

УДК 620.9

**АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*С.С. Щеголев, А.Г. Мотков*

Рассмотрен комплексный автоматизированный метод выявления дефектов колец подшипников качения колесной пары вагона на основании ультразвукового и виброакустического методов неразрушающего контроля. Проанализирована его энергоэффективность в сравнении с вихретоковым методом.

*Ключевые слова:* дефект; кольцо подшипника; автоматизация контроля; виброакустический метод; ультразвуковой метод; дефектоскоп; аналого-цифровой преобразователь; ремонтное предприятие.

---

**DEFECT DETECTOR OF BEARING RINGS WITH USE  
OF THE POWER EFFECTIVE AUTOMATED COMPLEX METHOD  
OF NONDESTRUCTIVE CONTROL**

*S.S. Shchegolev, A.G. Motkov*

The work considers the complex automated method detection of defects rings of rolling bearings of wheel couple of car on the basis of ultrasonic and vibroacoustic methods of nondestructive control. Its energy efficiency in comparison with eddy current method is analyzed.

*Keywords:* defect; bearing ring; control automation; vibroacoustic method; ultrasonic method; defectoscope; analog-digital converter; repair shop.

Одной из основных задач при обеспечении энергоэффективной работы оборудования является использование меньшего количества энергии для выполнения технологических процессов. Для неразрушающего контроля колец подшипников повсеместно применяются стенды и приборы, в состав которых входят многоканальные вихретоковые преобразователи (ВТП) и многоэлементные вихретоковые датчики, установленные на сканерах с программным управлением для одновременного контроля всех поверхностей кольца, благодаря чему машинное время сканирования одного кольца снижено до 18 секунд [1, 2].

В ОАО «Саратовский подшипниковый завод» и ОАО «Самарский завод авиационных подшипников» для выборочного контроля колец роликовых подшипников на операциях шлифовальной обработки, а также для сплошного приемочного контроля мелких партий деталей применяются приборы ПВК-К2М. Потребляемая мощность составляет 500 Вт. Таким образом, при 8-часовой смене одно рабочее место, оборудованное таким станком, потребит 4 кВт энергии.

Учитывая время, затрачиваемое на смену партий проверяемых подшипников, на операции контроля качества колец подшипников тратится порядка 6,5 часов. Следовательно, за смену на одном рабочем месте может быть проверено 1300 колец подшипников.

В случае применения разработанного автоматизированного комплекса основные энергозатраты связаны с использованием в составе персонального компьютера (ПК) для обработки полученных результатов. Программное обеспечение нетребовательно к ресурсам ПК, и в целях сокращения энергозатрат допустимо использование компьютеров любой мощности – от 250 Вт. Приборы, используемые в системе, в час потребляют дополнительно 20 Вт. Таким образом, суммарные траты мощности в час составят 0,27 кВт или за 8 часов 2,16 кВт. При этом время проверки с использованием виброакустического метода составляет 4 секунды – он применяется для экспресс-оценки. Виброакустическим методом проверяется за смену до 5800 колец подшипников.



Рисунок 1 – Блок-схема комплексного автоматизированного контроля состояния колец подшипников

Ультразвуковой метод позволяет выявить дополнительные параметры дефекта, но при этом требует большего расхода времени – до 180 секунд. Применение ультразвукового метода необходимо в случае фиксации дефекта, и за смену этим методом можно дополнительно проверить до 100 колец подшипников, что составляет 1,71 % от общего числа и не превышает средние показатели брака. Следовательно, на одном рабочем месте потребляется в два раза меньше электроэнергии по сравнению с наиболее часто применяемым вихретоковым методом неразрушающего контроля. При этом за смену проверяется в 4–5 раз больше колец подшипников.

На рисунке 1 представлен общий алгоритм выявления дефектов колец подшипников.

Наличие трещин в кольце подшипника обуславливает повышенное рассеяние энергии виброакустических колебаний. Таким образом, добротность является показателем качества динамической системы, которая зависит от основных её характеристик, таких как резонансная частота и декремент затухания. Следовательно, добротность может служить идентификатором состояния кольца подшипника качения [3].

Методика определения добротности кольца подшипника на основании его анализа как динамической системы может быть представлена в виде ряда этапов:

1. Измерение высокоамплитудных колебаний кольца подшипника качения при импульсном воздействии.
2. Применение низкочастотной фильтрации к полученному виброакустическому сигналу.
3. Аппроксимация импульсной передаточной функции при помощи аналитических выражений.
4. Вычисление передаточной функции динамической системы кольца подшипника для бездефектного кольца:

$$W_1(p) = \frac{\frac{a_0 \cdot \omega_0}{\alpha^2 + \omega_0^2}}{\frac{1}{\alpha^2 + \omega_0^2} p^2 + 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega_0^2} p + 1}.$$

Для кольца с дефектом:

$$W(p) = \frac{2\omega_0 \cos(\varphi)}{(p+\alpha)^2 + \omega_0^2} + \frac{2\omega_1 \sin(\varphi)}{(p+\alpha)^2 + \omega_1^2}.$$

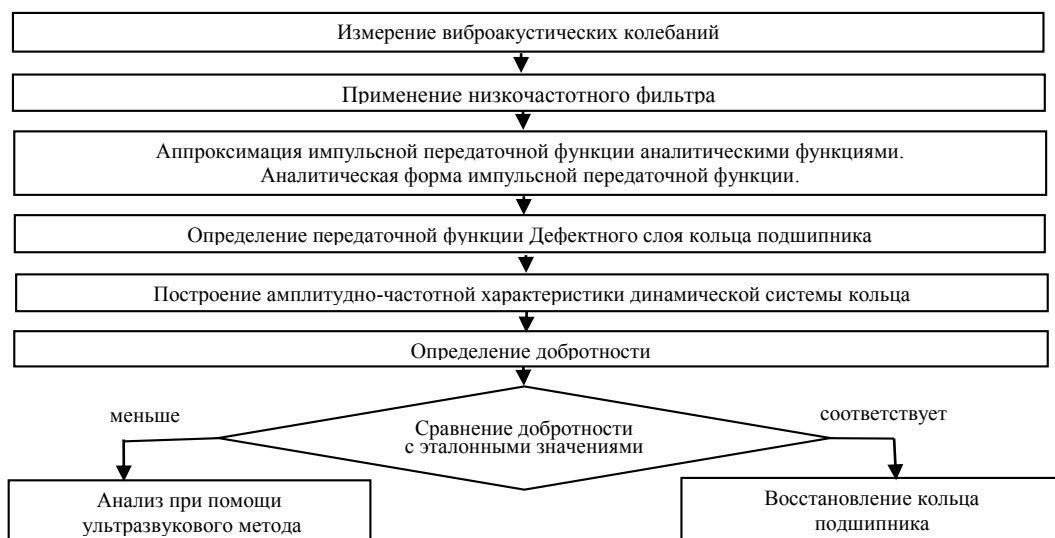


Рисунок 2 – Алгоритм идентификации динамической системы кольца подшипника и вычисление добротности на основании анализа виброакустических колебаний

5. Построение амплитудно-частотной характеристики динамической системы кольца подшипника по полученной передаточной функции при помощи программного продукта MATLAB.
  6. Определение добротности системы по полученной амплитудно-частотной характеристике.
  7. Сравнение полученной добротности динамической системы с эталонным (бездефектным) значением добротности.
  8. Отбраковка кольца подшипника в случае выявления в нём дефекта и направление на дополнительное исследование при помощи ультразвукового метода неразрушающего контроля.
  9. В случае соответствия добротности рассматриваемого кольца подшипника эталонным значениям производится его восстановление путем шлифования поверхности качения кольца.
- Блок-схемы основных частей программы представлены на рисунках 1–3.
- Последовательность выполняемых операций:
1. Загрузка в массив данных, полученных с использованием дефектоскопа УД2-12, подключенного к персональному компьютеру с помощью аналого-цифрового преобразователя. Период времени  $T$ , прошедший между записью двух значений ординат, составит 2 мкс.
  2. Выборка ненулевых значений массива и удаление нулей. В полученном массиве присутствуют лишние данные, замедляющие его обработку. За время, прошедшее между двумя зондирующими импульсами, фиксируется отраженный импульс. Остальные записи в массиве составляют нули, замедляющие обработку массива.
  3. Дополнительная выборка значений, резко отличающихся по своей величине от соседних. Определяются номера позиций массива, на которых фиксируются зондирующие импульсы.
  4. Поиск отраженного импульса в пределах следующих  $N$  позиций относительно определенной позиции зондирующего импульса. Число  $N$  зависит от толщины исследуемого образца, скорости распространения продольной волны. В программу занесены значения скоростей распространения волн в различных марках стали.
  5. Поиск локальных максимумов в промежутке позиций от фиксации зондирующего импульса до ячейки с номером на  $N$  большим. Все значения локальных максимумов заносятся в новый массив. По занесенным значениям ординат можно однозначно судить о наличии дефекта.
- Для определения глубины залегания дефекта в материале кольца необходимо знать скорость распространения ультразвуковой волны внутри кольца подшипника, угол ввода луча в исследуемый материал, время, прошедшее с момента отправки зондирующего импульса, до момента принятия отраженного импульса [4].

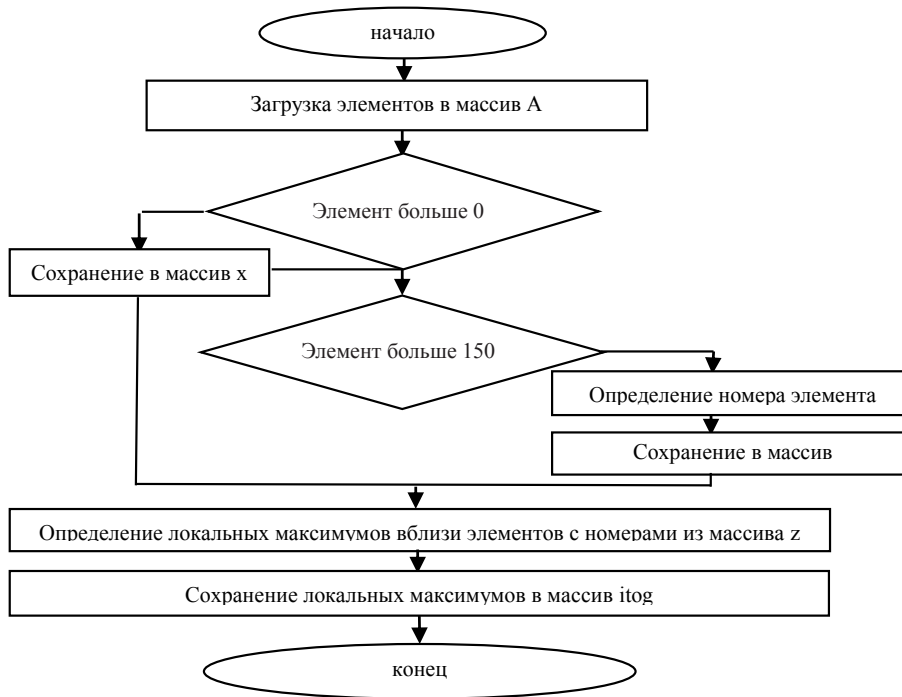


Рисунок 3 – Блок-схема программы обработки массива поступивших на ПК сигналов, выделение максимальных значений амплитуд отраженных импульсов

За период времени  $T$  зондирующий импульс, пущенный в исследуемый материал, дойдет до дефекта и отразится от него. Впоследствии он будет принят пьезоэлектрическим преобразователем, о чем свидетельствует импульс на осциллографе. Таким образом, устанавливается время, за которое ультразвуковая волна пройдет двойное расстояние  $2S$ .

Для определения глубины залегания дефекта  $h$ , необходимо найти синус угла, составляющего с углом входа луча в материал  $90$  градусов:

$$\sin\alpha = \frac{h}{S_n},$$

где  $S_n$  – половина расстояния, пройденного за время  $T$ .

$$\text{Откуда, } 2h = S \cdot \sin\alpha,$$

$$S = v \cdot T,$$

причем  $v$  – скорость прохождения импульса.

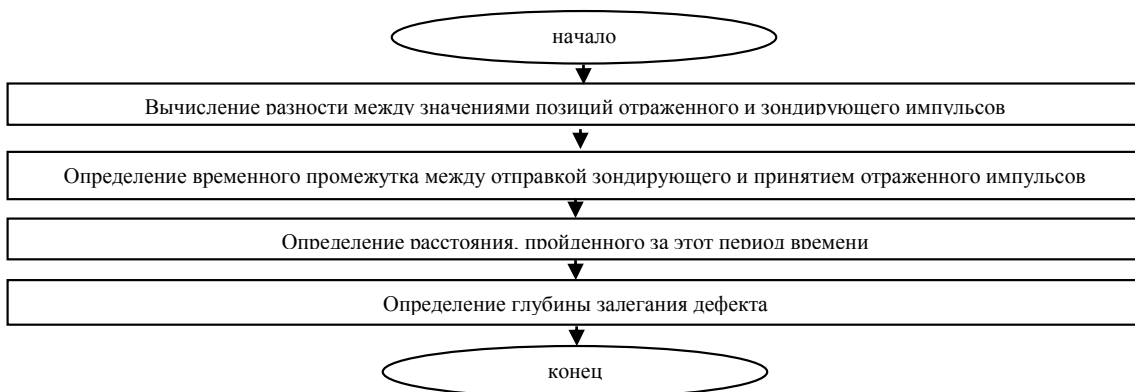


Рисунок 4 – Блок-схема программы для определения глубины залегания дефекта



Рисунок 5 – Блок-схемы программ построения графиков обнаруженных дефектов в зависимости от выбранного значения размерности по оси абсцисс

В программу заложен дополнительный алгоритм расчета в случае многократного отражения луча.

Определение координат дефектов реализуется в случае равномерного вращения кольца. При задании определенного времени полного оборота, выбрав точку отсчета, возможно определение момента времени и расстояния, пройденного датчиком от точки отсчета до фиксации дефекта. Как следствие, указываются координаты обнаруженного дефекта непосредственно на кольце (рисунок 4).

В программе имеется возможность визуальной оценки положения дефекта с привязкой к месту его обнаружения. По осям абсцисс графиков возможен отсчет значений либо в соответствии с выбранной нулевой координатой, либо с моментом начала поиска дефектов. В первом случае измерение будет производиться в миллиметрах, во втором – в секундах. По оси ординат идет пересчет относительных единиц в значения, измеряемые в миллиметрах или микрометрах (рисунок 5).

Таким образом, обработка данных с помощью предложенного алгоритма позволяет определить наличие, размер и положение дефекта.

#### Литература

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Криворудченко В.Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / В.Ф. Криворудченко, Р.А. Ахмеджанов. М.: Маршрут, 2005. 436 с.
3. Щеголев С.С. Оценка состояния колец подшипников с применением ультразвукового и акустического методов // Вестник СГТУ. 2012.
4. Щеголев С.С. Экспериментальное обнаружение неоднородностей в строении внешнего кольца подшипника качения колесной пары вагона С.С. Щеголев, А.Г. Мотков, В.В. Погораздов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. научн. трудов. Саратов: Изд-во СГТУ, 2013. С. 202–206.