетельствуют о наличии существенного дефекта на наружном кольце подшипника (рис. 6, в);

- существенных дефектов на внутреннем кольце подшипника не наблюдается (рис. 6, б).

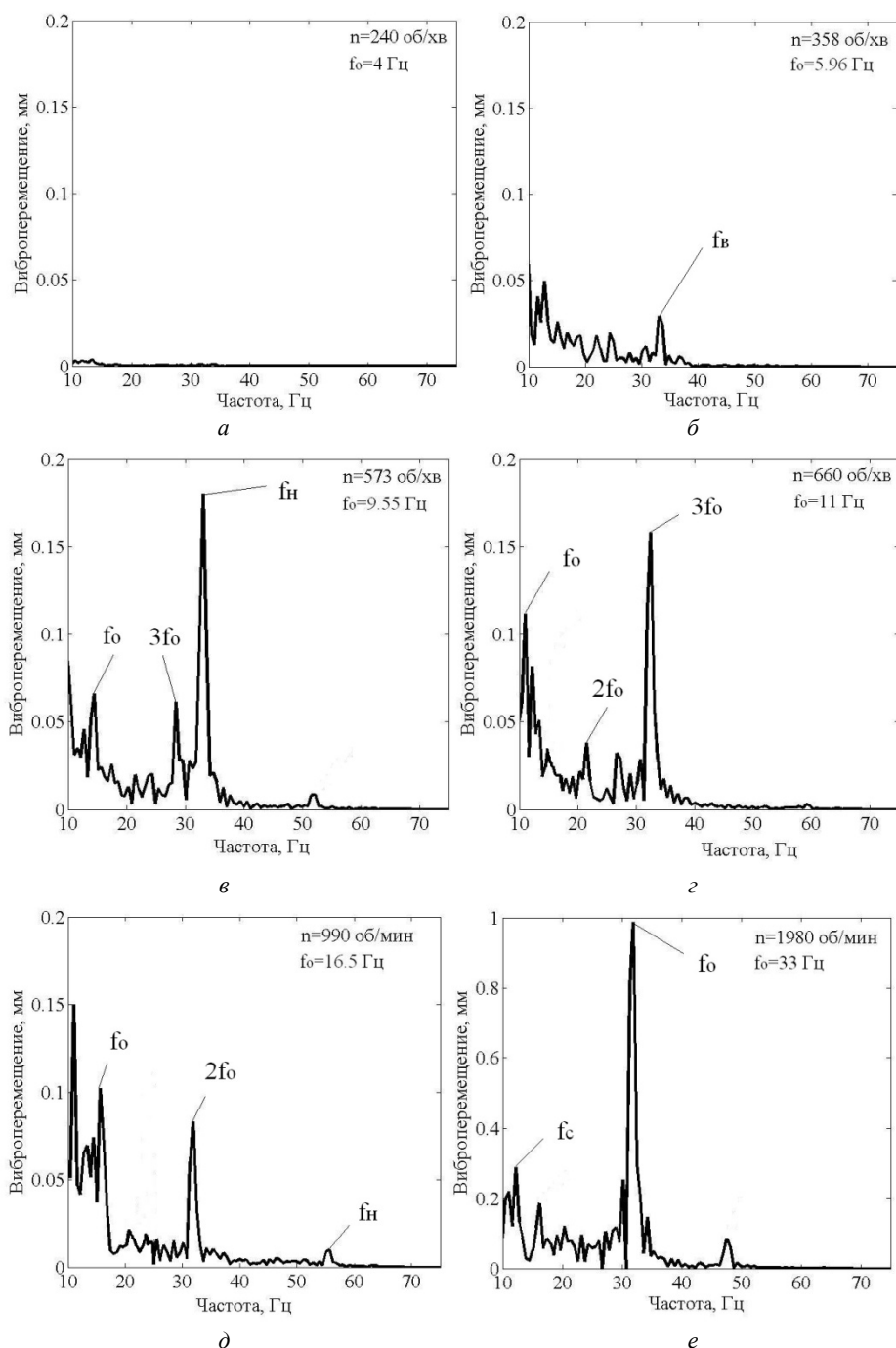


Рис. 6. Расчетные спектры относительных колебаний конца оправки для частот вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы на характерных частотах дефектов: а) нерезонансный режим; б) f_B ; в) f_H ; г) $3 \cdot f_0$; д) $2 \cdot f_0$; е) f_0

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о высокой информативности и перспективности применения разработанного метода для диагностики дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения, вызывающих низкочастотные вибрации.

Выводы

1. Разработанный резонансный метод, позволяет диагностировать дефекты изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения, вызывающие низкочастотные вибрации и может успешно применяться для диагностики низкооборотных шпиндельных узлов.

2. Теоретически определенные спектры колебания конца оправки относительно гильзы шпинделя могут быть использованы для расчета показателей точности шпиндельных узлов в рабочем диапазоне частот вращения шпинделя.

Анотація. Розроблено резонансний метод, який дозволяє діагностувати дефекти виготовлення і збирання шпиндельних вузлів на опорах кочення, що викликають низькочастотні вібрації. Метод базується на проведенні експериментальних і теоретичних досліджень динамічної поведінки шпиндельного вузла, закріпленого на спеціальному стенді. Стенд складається з пружно закріпленої на масивній основі рами, на якій кріпиться шпиндельний вузол. Сутність методу полягає у визначенні величини коливань шпинделя відносно корпусу шпиндельного вузла при резонансі рами стенда на характерних частотах дефектів виготовлення і збирання шпиндельних вузлів. Експериментальна частина методу полягає у визначенні першої власної частоти рами стенда і вимірюванні вібрацій корпусу на частотах обертання шпинделя, що відповідають резонансам рами стенда на характерних частотах дефектів. Теоретична частина полягає у моделюванні спектрів вібрацій кінця закріпленої у шпинделі оправки, що відповідають експериментальним спектрам вібрацій корпусу шпиндельного вузла за наступним визначенням амплітуд відносних коливань оправки на характерних частотах дефектів. Наведені результати вібродіагностики дефектів виготовлення і збирання шліфувальної головки мод. ВС3 27-65.250 А.

Ключові слова: шпиндельний вузол, дефекти виготовлення і збирання, резонансний метод вібродіагностики

Abstract. Purpose. Has been developed resonance method, which allows diagnostic of the manufacturing and assembling faults of spindle units on rolling bearings, which cause low frequency vibrations.

Design/Methodology/Approach. Method is based on carrying out experimental and theoretical researches of the dynamic behavior of spindle unit that mounted on test rig. Test rig consists of frame, elastically fixed on massive foundation, and spindle unit, which is attached to frame. The essence of the method is estimation of spindle unit vibration magnitude relative to spindle unit body during resonance mode of the frame on characteristic frequencies of manufacturing and assembling faults of spindle units. Experimental part of the method consists of determination of the first resonance frequency of the test rig's frame and measurement of spindle unit body vibrations on spindle unit rotating frequencies that represent resonance modes of the frame on faults characteristic frequencies. Theoretical part consists of modeling of vibration spectrums of the end of tool fixed in spindle unit, which are relative to experimental vibration spectrums of the spindle unit body, with following determination of spindle unit comparative vibration magnitudes on faults characteristic frequencies.

Findings. Results of the vibration-based diagnostic of manufacturing and assembling faults of grinding head BC3 27-65.250 A confirms the effectiveness of developed method for diagnostic of the faults, which cause low-frequency vibrations.

Originality/value. The most promising is usage of developed method for diagnostic of the manufacturing and assembling faults of low-speed spindle units.

Keywords: spindle unit, manufacturing and assembling faults, resonance method of vibration-based diagnostic

Библиографический список использованной литературы

1. *Advanced Spectral Analysis* / http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Advanced_Spectral_Analysis.pdf
2. Козочкин М.П. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами / М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров // Вестник УГАТУ – Уфа : УГАТУ, 2009, Т. 13, № 1 (34). – С. 133–137.
3. Денисенко А.Ф. Анализ вибрационных характеристик подшипниковых опор шпиндельного узла / А.Ф. Денисенко, Э.С. Гаспаров // Вестник Самарского ГТУ. Серия Технические науки. 2012. № 2 (34) – С.103- 108.
4. Jui P. Hung Prediction of the Dynamic Characteristics of a Milling Machine Using the Integrated Model of Machine Frame and Spindle Unit / Jui P. Hung, Yuan L. Lai, Tzuo L. Luo and Hsi H. Hsiao // World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:6 2012-07-21. – pp. 626-632.
5. Данильченко Ю.М. Идентификации колебаний шпинделя по результатам измерения вибраций корпуса шпиндельного узла / Ю.М. Данильченко, А.И. Петришин // Вестник НТУУ «КПИ», серия Машиностроение. – 2014. - №71. - С.147-152.
6. *Неразрушающий контроль*. Справочник в 7 томах под редакцией чл. -корр РАН В. В. Клюева. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика // Балицкий Ф. А., Барков А. В., Баркова Н. А., Васильева Р. В., Гольдин А. С., Зусман А. В., Соколова А. Г., Ширман А. Р., Якубович В. А. М.: Машиностроение, 2005 – 830 с.
7. *Диагностические признаки и виды дефектов промышленного оборудования* / <http://baltech.com.ua/catalog.php?catalog=166>

References

1. *Advanced Spectral Analysis*, Available at: http://www.pdma.com/pdfs/Articles/Advanced_Spectral_Analysis.pdf
2. M.P. Kozochkin, F.S. Sabirov, Vestnik UGATU, Ufa: UGATU, 2009, T. 13, No 1 (34). P. 133–137.
3. A.F. Denisenko, Je.S. Gasparov, Vestnik Samarskogo GTU. Serija Tehnicheskie nauki. 2012. No 2 (34). P.103- 108.
4. Jui P. Hung, Yuan L. Lai, Tzuo L. Luo and Hsi H. Hsiao World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol:6 2012-07-21. pp. 626-632.
5. Ju.M. Danylchenko, A.I. Petrishin, Vestnik NTUU «KPI», ser. Mashinostroenie. 2014. No 71. P.147-152.
6. Balickij F.A., Barkov A. V., Barkova N. A., Vasil'eva R. V., Gol'din A. S., Zusman A. V., Sokolova A. G., Shirman A. R., Jakubovich V. A. Nerazrushajushhij kontrol'. Spravochnik v 7 tomah pod redakciej chl. -korr RAN V. V. Kljueva. Tom 7. Kniga 2. Vibrodiagnostika [Nondestructive check, Vol. 7, Book 2, Vibration-based diagnostic]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 830 p.
7. *Diagnosticheskie priznaki i vidy defektov promyshlennogo oborudovaniya*, Available at: <http://baltech.com.ua/catalog.php?catalog=166>