

Обработка измерительной информации с вихретокового датчика при локализации дефектов поверхностного слоя деталей подшипников

М.А. Игнатьев, А.А. Игнатьев

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А

Аннотация: Рассматривается задача определения области дефектов поверхностного слоя деталей подшипников по данным вихретокового неразрушающего контроля. Приводятся методы обработки данных вихретокового контроля. Обосновывается возможность применения робастного метода медианной полировки для повышения информативности вихретоковых данных. В качестве инструментов локализации паттернов дефектов в вихретоковом образе объекта контроля предлагается использовать скользящее окно, расчет среднеквадратичного отклонения, а также продукционное правило, сформированное по критерию информационной энтропии Шеннона. Приводятся результаты применения разработанного алгоритма локализации на данных вихретокового контроля деталей подшипников, полученных в условиях реального производства.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, локализация, дефект, анализ данных, распознавание, поверхностный слой, интеллектуальные технологии, энтропия Шеннона, медианная полировка, задача классификации.

Введение

В условиях современного стремительного развития техники, контроль качества машиностроительных деталей является важнейшим аспектом производства, играющим ключевую роль в обеспечении надежности и долговечности продукции. Также в связи с высокой конкурентоспособностью и постоянно растущими требованиями к качеству изделий, эффективные методы контроля становятся необходимостью для любого промышленного предприятия [1, 2].

Основными задачами контроля качества являются выявление дефектов на различных этапах технологического процесса, а также предотвращение выпуска некачественной продукции, особенно это важно при производстве подшипников, так как данные изделия применяются в авиационной, автотранспортной, сельскохозяйственной, машиностроительной и других отраслях промышленности. Выход из строя детали подшипника в процессе

работы может привести к негативным последствиям: от увеличения времени простоя оборудования до угрозы безопасности людей [1-3].

Для обеспечения качества выпускаемой продукции на подшипниковых предприятиях внедряются системы контроля, основанные на различных методах детектирования дефектов изделий. К методикам неразрушающего контроля качества поверхностного слоя деталей подшипников относятся: травление, вибрационный, магнитопорошковый, вихретоковый и ряд других методов [1, 3, 5].

Одним из наиболее эффективных и экологичных методик является вихретоковый контроль, ранее его использование было ограничено развитием компьютерной техники, так как анализ и интерпретация данных (объемом около 20000 цифровых значений, см. рис. 1), полученных при помощи вихретокового преобразователя (например, ПВК-К2М), требует значительных вычислительных ресурсов. С развитием информационных технологий и эффективных методов обработки данных применение вихретокового контроля для выявления дефектов поверхностного слоя деталей из токопроводящих материалов является перспективным с точки зрения повышения степени автоматизации и производительности системы контроля качества на производстве [1, 3].

ПВК-К2М (внесён в Государственный реестр средств измерений, № 26079-03) является одним из наиболее эффективных приборов вихретокового контроля, он позволяет фиксировать как амплитудную, так и фазовую составляющую сигнала, что в свою очередь, дает возможность повысить точность анализа и интерпретации измерительной информации [3, 4].

Аппаратное обеспечение, позволяющее производить вихретоковый контроль, в совокупности с современными методами распознавания образов дает возможность идентифицировать большое количество дефектов различных видов, таких как трещины (металльные, металлургические,

шлифовальные), натирки, прижоги, срезы, забоины, заштамповки и другие [1, 3, 4]. Ранее в качестве методов анализа данных для идентификации состояния поверхностного слоя объекта контроля по вихретоковому сигналу были предложены такие подходы, как анализ изображений (сканнограмм) [7], Фурье- и вейвлет-преобразования [4, 8, 9], нейронные сети и фрактальный анализ [10, 11], а также методы машинного обучения [12].

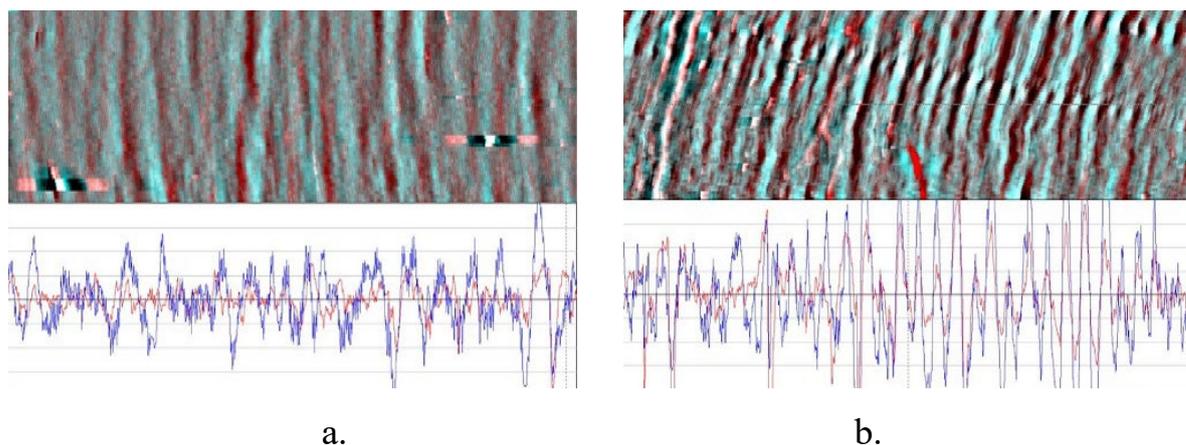


Рис. 1. – Вихретоковый образ деталей с дефектами «шлифовальный прижог» (а) и «шлифовальная трещина» (б), сверху сканнограмма всей поверхности, снизу сигнал (амплитудная и фазовая составляющие) по одному обороту

Следует отметить, что разработка системы автоматического распознавания типа дефекта требует сложной, многоступенчатой обработки вихретокового сигнала, основными этапами которой являются:

1. Первичная фильтрация сигнала – производится, как правило, аппаратными фильтрами, встроенными в вихретоковый преобразователь.
2. Сохранение данных в определенном формате на компьютере. Преобразование данных для чтения и дальнейших операций над ними.
3. Повышение информативности данных, которое может включать в себя дополнительную фильтрацию, удаление эффектов из сигнала, не связанных с состоянием контролируемой поверхности.

4. Локализация областей возможных дефектов, которая включает в себя составление правил определения аномальных сегментов в массиве данных по определенным критериям.

5. Выделение из данных информативных признаков, характеризующих состояние поверхностного слоя объекта.

6. Обучение модели классификации типов дефекта по определенным раннее признакам.

7. Объединение полученных алгоритмов, моделей в единую систему для применения в контроле качества по вихретоковым данным.

При этом, небольшие ошибки на ранних этапах обработки данных ведут к более значительным при финальном синтезе системы распознавания дефектов. Также, учитывая, что первые два шага представленного выше алгоритма являются стандартными или выполняются аппаратно, соответственно, не требуют специальных методик анализа данных, можно сделать вывод, что для снижения ошибок распознавания дефектов поверхностного слоя детали по вихретоковому сигналу необходимо получать качественный результат на этапах «повышение информативности данных» и «локализация областей возможных дефектов». Для этого могут быть применены различные методики обработки и анализа данных, основанные на математических инструментах.

Таким образом, целью данной работы является обоснованный выбор и реализация методов, позволяющих эффективно обрабатывать измерительную информацию с вихретокового датчика и локализовать дефекты поверхностного слоя деталей подшипников.

Повышение информативности данных вихретокового контроля с применением метода медианной полировки

При осуществлении вихретокового контроля на датчик могут оказывать воздействие внешние условия, что отражается в получаемом

сигнале. Поэтому перед проведением основных преобразований данные необходимо подготовить, удалив эффекты, связанные с посторонними факторами.

Так, например, на рисунке 2 видно, что данные вихретокового контроля искажены, так как в них наблюдается тренд, который мог появиться из-за перемещения датчика относительно от поверхности контролируемой детали.

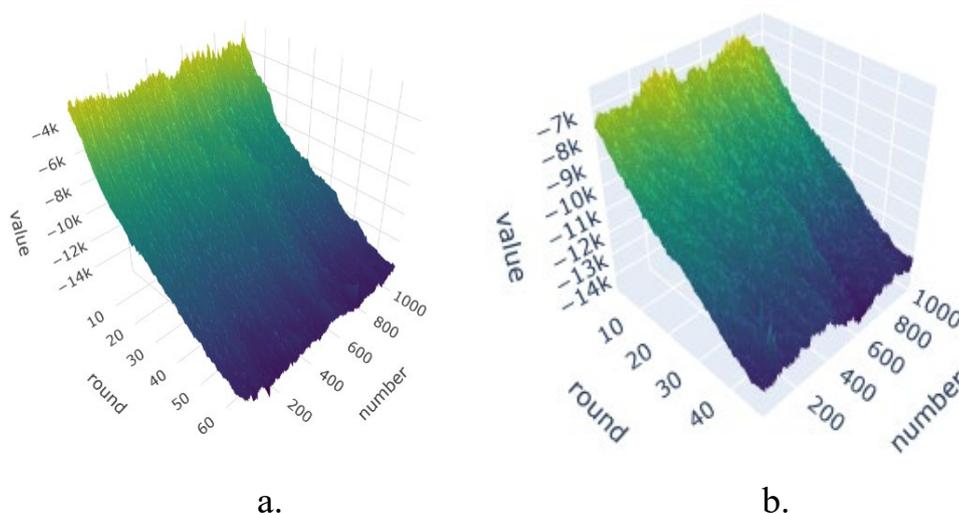


Рис. 2. – 3D графики необработанных вихретоковых сигналов (по фазовой составляющей) – а. деталь с дефектом «шлифовальный прижог», б. – деталь с дефектом «шлифовальная трещина»

Подобные посторонние эффекты в данных снижают их информативность, а, следовательно, затрудняют дальнейший расчет признаков для распознавания дефектов поверхностного слоя. Для решения данной проблемы ранее было предложено использовать Фурье- и вейвлет-преобразования [4, 8, 9], в работах Вахидовой К.Л. рассматривалась возможность применения фильтрации на основе сингулярного спектрального анализа [10, 11]. Перечисленные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, а также достаточно сложны в интерпретации.

В 70-х годах XX века американский ученый Дж. Тьюки предложил робастный метод, позволяющий удалять из двумерных массивов данных

компоненты, связанные с посторонними эффектами. Эти посторонние компоненты условно называются «эффектом столбцов» и «эффектом строк». Данный метод заключается в последовательном вычитании медиан из данных отдельно по каждой столбцу и строке до тех пор, пока медианы не станут равны нулю. Предложенная Дж. Тьюки методика была названа «медианная полировка», в ее основе лежит аддитивная модель представления данных [13, 14]:

$$x = c + r + d + \delta, \quad (1)$$

где x – значения данных, d – истинные значения, r – «эффект строк», c – «эффект столбцов», δ – случайный шум.

Учитывая, что результаты вихретокового контроля детали могут быть организованы в виде двумерного массива (который представляет собой развертку поверхности), метод медианной полировки может быть использован для удаления из вихретоковых данных посторонних эффектов. На языке Python было разработано программное обеспечение для применения метода медианной полировки. Предложенная методика позволяет удалять из вихретокового сигнала эффекты, которые не связаны напрямую с качеством поверхности объекта контроля (рис. 3).

Обработка цифровых показаний вихретокового преобразователя методом медианной полировки позволяет повысить различимость неоднородностей в общем массиве данных, а также масштабировать значения по медиане, что в свою очередь ведет к более эффективной идентификации дефектных зон поверхности в дальнейшем.

Также, стоит отметить, что применение метода медианной полировки не изменяет вид дефекта в вихретоковом образе объекта контроля, а полученные в ходе обработки данных значения схожи с результатами более сложного и ресурсоемкого метода, предложенного в работах [10, 11]. При этом, эмпирические исследования показали, что использование

предложенной методики не изменяет вид паттернов дефектов поверхностного слоя в вихретоковом образе.

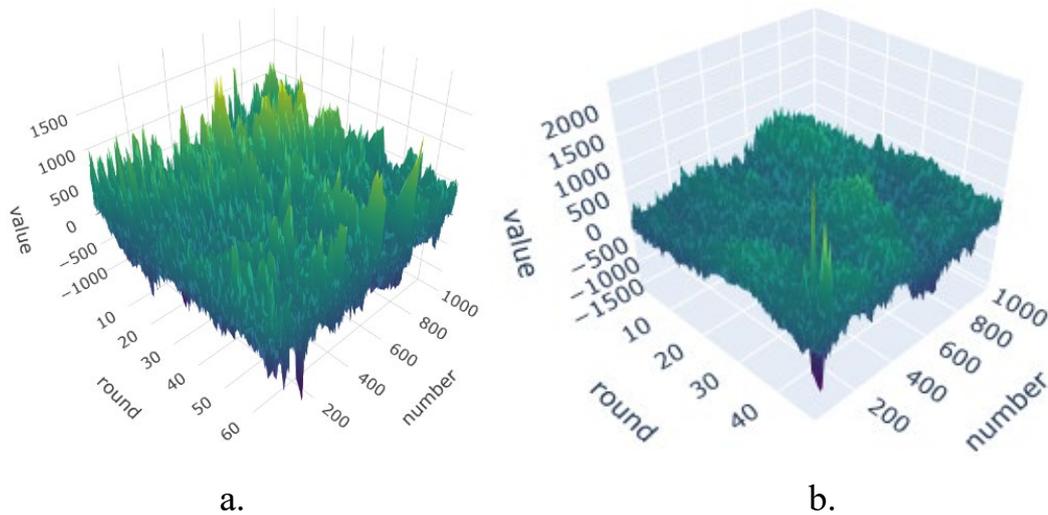


Рис. 3. – 3D графики вихретоковых сигналов (по фазовой составляющей) после применения метода медианной полировки – а. деталь с дефектом «шлифовальный прижог», б. – деталь с дефектом «шлифовальная трещина»

На рисунке 4 продемонстрирована растровая сканограмма вихретокового образа детали с дефектом «шлифовальная трещина» до и после применения метода, представленного выше.

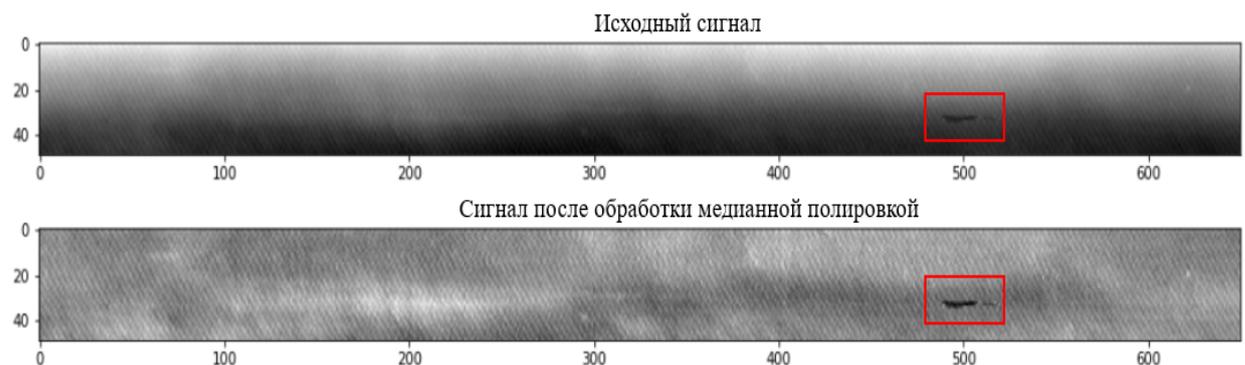


Рис 4. – Сканограмма детали с дефектом «шлифовальная трещина» до и после применения метода медианной полировки

Из визуализации результатов видно, что после обработки медианной полировкой границы дефекта стали более четкими, что позволит более точно

локализовать и классифицировать вид неоднородности на следующих этапах обработки данных.

Таким образом, метод медианной полировки является хорошим инструментом повышения информативности вихретоковых данных перед основными операциями локализации дефектов поверхностного слоя объекта контроля.

Локализация дефектных областей поверхности по данным вихретокового контроля с применением информационной энтропии Шеннона

Дефекты, как правило, занимают лишь определенные участки поверхностного слоя деталей, кроме того на одной поверхности могут располагаться несколько дефектов различных типов. При этом вихретоковый образ всего изделия включает в себя около 20000 цифровых значений. Таким образом, анализ всего массива вихретоковых данных для определения типа дефекта может значительно снизить эффективность всей системы контроля. Для решения данной проблемы могут использоваться методы локализации областей возможных дефектов в вихретоковом образе поверхности объекта контроля.

Для более точной локализации определение принадлежности области к классу «дефект» или «дефекта нет» необходимо выполнять при помощи окна, перемещающемся по вихретоковому образу с определенным шагом. Важным этапом является выбор размеров скользящего окна. Слишком большое окно может привести к снижению точности определения границ дефекта, в то время как уменьшение его размеров негативно сказывается на производительности расчетов. Эмпирическим образом были выбраны следующие параметры скользящего окна: длина (количество значений) – 50, ширина (количество оборотов) – 3, шаг окна и по вертикали, и по горизонтали вихретокового образа был принят равным 1.

Характеристики вихретокового сигнала, не содержащего образ дефекта, близки к параметрам стационарного ряда. Наличие дефекта, в свою очередь, ведет к резкому изменению значений вихретоковых данных. Таким образом, для определения наличия образа дефекта в данных необходимо использовать величины, характеризующие поведение вихретокового сигнала в заданной области. К таким величинам может быть отнесено среднеквадратичное отклонение (СКО), рассчитывающиеся по формуле [14-16]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - \mu}, \quad (2)$$

где σ – СКО, x_i – значение i -ого наблюдения, μ – среднее арифметическое значение, N – количество наблюдений.

При изменении параметров вихретокового контроля (например, зазора между деталью и преобразователем) показания датчика могут иметь разный порядок, поэтому необходимо повысить масштабируемость и адаптивности предлагаемой методики локализации. Для решения данной проблемы предлагается рассчитывать отношение СКО вихретокового сигнала сегмента контролируемой поверхности к СКО аналогичной области заранее выбранной бездефектной детали. При этом после каждого изменения параметров контроля характеристики поверхностного слоя, принятого за эталон, необходимо документировать и сохранять отдельно.

Для формирования правила классификации (идентификации наличия дефекта) области вихретокового образа по предложенному выше признаку необходимо предварительно выбрать критерий определения границ каждого класса («дефект» и «дефекта нет») в признаковом пространстве, для этого следует использовать информационный критерий и провести обучающий эксперимент на эмпирических вихретоковых данных с известными состояниями поверхности объектов контроля [12].

Эмпирические исследования показали, что классы «дефект» и «дефекта нет» наиболее разделимы в двумерном пространстве признаков, т.е. для наиболее точной локализации классификационный признак необходимо рассчитывать как по амплитудной, так и по фазовой составляющей вихретокового образа.

В качестве критерия формирования границ классов в признаковом пространстве предлагается использовать информационную энтропию Шеннона, которая определяется по формуле (3) [15-17].

$$H = -\sum_{i=1}^n p(i) \cdot \log_2 p(i), \quad (3)$$

где H – значение энтропии Шеннона, $p(i)$ – доля объектов класса i , n – общее количество возможных классов.

Для формирования правил классификации по критерию энтропии Шеннона по эмпирическим данным с известными истинными состояниями поверхности необходимо для каждой области массива (размером равным скользящему окну) вихретоковых данных рассчитать выбранные ранее классификационные признаки, после чего для каждого признака выбрать разбиение по наблюдаемому значению, которое минимизирует энтропию, после чего для каждого получившегося узла необходимо повторить эти операции пока энтропия не станет равной нулю, либо не сработает другое условие остановки.

Таким образом, с учетом особенностей задачи, а именно исключение ошибок классификации поверхности с истинным состоянием «дефект» как «дефекта нет», а также линейность границ классов в признаковом пространстве был проведен обучающий эксперимент.

В результате расчета классификационных признаков, а также применения информационной энтропии Шеннона было получено «дерево классификации» (рис. 6, где « $x[0]$ », « $x[1]$ » – относительное СКО по амплитудной и фазовой составляющей соответственно).

Стоит отметить, что в процессе обучающего эксперимента лишь в одном случае класс «дефекта нет» был распознан как «возможен дефект», при этом доля ложноположительных ошибок классификации «дефекта нет» равна 0.

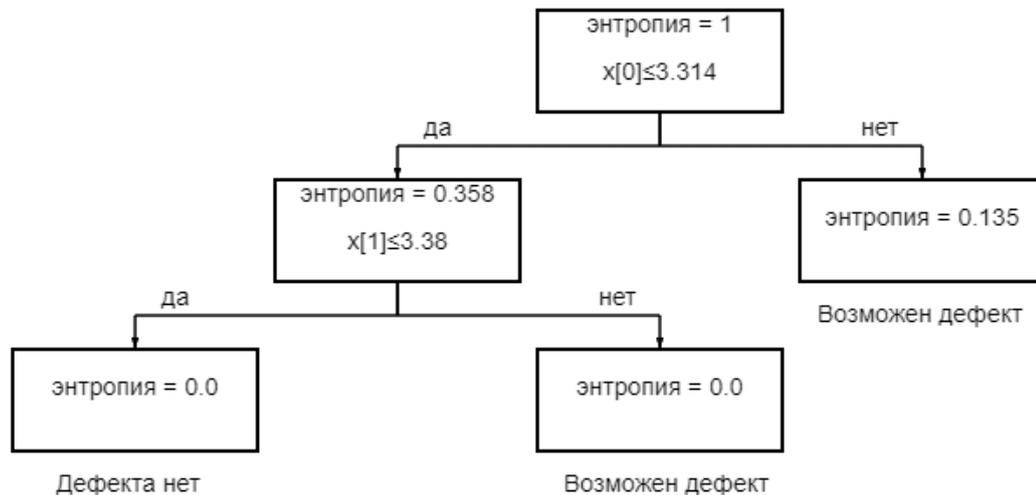


Рис. 6. – Древо классификации классов «возможен дефект» и «дефекта нет», сформированное по критерию минимизации энтропии Шеннона

В результате обучающего эксперимента по эмпирическим данным вихретокового контроля на основе представленной выше методики было сформировано следующие продукционное правило классификации возможных дефектов:

$$DB = \neg \left((k_a \leq 3.314) \wedge (k_{ph} \leq 3.38) \right), \quad (4)$$

где DB – логическое значение: «True» - класс «возможен дефект», «False» - «дефекта нет»; k_a , k_{ph} - величины относительного СКО на анализируемом области массива для амплитудной и фазовой составляющей вихретокового сигнала соответственно.

После проведения обучающего эксперимента полученные правила и алгоритмы были применены на новых производственных данных вихретокового контроля, полученных при помощи прибора ПВК-К2М. На рисунке 7 показаны карты состояний поверхностных слоев объектов

контроля (темно-фиолетовый цвет – «дефекта нет», желтый - «возможен дефект»), сформированная на основе вышепредставленной методики.

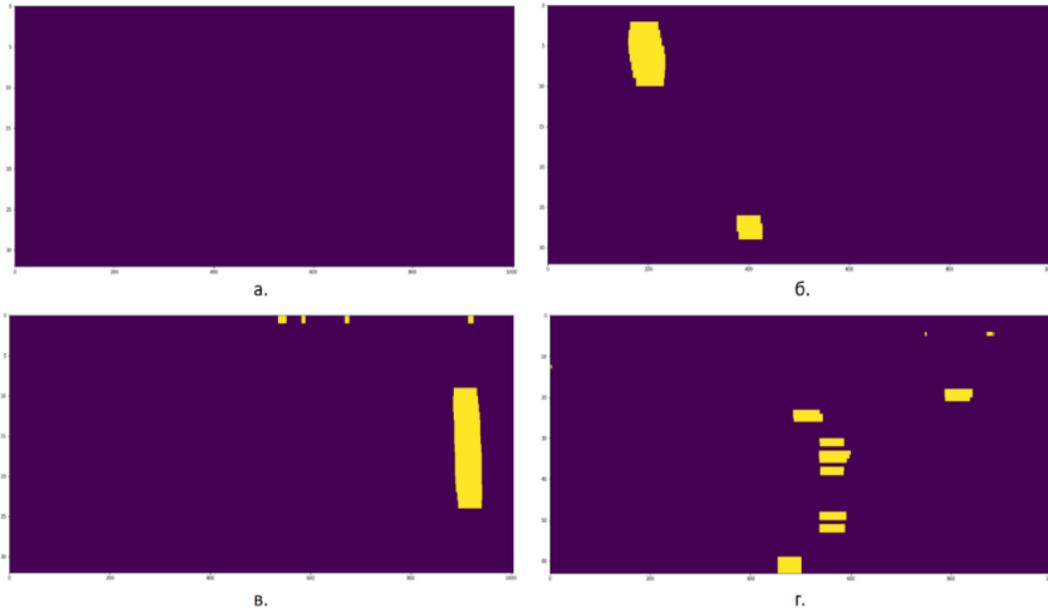


Рис. 7. Карты состояния поверхностного слоя деталей, построенные по данным вихретокового контроля: а. нет дефекта; б. наблюдается дефект («металлическая трещина»); в. наблюдается дефект («срез»); г. наблюдается дефект («металлургическая трещина»)

Таким образом, использование метода медианной полировки, скользящего окна, относительного СКО, правил классификации (составленных по критерию информационной энтропии Шеннона) позволяет с достаточной точностью осуществлять локализацию областей возможных дефектов деталей подшипников на основе анализа массива вихретоковых данных. При этом стоит отметить, что при применении данной методологии не было обнаружено ошибок проставления метки «дефекта нет» области поверхности, содержащей дефект; а среднее время обработки данных вихретокового контроля от чтения файла до построения карты состояний составляет около 5 секунд.

Заключение

Контроль качества поверхностного слоя деталей является одной из важнейших задач на подшипниковом предприятии, так как позволяет не только отбраковывать дефектные изделия, но и корректировать технологический процесс, повышая эффективность всего производства.

Представление результатов контроля в виде массива цифровых значений при использовании вихретокового метода дает возможность применять современные подходы интеллектуального анализа данных для идентификации наличия брака поверхностного слоя производимых деталей.

В данной работе было представлено описание и обоснование выбора метода медианной полировки и информационной энтропии Шеннона в качестве инструментов обработки измерительной информации с вихретокового датчика при локализации дефектов поверхностного слоя деталей подшипников. Также была выполнена реализация указанных подходов на языке программирования Python и представлены результаты обработки данных, полученных с подшипникового производства.

Таким образом, разработанное программно-алгоритмическое обеспечение является эффективным средством получения информации о состоянии поверхностного слоя объекта контроля, что, в свою очередь, позволяет значительно снизить нагрузку на модуль распознавания типов дефектов и повысить производительность системы контроля качества изделий на производстве.

Литература

1. Игнатьев А. А., Горбунов В. В., Игнатьев С. А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2023. 240 с.

2. Паштова Л. Г. Актуальные вопросы организации и управления производством на предприятии // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442
3. Рудюк М. Ю., Леонтьев А. А., Гурьева А. А. Методы контроля и технологические методы обеспечения качества подшипников качения // Актуальные вопросы современных научных исследований: сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 05 февраля 2024 года. Пенза: Наука и Просвещение, 2024. С. 118-122.
4. Игнатъев А. А., Шумарова О. С., Игнатъев С. А. Распознавание дефектов поверхностей качения колец подшипников при автоматизированном вихретоковом контроле с применением вейвлет-преобразований: моногр. Саратов: Изд-во СГТУ, 2017. 108 с.
5. Петров О. Н., Сокольников А. Н., Верецагин В. И., Агровиченко Д. В. Методы неразрушающего контроля. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального университета, 2021. 132 с.
6. Шубочкин А. Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. Москва: Спектр, 2014. 288 с.
7. Бахтеев А.Р. Совершенствование контроля качества деталей подшипников вихретоковым методом на основе автоматизации распознавания дефектов поверхностей качения с использованием искусственных нейронных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, СГТУ, 2007. 16 с.
8. Пчелинцев Д.О. Автоматизация распознавания локальных дефектов поверхностного слоя колец подшипников с применением вейвлет-преобразований при вихретоковом контроле в системе мониторинга: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, СГТУ, 2009. 16 с. 33.

9. Пчелинцев А.С. Автоматическое распознавание дефектов деталей подшипников при вихретоковом контроле на основе интегральной оценки спектров вейвлет-коэффициентов информационных сигналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, СГТУ, 2010. 19 с.

10. Вахидова К. Л. Автоматизация вихретокового контроля и диагностики дефектов поверхностей деталей подшипников с использованием фрактального анализа, и нейронных сетей: дис. ... канд. техн. наук. Грозный: ГГНТУ имени акд. М.Д. Миллионщикова, 2023. 143 с.

11. Вахидова К.Л., Минцаев М.Ш., Исаева М.Р., Пашаев В.В. Алгоритм распознавания основных дефектов поверхностей колец подшипников с применением метода фрактальной размерности и нейронных сетей // Инженерный вестник Дона, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7499.

12. Игнатъев М. А. Применение машинного обучения и интеллектуального анализа данных в автоматизированной системе неразрушающего вихретокового контроля поверхностного слоя деталей подшипников // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 26-34.

13. Hoaglin, D., Mosteller, F., Tukey, J.: Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. USA: «Wiley», 2000. 480 p.

14. Mosteller F., Tukey J. Data Analysis and Regression. USA: Addison-Wesley, 1977. 588 p.

15. Сирота А. А. Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в MATLAB. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. 384 с.

16. Протодяконов А.В., Пылов П.А., Садовников В.Е. Алгоритмы Data Science и их практическая реализация на Python. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 392 с.

17. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell System Technical Journal. 1948. № 27 (3). pp. 379–423.

References

1. Ignat'ev A. A., Gorbunov V. V., Ignat'ev S. A. Monitoring tekhnologicheskogo protsessa kak element sistemy upravleniya kachestvom produktsii [Process monitoring as an element of the product quality management system]. Saratov: SGTU, 2023. 240 p.

2. Pashtova L. G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2442

3. Rudyuk M. Yu., Leont'ev A. A., Gur'eva A. A. Aktual'nye voprosy sovremennykh nauchnykh issledovaniy: sbornik statey IX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 05 fevralya 2024 goda. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2024. pp. 118-122.

4. Ignat'ev A. A., Shumarova O. S., Ignat'ev S. A. Raspoznavanie defektov poverkhnostey kacheniya kolets podshipnikov pri avtomatizirovannom vikhretokovom kontrole s primeneniem veyvlet-preobrazovaniy: monogr. [Detection of defects in rolling surfaces of bearing rings during automated eddy current control using the wavelet transform: monograph] Saratov: Izd-vo SGTU, 2017. 108 p.

5. Petrov O. N., Sokol'nikov A. N., Vereshchagin V. I., Agrovichenko D. V. Metody nerazrushayushchego kontrolya [Methods of non-destructive testing]. Krasnoyarsk: Izd-vo Sibirskogo federal'nogo universiteta, 2021. 132 p.

6. Shubochkin A. E. Razvitie i sovremennoe sostoyanie vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya [Development and current state of the eddy current method of non-destructive testing]. Moskva: Spektr, 2014. 288 p.

7. Bakhteyev A.R. Sovershenstvovaniye kontrolya kachestva detaley podshipnikov vikhretokovym metodom na osnove avtomatizatsii raspoznavaniya

defektov poverkhnostey kacheniya s ispol'zovaniyem iskusstvennykh neyronnykh setey: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the quality control of bearing parts by the eddy current method based on automation of the recognition of rolling surface defects using artificial neural networks: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences]. Saratov, SGTU, 2007. 16 p.

8. Pchelintsev D.O. Avtomatizatsiya raspoznavaniya lokal'nykh defektov poverkhnostnogo sloya kolets podshipnikov s primeneniem veyvlet-preobrazovaniy pri vikhretokovom kontrole v sisteme monitoringa: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Automation of recognition of local defects in the surface layer of bearing rings using wavelet transformations during eddy current control in the monitoring system: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences]. Saratov, SGTU, 2009. 16 p.

9. Pchelintsev A.S. Avtomaticheskoe raspoznavanie defektov detaley podshipnikov pri vikhretokovom kontrole na osnove integral'noy otsenki spektrov veyvlet-koeffitsientov informatsionnykh signalov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. Nauk [Automatic detection of defects in bearing parts during eddy current control based on integral estimation of the spectra of the wavelet coefficients of information signals: abstract of the dissertation. ... Candidate of Technical Sciences]. Saratov, SGTU, 2010. 19 p.

10. Vakhidova K. L. Avtomatizatsiya vikhretokovogo kontrolya i diagnostiki defektov poverkhnostey detaley podshipnikov s ispol'zovaniem fraktal'nogo analiza, i neyronnykh setey: dis. ... kand. tekhn. Nauk [Automation of eddy current control and diagnostics of defects in the surfaces of bearing parts using fractal analysis and neural networks: dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Groznyy: GGNTU imeni akd. M.D. Millionshchikova, 2023. 143 p.

11. Vakhidova K.L., Mintshev M.Sh, Isaeva M.R, Pashaev V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7499.



12. Ignat'ev M. A. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. 2024. № 3. pp. 26-34.
13. Hoaglin, D., Mosteller, F., Tukey, J.: Understanding Robust and Exploratory Data Analysis. USA: «Wiley», 2000. 480 p.
14. Mosteller F., Tukey J. Data Analysis and Regression. USA: Addison-Wesley, 1977. 588 p.
15. Sirota A. A. Metody i algoritmy analiza dannykh i ikh modelirovanie v MATLAB [Methods and algorithms of data analysis and their modeling in MATLAB]. Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 2016. 384 p.
16. Protod'yakonov A.V., Pylov P.A., Sadovnikov V.E. Algoritmy Data Science i ikh prakticheskaya realizatsiya na Python [Data Science algorithms and their practical implementation in Python]. Moskva; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022. 392 p.
17. Shannon C. E. Bell System Technical Journal. 1948. № 27 (3). pp. 379–423.

Дата поступления: 27.12.2024

Дата публикации: 25.02.2025