



УДК 621.783:621.9.048

© *М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, В. М. Давыдов, В. В. Заев,  
А. В. Никитенко, Д. Д. Якуба, 2013*

## МОНИТОРИНГ ОПОР ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

*Козочкин М. П.* – д-р техн. наук, проф.; *Сабиров В. М.* – д-р техн. наук (МГТУ Станкин); *Давыдов В. М.* – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ТИИС, e – mail: davellut@mail.ru; *Заев В. В.* – канд. техн. наук, доцент каф. КПСМ; *Никитенко А. В.* – канд. техн. наук, старший преподаватель каф. ТИИС, e – mail: a.v.nikitenko@mail.ru; *Якуба Д. Д.* – преподаватель каф. ТИИС, e – mail: dimondimonich@rambler.ru (ТОГУ)

Состояние опор шпиндельных узлов во многом определяет качество функционирования технологического оборудования [1]. Однако необходимо обращать внимание на тот факт, что зарождающиеся дефекты в опорах появляются несколько раньше по сравнению с началом проявления несоответствий в качестве функционирования технологического комплекса. В шпиндельном узле работа отдельных опор оказывает в большей или меньшей степени влияние на работу соседних подшипников. Развитие дефекта одного подшипника или его неправильная установка при сборке могут привести к инициации развития дефектов и в других опорах. В результате, вместо мелкого ремонта может потребоваться замена шпиндельного узла, связанная с простоями и дополнительными расходами.

State support spindles largely determines the quality of operation of process equipment. However, you must pay attention to the fact that the incipient defects in bearings appear somewhat earlier than at the beginning of manifestation inconsistencies as functioning technological complex. In the spindle poles separate work site has more or less impact on the operation of adjacent bearings. The development of a bearing defect or incorrect installation of the assembly may result in the initiation of defects and other supports. As a result, instead of minor repairs may require the replacement of spindle assembly associated with delays and additional costs.

*Ключевые слова:* шпиндельный узел, подшипник, мониторинг, опора, кинематическое возмущение, виброакустическая диагностика.

Методики виброакустической (ВА) диагностики состояния подшипников давно приняты на вооружение и широко распространены в про-

мышленно развитых странах. Условия реализации этих методик и нормативы на регистрируемые параметры закреплены в соответствующих стандартах. Промышленность выпускает станды, предназначенные для закрепления и обкатки подшипников со стандартными угловыми скоростями и со стандартными усилиями осевого натяга, и приборы для контроля параметров ВА сигналов, по которым можно судить о состоянии тел качения, подшипниковых колец и сепаратора [2].

Сложность заключается в том, что удовлетворительные характеристики подшипника, полученные на стенде, не гарантируют стабильности его работы после встройки, например, в шпиндельный узел. Многое определяется конструкцией узла, качеством изготовления его элементов и технологией сборки. В настоящее время сборка высокоскоростных шпиндельных узлов проводится в термостатированных помещениях по строго определенной методике со строгим контролем отклонений отдельных деталей от заданной геометрии. После сборки шпиндель подвергается многочасовой обкатке на специальном стенде с регистрацией температуры в нескольких точках узла и момента сопротивления вращению.

Пока не везде контролируют вибрации, но многим понятно, что это делать необходимо, поскольку перечисленных мероприятий может оказаться недостаточно при создании шпинделей и мотор-шпинделей со скоростями вращения более 15 000 об/мин. Здесь может быть полезным и даже необходимым применение существующих и новых методик ВА диагностики, позволяющих значительно глубже по сравнению с температурой проникать в сущность процессов, протекающих в опорах шпиндельных узлов при холостом вращении, при работе под нагрузкой, при повышении температуры [3].

В качестве примера предлагается рассмотреть результаты исследований 2-х одинаковых шлифовальных шпинделей на подшипниках качения. На рис. 1 показаны спектры ВА сигналов, снимаемых в радиальном направлении с помощью 2-х акселерометров.

На рис. 1, *а* показан спектр виброускорений шлифовального шпинделя № 1, который после часовой обкатки на 9 000 об/мин имел температуру нагрева корпуса в месте установки передних подшипников на 15 градусов ниже по сравнению с таким же шпинделем № 2, спектр виброускорения которого приведен на рис. 1, *б*. Из этих спектров видно, что у шпинделя № 2 резко повышена амплитуда составляющих в районе 4,5 кГц. Это говорит о более интенсивном фрикционном взаимодействии подшипниковых колец и тел качения в шпинделе № 2.

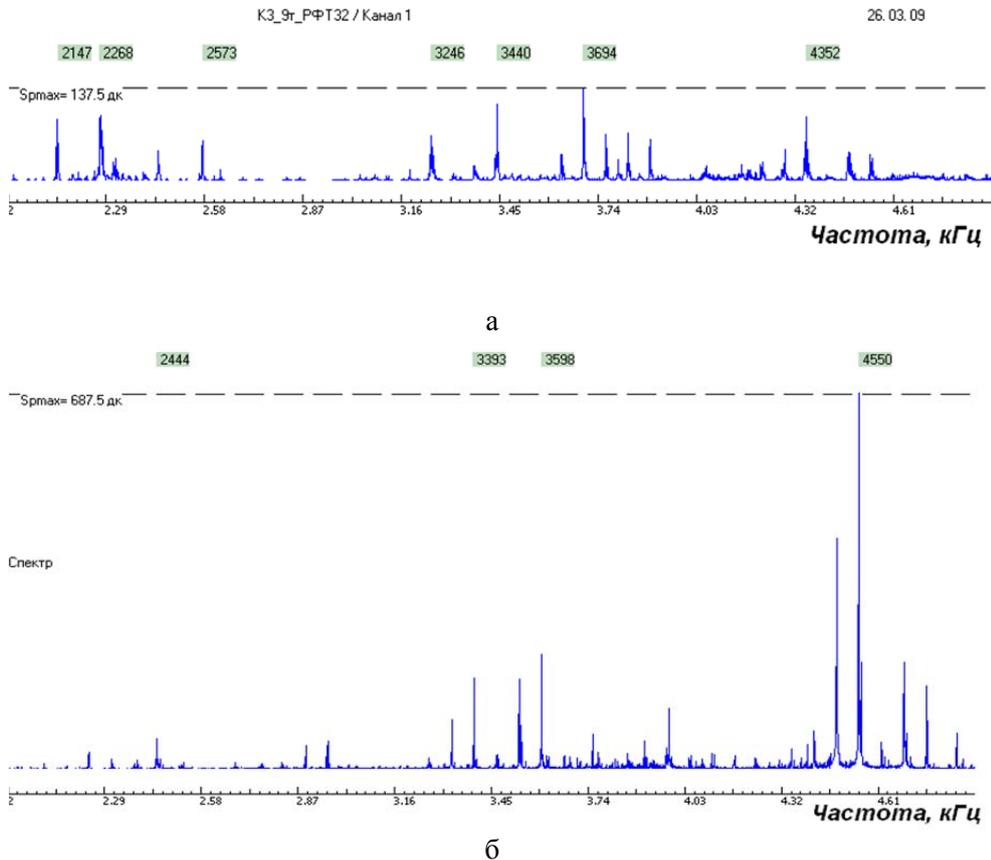


Рис. 1. Спектры виброускорений в радиальном направлении корпуса шпинделя при частоте 9000 об/мин: а - шпиндель № 1; б - шпиндель № 2.

Основным недостатком линейных спектров, подобных показанным на рис. 1, является большое число составляющих, которые трудно идентифицировать в соответствии с кинематикой подшипника [4]. Для повышения эффективности спектрального анализа ВА сигналов, поступающих от опор шпинделя, чаще приходится прибегать к выделению высокочастотного ВА сигнала и спектральному анализу контура (огибающей) этого сигнала [1, 5]. В качестве огибающей могут использоваться последовательные максимумы ВА сигнала или временная зависимость эффективных значений высокочастотной составляющей ВА сигнала. Однако основная проблема заключается в том, чтобы идентифицировать дефект до такого уровня, который позволит в дальнейшем без разборки узлов определять необходимый объем корректирующих мероприятий. На начальной фазе внедрения методов ВА диагностики это сложная проблема, поскольку содержащаяся в литературных источниках информация не позволяет точно указать, на что необходимо обратить внима-

ние в технологии сборки шпиндельных узлов для исключения в дальнейшем возникающих несоответствий. В связи с этим необходимо использовать каждую возможность для непосредственного сопоставления выявленных несоответствий с помощью анализа ВА сигналов с непосредственным анализом результатов изучения геометрии разобранных подшипников. В данной работе приводится пример такого сопоставления результатов ВА исследований и результатов исследования дефектного подшипника.

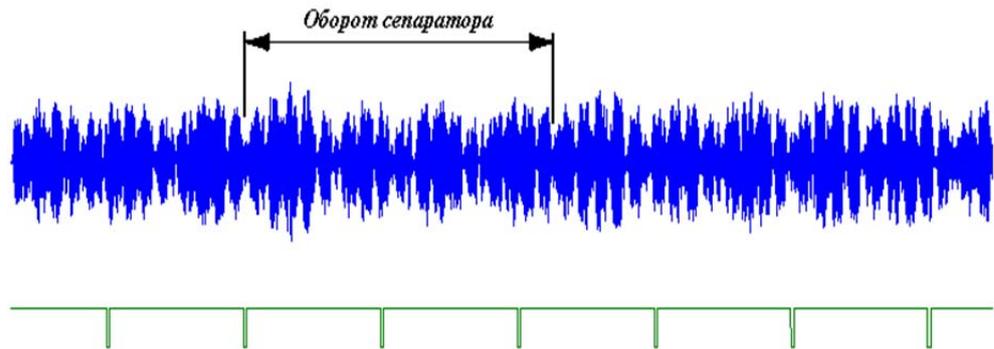


Рис. 2. Запись ВА сигнала на корпусе шпиндельного узла около передней опоры при 2447 об/мин

На рис. 2 показан пример записи ВА сигнала шлифовального шпинделя. На рисунке, на нижнем графике показаны отметки оборотов шпинделя, а на записи отмечен временной отрезок, соответствующий одному обороту сепаратора переднего подшипника. Видно, что запись ВА сигнала имеет модуляцию, определяемую прохождением каждого шарика. На обороте сепаратора присутствуют семнадцать локальных максимумов, соответствующих числу шариков. Просматривается и другая модуляция, соответствующая 4-х кратной оборотной частоте сепаратора.

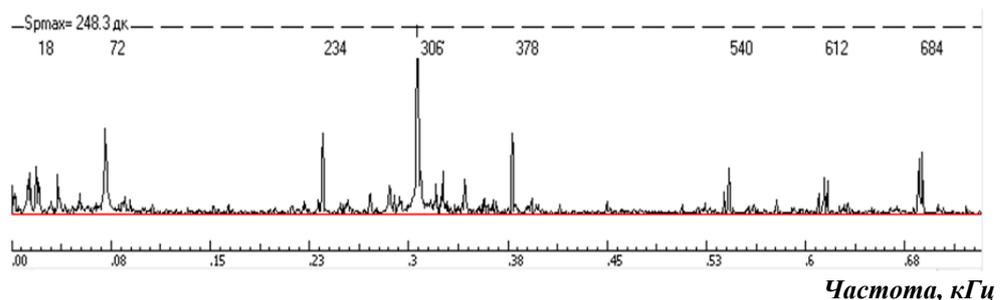


Рис. 3. Спектр огибающей ВА сигнала на корпусе шпинделя при 2447 об/мин

На рис. 3 показан спектр огибающей ВА сигнала в октавной полосе 4 кГц. Из геометрии подшипника можно было определить, что частота 18 Гц – это оборотная частота сепаратора  $f_c$ , 72 Гц – это 4-я гармоника оборотной частоты сепаратора  $4f_c$ , 306 Гц и 612 Гц – это частоты мелькания шариков по наружному кольцу  $f_{нк}$  и вторая гармоника этой частоты, соответственно  $2f_{нк}$ . Частоты 234 и 378 Гц являются «боковыми» частотами относительно частоты мелькания шариков. Эти частоты выше и ниже основной частоты 306 Гц на 4-х кратную частоту вращения сепаратора, соответственно  $f_{нк} \pm 4f_c$ . Такие же боковые частоты имеет и вторая гармоника частоты мелькания шариков (540 и 684 Гц).

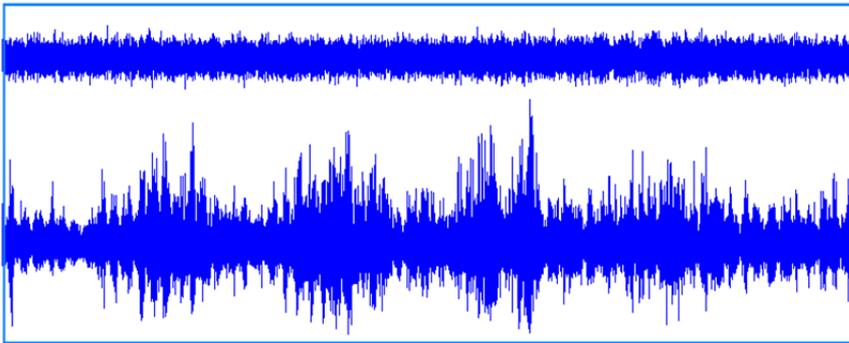


Рис. 4. Записи ВА сигналов с корпуса шпинделя при 1500 об/мин: со средней опоры (верхний график), с передней опоры (нижний график). Время записи 3 секунды

На рис. 4 показаны примеры записей ВА сигналов, зафиксированных в радиальном направлении в разных точках по оси шпинделя. Видно, что сигнал, фиксируемый в районе передней опоры, характеризуется не только относительно большой амплитудой, но и нестабильностью во времени. В результате, анализа ВА сигналов было решено заменить передний подшипник и провести исследования его геометрии.

Анализ спектра огибающей ВА сигнала показал, что передней опоре шпинделя свойственны погрешности, связанные с частотой вращения сепаратора. Это и гармоники, кратные частоте вращения сепаратора, и амплитуды на частотах кратных частоте мелькания шариков по наружному кольцу. В литературе [6] они трактуются как перекося наружного кольца подшипника. Однако настораживает очень четкое проявление на записях ВА сигнала процесса прохождения шариков по наружному кольцу. На рис. 5 показано изображение «слепок» наружного кольца подшипника, восстановленного по круглограммам, полученным на приборе Serfcom 1800D-12 в нескольких сечениях дорожки качения. Видно, что на поверхности «слепок» наблюдается выступ, величина которого меняется по ширине профиля дорожки качения. Этот факт объясняет эффект выделения в ВА сигнале прохождения каждого шарика по наружному кольцу. Неравномерность выступа по ширине дорожки может объяснить модуляцию с частотой  $4f_c$ . Из-за перекося наружного кольца траек-

тория движения шариков в течение оборота сепаратора меняет свое положение на дорожке качения, что приводит к тому, что пересечение выступа на наружном кольце происходит на разном удалении от его максимума.

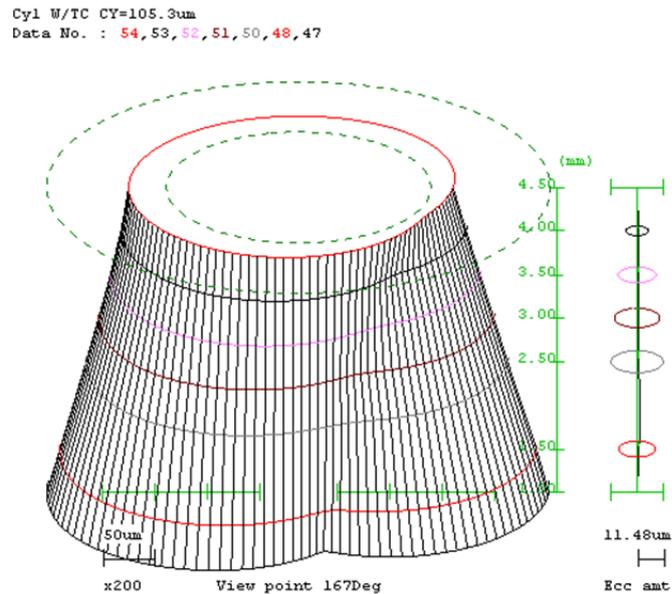


Рис. 5. Изображение «слепка» дорожки качения наружного кольца подшипника

Картина, показанная на рис. 4, говорит о том, что у ВА сигнала на передней опоре присутствует и другая модуляция с очень низкой частотой, проявляющаяся с приблизительно периодичностью 0,64 с. Это может говорить о сложном сочетании геометрических погрешностей внутреннего и наружного колец и влиянии их взаимного перекоса. В этих условиях наиболее неудачное сочетание погрешностей колец и положения траектории шариков возникает сравнительно редко, но проявляется в виде значительного роста амплитуды ВА сигнала, как и показано на рис. 4. На рис. 6 показано изображение дорожки качения внутреннего кольца, которое было восстановлено по круглограммам (рис. 7) для разных сечений дорожки качения. На поверхности дорожки внутреннего кольца просматривается дефект, выраженный в виде «вмятины», имеющей переменные размеры по ширине профиля дорожки качения. Теперь низкочастотную модуляцию ВА сигнала, снимаемого с передней опоры, можно объяснить сложным сочетанием позиций погрешностей колец друг относительно друга и неудачной вариацией положения траектории движения тел качения относительно погрешностей колец.

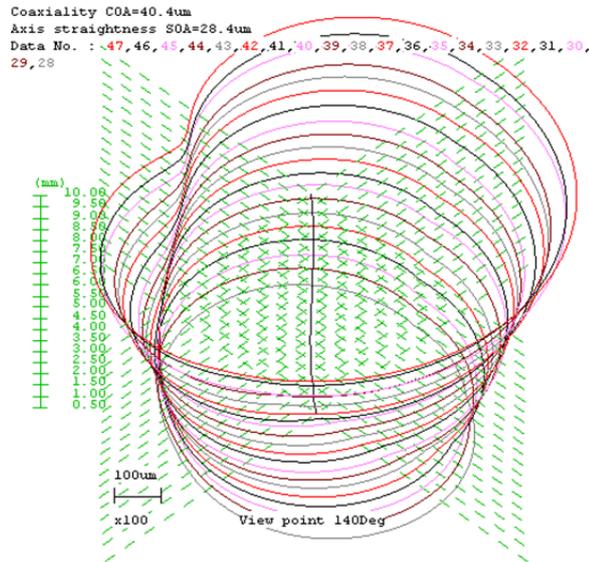


Рис. 6. Изображение погрешностей внутреннего кольца, полученное на основании круглограмм в разных сечениях дорожки качения

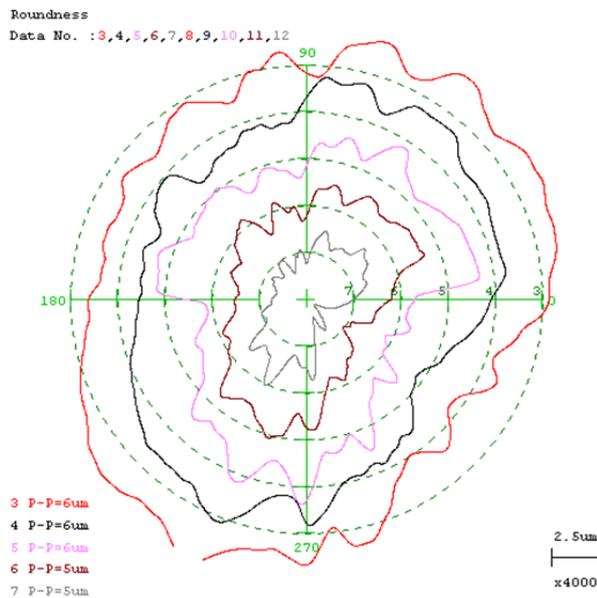


Рис. 7. Круглограммы дорожки качения внутреннего кольца подшипника

### Заключение

Несмотря на то, что частоты кинематического возмущения отдельных подшипников сравнительно легко определяются, анализ качества работы все-



го шпиндельного узла остается сложной задачей. Решение этой задачи необходимо для контроля и мониторинга шпиндельных узлов, как на стадии сборки, так и на стадии эксплуатации. В основе такого решения лежит накопление базы данных о реальных погрешностях деталей опор и особенностях их монтажа, и отображении этих особенностей в параметрах диагностических сигналов [7, 8].

### Библиографические ссылки

1. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации: Учеб. пособие. СПб.: Изд. центр СПбМТУ. 2000. 159 с.
2. Рагульскис К.М., Юркаускас А.Ю., Атступенас В.В. и др. Вибрации подшипников, - Вильнюс, изд. «Минтис», 1974, 392 с.
3. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Роль виброакустической диагностики в исследовании и отладке шпиндельных узлов // «Комплект: Инструмент, Технология, Оборудование». 2009, № 1, с. 36-39.
4. Kozochkin, M.P., Sabirov, F.S., Suslov, D.N., Abramov, A.P. Vibroacoustic Diagnostics of Spindle Bearings in High-Speed Machine Tools // Russian Engineering Research, vol. 30 (9), 2010, pp. 944-947.
5. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // "Вестник УГАТУ". – 2009. - Т.13, 1(34). - С. 133-138.
6. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь: ВПФ "Вибро-центр" 1996. 167 с.
7. Kozochkin, M.P., Sabirov, F.S. Vibroacoustic diagnostics of spindles // Russian Engineering Research. - 2009. - 29 (8). - PP. 827-830.
8. Сабиров Ф.С., Козочкин М.П. Виброакустическая диагностика шлифовальных шпинделей на подшипниках качения // Приложение. Справочник. Инженерный журнал, № 12, 2011, с. 10-15.