

УДК 621.9.06–229

М. П. КОЗОЧКИН, Ф. С. САБИРОВ

## ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Приведены результаты исследования шпиндельных узлов современных металлорежущих станков. Рассматриваются вопросы диагностики дефектов опор на основе анализа виброакустического сигнала, регистрируемого на корпусе шпиндельного узла. Предлагаются методы выявления различных дефектов на основе спектральной обработки сигналов, построения огибающей, анализа годографов и траекторий колебательного движения. *Шпиндельные узлы; диагностика; виброакустические методы анализа; огибающая; диагностика опор*

### ВВЕДЕНИЕ

Шпиндельные узлы современных станков являются наиболее ответственным элементом в общей цепочке обеспечения качества обрабатываемых поверхностей. Высокие скорости вращения шпинделей ведут к тому, что сравнительно небольшие дефекты в его подшипниковых узлах через короткое время приводят к деградации подшипника и потере точности станка в целом. На ранней стадии развития дефекты подшипника еще не сказываются на точности обработки, но они уже позволяют прогнозировать будущий отказ. Методы виброакустической (ВА) диагностики – наиболее эффективный инструмент для выявления зарождающихся дефектов подшипниковых узлов [1]. Эти методы целесообразно применять и на стадии создания технологического оборудования, и на стадии эксплуатации для принятия своевременных мер по техническому обслуживанию или ремонту шпиндельного узла. Важен также контроль состояния шпиндельного узла на стадии приобретения станка. Такой контроль требует ничтожных затрат по сравнению со стоимостью приобретаемого оборудования, но он может избавить от покупки продукции, которая создаст через какое-то время большие проблемы и не оправдает затраты на ее приобретение. Это важный момент, так как непосредственная проверка точности станка при обработке детали может не показать отклонений от паспортных данных, поскольку дефект находится в стадии развития, его влияние на кинематику движения заготовки скажется значительно позже, возможно, после окончания гарантийного срока. В связи с этим задачи диагностики шпиндельных узлов будут различаться у производителя и по-

ребителя. При этом у потребителя характер задач на стадии приобретения технологического оборудования будет существенно отличаться от задач, стоящих на стадии эксплуатации оборудования. Если на стадии эксплуатации вполне можно ограничиться периодическим контролем кинематической точности вращения шпинделя, то на стадии приобретения надо стремиться выявить дефекты изготовления узла, способные привести к быстрой потере точности. Задачи изготовителя еще сложнее. Изготовитель должен не только выявить все дефекты изготовления шпиндельного узла, но и найти связь этапов технологического процесса изготовления узлов с типовыми дефектами, выявляемыми на стадии обкатки. Нахождение этой связи позволяет проводить целенаправленные корректирующие действия, последовательно устраняющие наиболее значимые дефекты изготовления. Здесь требуется серьезная научно-исследовательская работа, базирующаяся на тщательном изучении особенностей конструкции узла и технологии его изготовления. Следует отметить, что заинтересованность изготовителя в тщательном выявлении всех дефектов изготовления шпиндельного узла будет значительно выше при наличии у покупателя технологий выявления их зарождающихся дефектов.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

За рубежом методы ВА диагностики широко распространены. Они составляют основу любой системы технического мониторинга и часто функционально объединены с системами автоматического управления. Например, шпиндельный узел фирмы «GF Agie Charmilles» оснащен не только датчиком температуры, но и стационарным акселерометром. В нашей стране методы ВА диагностики используются крайне

мало. Даже на заводах-изготовителях эти средства применяются нечасто, явно не хватает специалистов в этой области. От этого страдает не только качество выпускаемого технологического оборудования. Отсутствие культуры применения методов ВА диагностики разного уровня ведет к тому, что нет соответствующих статистических данных, позволяющих на стадии отладки технологических процессов изготовления шпиндельных узлов выделять наиболее опасные дефекты, наличие которых вероятнее всего приведет в недалеком будущем к разрушению подшипника или потере кинематической точности. Это не позволяет находить взвешенные решения по улучшению соотношения себестоимости и качества.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Полностью устранить все вибрации шпиндельного узла невозможно, улучшение вибрационных показателей по всем параметрам либо невозможно, либо ведет к быстрому повышению себестоимости и соответствующей потере рентабельности производства. Предварительные исследования шпиндельных узлов на стадии обкатки и мониторинг в процессе эксплуатации может выявить те вибрационные параметры, за которыми надо следить и нормировать в первую очередь. В настоящее время и у нас, и за рубежом предлагается широкий выбор вибродиагностической аппаратуры. Эта аппаратура различается ценой и глубиной реализуемого диагноза. Предлагается и аппаратура для контроля исключительно подшипниковых узлов, и универсальная, способная решать широкий спектр задач диагностики [2]. На стадии исследовательских работ предпочтительнее универсальная аппаратура, с помощью которой (за счет богатого выбора программно-математического обеспечения) можно изучить все многообразие проблем, возникающих при отладке конструкции шпиндельного узла и технологии его изготовления. После конкретизации алгоритма диагностической процедуры и определения набора контролируемых параметров вибраций можно приобретать или изготавливать специализированную аппаратуру.

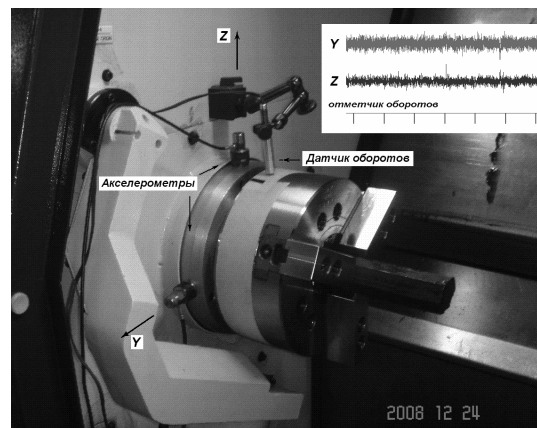
## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Подшипники, в которых установлен шпиндель, в значительной степени определяют состояние всего узла и являются источником вынуждающих сил.

Колебания в подшипнике качения порождаются несовершенной геометрией его элемен-

тов, силами трения и ударными импульсами, создаваемыми телами качения. Необходимо учитывать, что ВА активность подшипника до установки в узел и после могут существенно различаться, поскольку в процессе сборки элементы подшипника могут деформироваться, а осевой и радиальный натяги оказаться неравномерными. При совпадении частот наиболее значимых составляющих вынужденных колебаний с резонансными частотами узла вибрации на этих частотах могут резко возрастать.

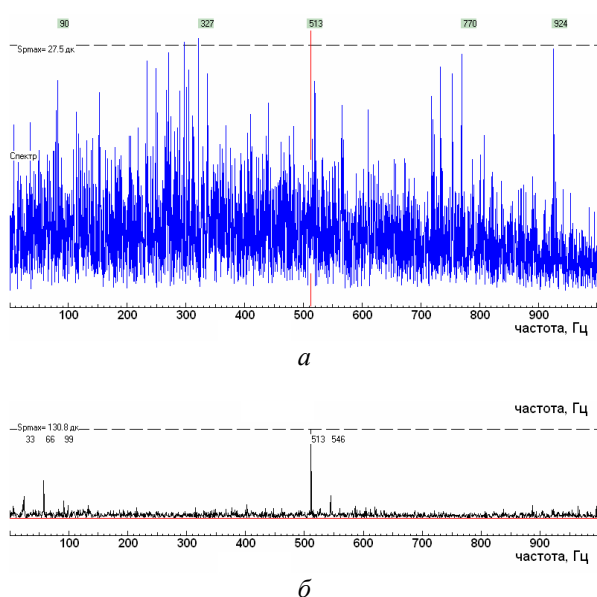
На рис. 1 показан двухшпиндельный токарный станок мод. ТА-20LB с установленными в районе передней опоры левого (основного) шпинделя двумя акселерометрами и фотодиодным датчиком оборотов. На этом же рисунке показан пример записи получаемых сигналов, а на рис. 2 – примеры спектральной обработки подобных сигналов с передней опоры станка ТВ-25У.



**Рис. 1.** Установка акселерометров и датчика оборотов на шпинделе токарного станка мод. ТА-20LB. В правом углу показан пример записи регистрируемых сигналов

Простейший контроль собранного шпинделя может опираться на статистические характеристики ВА сигнала, взятого в том или ином частотных диапазонах. Это среднее квадратичное значение (СКЗ), пиковое значение, пик-фактор (отношение пикового значения к СКЗ), эксцесс. Все эти параметры несут информацию об общем состоянии подшипникового узла, но с их помощью нельзя конкретизировать причину повышенной вибрации. Например, установлено, что при отсутствии в подшипниковом узле ударных импульсов пик-фактор ВА сигналов в высокочастотном диапазоне не превышает 5, а эксцесс колеблется около 0. Этого может быть достаточно при регулярном контроле одинаковых узлов, где предварительными исследованиями выявлены доминирующие причины уве-

личения ВА активности узла, но для определения направлений коррекции в технологии или конструкции этого уже недостаточно. Здесь на помощь приходит спектральный анализ. Однако в частном диапазоне, где располагаются основные частоты вынужденных колебаний подшипников, наблюдается большое количество гармонических составляющих разной частоты (рис. 2, *а*). Здесь из-за многочисленных резонансов соотношения амплитуд этих составляющих сильно отличаются от соотношения величин возбуждающих их колебательных сил. Все это очень затрудняет анализ и искажает информацию о размере дефектов.

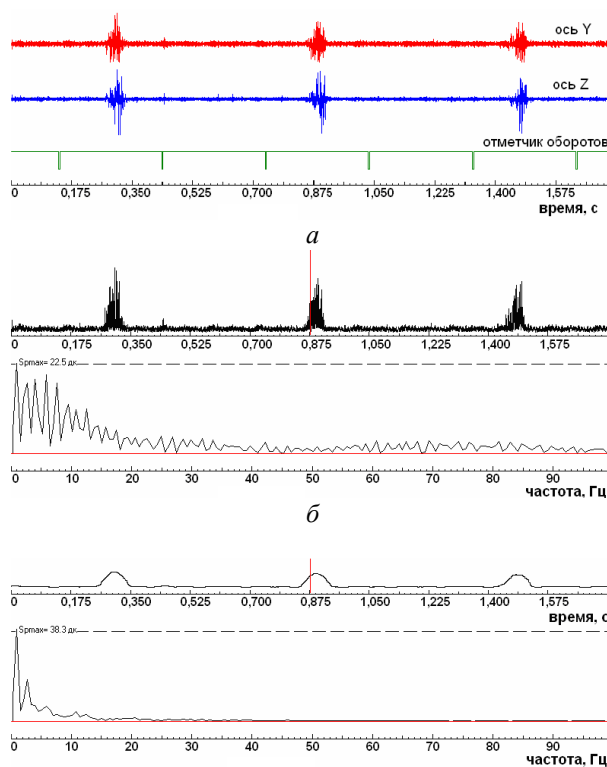


**Рис. 2.** Примеры спектров ВА сигнала, снятого с передней опоры шпинделя станка мод. ТВ-25У при частоте вращения 2000 об/мин: *а* – спектр всего ВА сигнала в диапазоне до 1 кГц; *б* – спектр огибающей ВА сигнала, выделенного в диапазоне 5,6–11,2 кГц (513 Гц – частота взаимодействия тел качения с дефектом внутреннего кольца подшипника, 546 – боковая составляющая, равная сумме частоты 513 Гц с оборотной частотой 33 Гц, 66 и 99 Гц вторая и третья гармоники оборотной частоты)

На рис. 2, *а* показан обычный спектр ВА сигнала, полученного при диагностике передней опоры шпинделя токарного станка с ЧПУ мод. ТВ-25У, в диапазоне до 1 кГц, где отмечена составляющая на 513 Гц, соответствующая частоте пробегания шариков по дефекту внутреннего кольца. Эта составляющая едва заметна на фоне других более значимых гармоник. На рис. 2, *б* показан спектр огибающей ВА сигнала, выделенного октавным фильтром в диапазоне 5,6–11,2 кГц. Видно, что гармоника на 513 Гц в этом спектре доминирует.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выделение высокочастотной составляющей ВА сигнала позволяет рассматривать только те составляющие вынужденных колебаний, которые модулируют высокочастотный сигнал, т. е. влияют на интенсивность микроимпульсов при трении тел качения или являются следствием ударного взаимодействия тел качения с дефектами дорожек качения.



**Рис. 3.** Примеры выделения огибающей ВА сигнала и ее спектрального анализа: *а* – пример записи ВА сигнала в октаве 8 кГц при наличии импульсов, синхронных с оборотами сепаратора (верхний график ось *Y*, средний – ось *Z*, нижний – отметчик оборотов); *б* – пример подробной огибающей ВА сигнала и спектр подробной огибающей (первый пик на спектре 1,6 Гц соответствует частоте оборотов сепаратора, остальные – гармоники и комбинационные частоты); *в* – пример сглаженной огибающей и ее спектр

Выделение огибающей осуществляется с помощью различных детекторов [3] (пиковых, среднеквадратичных и т. п.) или с помощью цифровой обработки, например, преобразования Гильберта. На рис. 3 показан пример записи высокочастотного ВА сигнала, содержащего импульсы, кратные оборотам сепаратора передней опоры шпинделя токарного станка с ЧПУ мод. ТА-20LB, вызываемые заниженным размером одного или нескольких тел качения

(рис. 3, а). Там же показаны два варианта огибающей сигнала и их спектры (рис. 3, б и 3, в). Точка СКЗ огибающей соответствует СКЗ амплитуды в окрестности этой точки. Чем больше размер анализируемой окрестности, тем меньше подробностей остается на огибающей. Из рассмотрения соответствующих спектров видно, что подробная огибающая дает в своем спектре помимо основной составляющей множество кратных ей гармоник, которые, смешиваясь с гармониками, порождаемыми другими дефектами, будут осложнять анализ.

Подбор параметров детектора тоже важная задача [3], поскольку слишком инерционная огибающая будет пропускать зарождающиеся дефекты. Именно поэтому на начальных этапах отработки конструкции и технологии сборки лучше иметь универсальную аппаратуру или программно-математическое обеспечение для возможности варьирования параметров обработки информации.

Таблица 1  
Основные частоты (Гц) вынуждающих сил подшипника качения

№	Описание источника	Формула для вычисления
1	Оборотная частота шпинделя	$f_o = n / 60$
2	Частота вращения сепаратора	$f_c = \frac{1}{2} f_o (1 - \frac{d_{ш}}{d_c} \cos \alpha)$
3	Частота перекачивания шариков по наружному кольцу	$f_n = f_c \cdot z$
4	Частота перекачивания шариков по внутреннему кольцу	$f_b = (f_o - f_c) \cdot z$
5	Частота вращения шариков	$f_{ш} = \frac{1}{2} f_o \frac{d_c}{d_{ш}} (1 - \frac{d_{ш}^2}{d_c^2} \cos^2 \alpha)$

$n$  – частота вращения шпинделя,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$d_{ш}$  – диаметр шариков, мм;

$z$  – число шариков;

$d_c$  – диаметр сепаратора (диаметр центров шариков), мм;

$\alpha$  – угол контакта шариков с дорожкой качения.

Обычно при диагностике состояния подшипников принято контролировать несколько основных частот вынужденных колебаний, а также их гармоники и субгармоники (см. табл. 1). Однако нельзя забывать, что в шпиндельном узле происходит сложное взаимодействие вынуждающих сил в подшипнике с собственными частотами всего узла. Это стано-

вится особенно заметно при регистрации параметров ВА сигнала по мере нарастания числа оборотов шпинделя.

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 показаны графики изменения СКЗ ВА сигнала в октаве 8 кГц, полученных с двух шпинделей станка по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Видно, что у противоположного с ростом оборотов плавно нарастает амплитуда ВА сигнала, практически одинаково по обоим направлениям. На первом шпинделе картина другая. Амплитуда сигнала существенно различается по осям, а при росте оборотов амплитуда увеличивается неравномерно, наблюдаются явные резонансные пики.

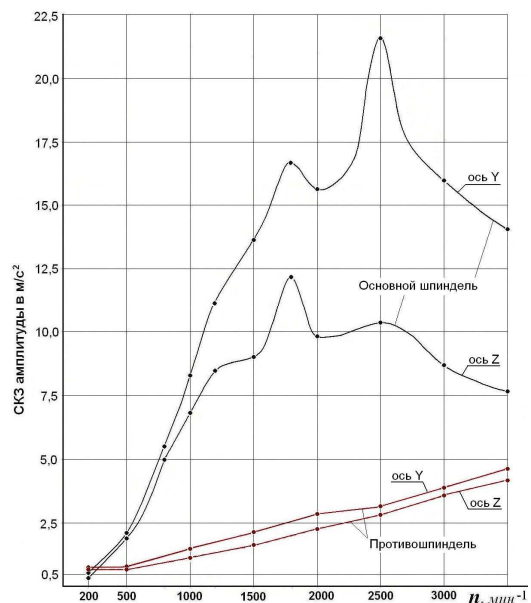
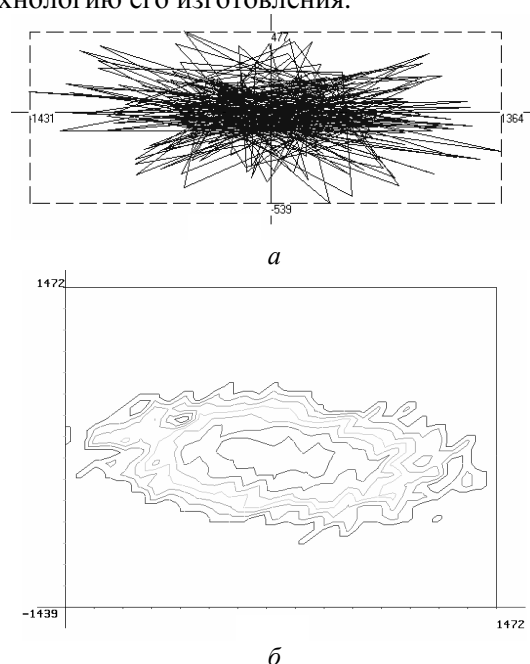


Рис. 4. Изменение СКЗ амплитуды ВА сигнала в октаве 8 кГц на двух шпинделях станка мод. ТА-20LB

Необходимо отметить, что вынужденные колебания, создаваемые в подшипнике, являются источником возмущающих сил, действующих на шпиндель и возбуждающих его изгибные колебания. Если эти возмущения достаточно велики, то при сближении частот возмущающих воздействий или их гармоник с собственными частотами шпинделя вибрации могут резко возрастать, увеличивая мощность микроударов, что и вызывает модуляцию амплитуды высокочастотных составляющих ВА сигнала. Так при переходе от 1000 об/мин к 2000 об/мин на станке мод. ТВ-25У эксцесс увеличился более чем в 50 раз, что говорит об увеличении интенсивности микроимпульсов. Это и подтверждается резким ростом амплитуды оги-

бающей на частоте 513 Гц (см. рис. 2, б). Эта составляющая очень близка ко второй гармонике первой формы изгибных колебаний шпинделя в собранном состоянии (280 Гц) и составляет треть от собственной частоты второй формы колебаний (1414 Гц). В связи с этим становится очень актуальной проверка вибраций шпиндельного узла на оборотах, где частоты вынуждающих сил могут приближаться к частотам собственных колебаний узла с учетом возможных гармоник и субгармоник. Наличие ярко выраженных резонансных пиков является негативным фактором, с которым надо бороться, вводя коррекцию в конструкцию узла или технологию его изготовления.



**Рис. 5.** Годограф ВА сигнала в октаве 8 кГц при 2500 об/мин основного шпинделя станка TA-20LB: *а* – годограф; *б* – двумерное распределение времени присутствия радиус-вектора ВА сигнала в точках плоскости YOZ (показано линиями равного уровня)

Анизотропия амплитуд колебаний по разным направлениям тоже говорит о пороке в конструкции шпиндельного узла или в технологии его изготовления. На рис. 5 показан пример годографа (рис. 5, *а*), определяемого векторной функцией, задаваемой записями ВА сигнала по осям *Y* и *Z* для основного шпинделя (см. рис. 4) при 2500 об/мин, т. е. при оборотах, где наблюдались наибольшие колебания.

На этом же рисунке (рис. 5, *б*) показано линиями равного уровня двумерное распределение времени присутствия радиус-вектора в точках плоскости YOZ. Из этих рисунков видно, что колебания по оси *Y* явно преобладают. Та-

кое явление может быть вызвано неодинаковой жесткостью опор из-за погрешностей расточки корпуса или неравномерностью радиального натяга, например, из-за наличия радиальных сил, создаваемых приводным ремнем.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования, обкатка и испытания шпиндельных узлов не могут сводиться только к диагностике шпиндельных опор. Задача должна ставиться шире, как исследование динамического взаимодействия вынуждающих сил с динамической системой шпиндельного узла.

2. ВА исследования и диагностика являются важнейшим компонентом во всем комплексе исследований шпиндельных узлов, которые могут дополняться температурными измерениями, контролем геометрических параметров и т. п.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий [и др.]. М.: Наука, 1984. 120 с.
2. Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30–34.
3. Козочкин М. П., Сабиров Ф. С. Оперативная диагностика при металлообработке – проблемы и задачи // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 3. С. 14–18.

## ОБ АВТОРАХ



**Козочкин Михаил Павлович**, проф. Дипл. инж.-мех. (МГТУ «Станкин», 1969). Д-р техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (ЭНИМС, 2002). Иссл. в обл. виброакустической диагностики технологического оборудования и процессов.



**Сабиров Фан Сагирович**, доц. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1973). Канд. техн. наук по технологиям и оборудованию мех. и физ.-техн. обработки (МГТУ «Станкин», 1979). Иссл. в обл. динамики несущих систем станков.