

## АНАЛИЗ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МЕТОДОМ ДИАГНОСТИКИ СИГНАЛА НА ЕГО КОРПУСЕ

*Денисенко А.Ф., Михайлов В.В.*

*Самарский государственный технический университет, г. Самара*

**Ключевые слова:** виброакустическая диагностика, подшипник качения, дефект, упругая волна, затухание колебаний.

**Аннотация.** Необходимость обслуживания современных металлорежущих станков по фактическому состоянию и обеспечения высокой надежности шпиндельных узлов требует мониторинга уровня развития дефектов подшипников качения опор шпинделя. Показано, что контроль состояния подшипника возможен путем замера уровня колебаний в ряде точек корпуса шпинделя, когда упругая волна, вызванная дефектом в подшипнике проходит ряд зон шпиндельной опоры с различными коэффициентами затухания.

## ANALYSIS OF VIBRATION PROCESSES OF THE SPINDLE ASSEMBLY BY THE METHOD OF DIAGNOSTIC SIGNAL ON ITS HOUSING

*Denisenko A.F., Mikhailov V.V.*

*Samara state technical university, Samara*

**Keywords:** vibroacoustic diagnostics, rolling bearing, defect, elastic wave, vibration damping.

**Abstract.** The need to maintain modern metal-cutting machines in actual condition and to ensure high reliability of spindle units requires monitoring the level of development of defects in rolling bearings of spindle bearings. It is shown that monitoring the state of the bearing is possible by measuring the level of oscillation at a number of points in the spindle housing, when an elastic wave caused by a defect in the bearing passes through a number of spindle bearing zones with different attenuation coefficients.

Стремление современного производства обеспечить бесперебойную и безаварийную работу технологического оборудования с минимизацией затрат на обслуживание и ремонты является ответом на объективные законы развития машиностроения.

Основной составляющей технологического оборудования машиностроительного производства является станочный парк.

В настоящее время методы обслуживания станочного оборудования можно подразделить на три вида: обслуживание после выхода оборудования из строя; обслуживание по регламенту; обслуживание по фактическому техническому состоянию.

Обслуживание по фактическому техническому состоянию особенно актуально в условиях современного многономенклатурного машиностроительного производства, когда используемые металлообрабатывающие станки представляют собой сложные и дорогостоящие системы, резервирование которых минимально, а степень загрузки должна быть максимальной. Обслуживание по фактическому техническому состоянию строится на основе диагностики обнаружения и идентификации всех основных

видов дефектов на стадии зарождения, наблюдение за их развитием и прогноз на этой основе технического состояния объектов контроля.

Среди многочисленных методов технической диагностики [1, 2], направленных на оценку технического состояния станка, особое место принадлежит методам виброакустической диагностики, ориентированным на использование диагностической информации, содержащейся в колебательных процессах сборочных единиц станков [3].

Одним важным обстоятельством в пользу выбора вибрации станков в качестве диагностического сигнала является то, что дополнительные колебательные силы, возникающие из-за дефекта, возбуждают вибрацию непосредственно в месте его появления, которая, распространяясь до точки ее измерения, позволяет исследовать колебательные силы, действующие в работающем станке в зоне дефекта. Это дает возможность диагностировать станок на рабочем месте, без остановки и разборки.

Анализ конструкций металлорежущих станков показывает, что основной подсистемой, во многом формирующей его эксплуатационные характеристики, является шпиндельный узел. Поэтому обеспечение параметрической и функциональной надежности шпиндельного узла, определяемой в первую очередь надежностью шпиндельных опор качения, является объективной необходимостью. Высокие скорости вращения шпинделей современных металлорежущих станков являются причиной того, что сравнительно небольшие дефекты в его подшипниковых узлах через короткое время приводят к деградации подшипника и потере точности станка в целом [4]. В связи с этим, мониторинг состояния шпиндельных подшипников качения при контроле работоспособности металлорежущих станков становится одной из важнейших задач.

Мониторинг технического состояния подшипников качения на ранних этапах эксплуатации, как правило, связан с измерением энергии импульсов, следующих с частотой перекачивания тел качения по локальным дефектам (например, местам выкрашивания).

Для оценки состояния подшипников качения при частоте вращения до 3000 об/мин можно использовать следующие как пиковые так и СКЗ значения виброускорения в частотном диапазоне 10...5000 Гц [5]: хорошее состояние – пиковое значение не превышает  $10,0 \text{ м/с}^2$ ; удовлетворительное состояние – СКЗ не превышает  $10,0 \text{ м/с}^2$ ; плохое состояние наступает при превышении  $10,0 \text{ м/с}^2$  СКЗ; если пиковое значение превышает  $100,0 \text{ м/с}^2$  – состояние становится аварийным.

Как показал анализ конструкций металлорежущих станков конструктивные особенности шпиндельного узла, как правило, не представляют возможности контроля вибрационного сигнала непосредственно на подшипнике качения. В связи с этим датчики, контролирующие вибрационный сигнал, могут быть установлены на доступных местах корпусных деталей, несущих шпиндельные опоры. При этом несмотря на то, что вибрационный сигнал хорошо передается по корпусным деталям, он претерпевает изменения, теряя энергию, проходя по сплошным деталям и через их соединения.

В связи с этим актуальной задачей является определение уровня развития дефекта подшипника по вибрационному сигналу, полученному в возможном месте установки датчика.

Дефектам подшипников качения присущи некоторые особенности. Обычно на ранней стадии развития дефектов подшипника появляются признаки дефектов только одного из колец и, затем, другого. Причем дефекты наружного кольца можно зафиксировать раньше, так как при одинаковой степени развития дефекта вибрация, вызываемая внутренним кольцом, имеет более низкую интенсивность, чем наружным. Далее по мере износа подшипника появляются дефекты тел качения и, наконец, сепаратора.

Дефекты в подшипниках качения возбуждают вибрацию в корпусных конструкциях, которая в виде волн распространяется по станку, достигает поверхности деталей и измеряется при диагностировании.

Упругая волна переносит акустическую энергию в направлении своего движения. В общем случае, колебательная энергия может передаваться по конструкциям машин и оборудования в виде продольных, изгибных, сдвиговых и крутильных упругих волн.

Преобладающий вид волн определяется формой твердого тела, его размерами, формой источника колебаний.

Учитывая значительные размеры корпусных деталей станков и наличие потерь энергии при распространении волны, можно считать, что колебания дойдут до места установки датчика в весьма ослабленном виде, что позволяет использовать закономерности распространения волнового процесса в твердых телах и их соединениях [6].

Одной из характерных особенностей волновых процессов является падение ее интенсивности волны по мере удаления от источника.

Падение интенсивности волны характеризуется уменьшением амплитуды колебаний частиц в волне и связано с ее расхождением и затуханием колебаний.

Уменьшение амплитуды колебаний частиц в волне, обусловленное ее расхождением (геометрическое затухание), связано с тем, что по мере распространения волны от точечного источника энергия, излучаемая источником, распределяется на все увеличивающуюся поверхность волнового фронта и соответственно уменьшается поток энергии через единицу поверхности.

Принято считать, что геометрическое затухание подчиняется степенному закону

$$A_r = \frac{A_0}{r^n},$$

где  $n$  - показатель функции расхождения;  $r$  - расстояние, проходимое волной от источника (места дефекта подшипника) до точки контроля (места установки датчика);  $A_0$  - начальная амплитуда колебаний (в месте дефекта подшипника);

$A_r$  - амплитуда колебаний на расстоянии  $r$  от источника.

Для сферической волны, волновая поверхность которой растёт с расстоянием  $r$  от источника как  $r^2$ ,  $n = 1$ , а для цилиндрической волны -  $n = 0,5$ .

Затухание можно учесть введением дополнительного экспоненциального множителя в выражение для амплитуды  $A_r$  [6]:

$$A = \frac{A_0}{r^n} e^{-\delta r},$$

где  $\delta$  – коэффициент затухания.

Коэффициент затухания представляет собой сумму коэффициентов поглощения и рассеяния:

$$\delta = \delta_{II} + \delta_P,$$

где  $\delta_{II}$  – коэффициент поглощения, оценивающий необратимый переход энергии упругой волны в другие формы, в частности в тепло;  $\delta_P$  – коэффициент рассеяния колебаний на неоднородностях среды.

При прохождении упругой волны через подшипник она проходит через ряд сред с различными коэффициентами затухания. Таким образом, амплитуда упругой волны, дошедшей до точки контроля:

$$A = \frac{A_0}{\sum l_i^n} e^{-\sum \delta_i l_i},$$

где  $l_i$  - расстояние, проходимое волной по среде с коэффициентом затухания  $\delta_i$ .

Так как дефекты наружного кольца можно зафиксировать на начальном этапе, рассмотрим диагностику локального дефекта на дорожке качения наружного кольца подшипника (например, места выкрашивания).

Для подшипника, установленного на стальном валу в чугунном корпусе, можно выделить следующие участки, проходимые волной от места дефекта до точки контроля (места установки датчика): тело корпуса (чугун); стык наружного кольца подшипника и корпуса (воздух); наружное кольцо подшипника (сталь); зона сепаратора и тел качения (сталь+воздух); внутреннее кольцо подшипника (сталь); стык внутреннего кольца подшипника и вала (воздух); тело вала (сталь).

В контакте колец подшипника с корпусом и валом имеет место непосредственный контакт неровностей, однако поскольку твердые тела касаются друг друга только вершинами профилей шероховатостей, площадь контакта которых составляет 0,01...0,1% от номинальной [7], то в качестве среды распространения упругой волны можно принимать воздух, заполняющей зазор в соединении.

Для зоны сепаратора и тел качения значения  $l_i$  и  $\delta_i$  определяются плотностью заполнения этого пространства сепаратором и телами качения

Если общее расстояние, проходимое упругой волной по зоне сепаратора и тел качения, обозначить через  $S_P$ , то по металлу волна пройдет расстояние  $S_P V_m / V_s$ , а по воздуху -  $S_P (1 - V_m / V_s)$ , где  $V_s$  - объем зоны между наружным и внутренним кольцами подшипника;  $V_m$  - объем, занимаемый металлом сепаратора и шариков.

Если упругая волна, возбуждаемая единичным дефектом  $Q$  на дорожке качения наружного кольца, контролируется датчиком  $A$ , установленным на расстоянии  $0,5D_A$  от оси вала, то затухание амплитуды колебаний будет зависеть

от угла  $\gamma$  (рис. 1), определяющего общее расстояние между точками возбуждения и контроля упругой волны и значения  $l_i$  и  $\delta_i$ . На рис. 1:  $D; d$  - наружный и внутренний диаметры подшипника соответственно;  $D_H; d_B$  - диаметры дорожек качения наружного и внутреннего колец подшипника соответственно.

Вследствие малости воздушного зазора в стыках наружного кольца подшипника и корпуса и внутреннего кольца подшипника и вала по сравнению с другими значениями  $l_i$ , будем считать значения  $l_i$  для стыков не зависящими от угла  $\gamma$ .

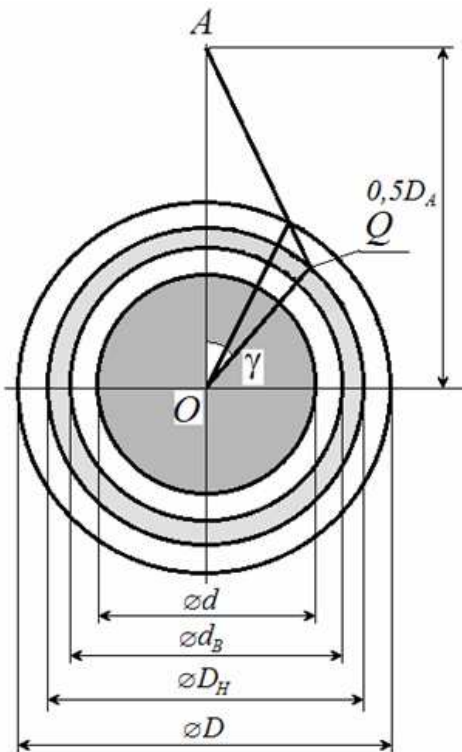


Рис. 1. К определению зон, проходимых упругой волной

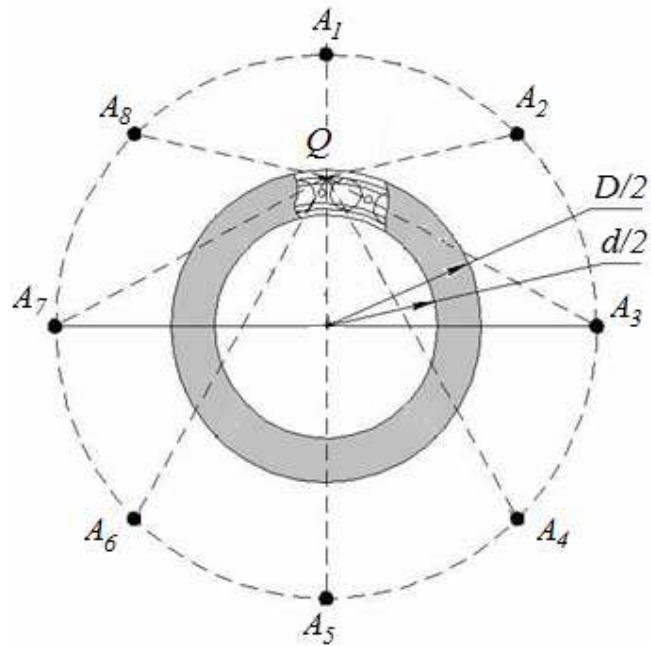


Рис. 2. Размещение датчиков на корпусе шпиндельного узла

В зависимости от угла  $\gamma$  можно выделить следующие зоны, проходимые упругой волной по траектории, соединяющей место дефекта и установки датчика (рис. 1):

- три зоны: наружное кольцо; стык наружный; корпус:

$$0 \leq \gamma \leq \arccos \frac{D_H}{D_A};$$

- четыре зоны: зона сепаратора и тел качения; наружное кольцо; стык наружный; корпус:

$$\arccos \frac{D_H}{D_A} < \gamma \leq \arccos \frac{d_B}{D_A} + \arccos \frac{d_B}{D_H};$$

- шесть зон: зона сепаратора и тел качения; внутреннее кольцо; зона сепаратора и тел качения; наружное кольцо; стык наружный; корпус:

$$\arccos \frac{d_B}{D_A} + \arccos \frac{d_B}{D_H} < \gamma \leq \arccos \frac{d}{D_A} + \arccos \frac{d}{D_H};$$

- десять зон: зона сепаратора и тел качения; внутреннее кольцо; стык внутренний; вал; стык внутренний; внутреннее кольцо; зона сепаратора и тел качения; наружное кольцо; стык наружный; корпус:

$$\arccos \frac{d}{D_A} + \arccos \frac{d}{D_H} < \gamma \leq \pi.$$

Таким образом, в зависимости от взаимного положения дефекта и мест установки датчика можно определить уменьшение амплитуды  $A_0$ , связанное с расхождением и затуханием колебаний.

Сопоставление значений на датчиках, установленных в нескольких контрольных точках на корпусе шпиндельного узла (рис. 2), позволит оценить амплитуду в зоне дефекта  $A$ , оценить уровень развития дефекта и локализовать его расположение, что сократит время диагностики при ремонте.

### Список литературы

1. Писарев В.И., Ваганов А.А., Денисенко А.Ф., Тютюрев И.О. Техническое обслуживание и ремонт металлообрабатывающих станков с ЧПУ на основе безразборной диагностики технического состояния // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, №1(2). – С. 508-514.
2. Макаров В.М., Савинов Ю.И. Обоснованный выбор средств контроля качества в технологических процессах // Главный механик. – 2015. – № 4. – С. 16-29.
3. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М: Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Козочкин М.П., Сабиров Ф.С. Выявление дефектов шпиндельных узлов виброакустическими методами // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 13, №1(34). – С. 133-137.
5. Сидоров В.А. Информационные основы виброметрии // Вестник СевГТУ. – 2011. – Вып. 117: Машиноприборостроение и транспорт. – С.157-165.
6. Китайгородский А.И. Введение в физику. – М.: Наука, 1973. – 668с.
7. Демкин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227с.

### Сведения об авторах:

*Денисенко Александр Федорович* – д.т.н., профессор, профессор кафедры "Технология машиностроения, станки и инструменты", СамГТУ, г.Самара;  
*Михайлов Виктор Вячеславович* – аспирант, СамГТУ, г.Самара.