

**Драган А. В., Парфиевич А. Н., Сокол В. А.**

## ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА МНОГОВАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ВЕКТОРНОГО КВАНТОВАНИЯ

**Введение.** В настоящее время для выявления текущего состояния зубчатых передач и приводов часто используют разборку всего изделия и производят замену его составляющих, основываясь на нормативных сроках эксплуатации. Это приводит к тому, что срок службы всего изделия сокращается в силу того, что нарушается приработка контактируемых деталей. Поэтому проблема сборки-разборки зубчатого привода в процессе эксплуатации остаётся весьма актуальной. Ее можно минимизировать, перейдя к обслуживанию механического изделия в ходе его эксплуатации по фактическому состоянию. В качестве критериев оценки текущего состояния рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес используют как акустические, так и вибрационные параметры, в значительной степени отвечающие принципам безразборной диагностики.

Локальные повреждения рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес напрямую влияют на надежность и долговечность диагностируемых механических приводов, а также непосредственно связаны с повышением виброакустической активности рассматриваемой передачи. Мониторинг зубчатых передач и приводов, основанный на анализе виброакустической активности, в силу своей изученности, находит применение при изготовлении и диагностировании машиностроительной продукции как отечественных, так и зарубежных производителей. Это обусловлено тем, что специалист-диагност, благодаря развитости и высокой чувствительности диагностического оборудования в данной области, имеет возможность выявлять зарождающиеся локальные повреждения зубчатых колес, локализовать повреждения и наблюдать за скоростью их развития.

**Постановка задачи.** Основываясь на результатах работ [1, 2, 3], использование диагностики по одному из параметров локальных повреждений зубьев зубчатых колес показало достаточно высокие результаты. Использование предлагаемой нейросетевой модели, сформированной на основе анализа акустической активности анализируемого привода, может быть затруднено при мониторинге состояния, например, коробки передач автотракторной техники, когда помимо зубчатых колес самого объекта имеется ряд других элементов, вносящих свой вклад в итоговое формирование анализируемого сигнала. Используемое при этом оборудование обладает высокой чувствительностью, что может привести к чрезмерной перегруженности информацией анализируемого сигнала и снизить вероятность выявления зарождающихся либо слаборазвитых дефектов отдельных элементов сложных приводов при высокой акустической активности других элементов механической системы.

Применение же экспертного варианта диагностирования сложных механических систем на основе зубчатых передач затруднено необходимостью анализа большого числа его составляющих, что в свою очередь приведет к затягиванию процедуры диагностики.

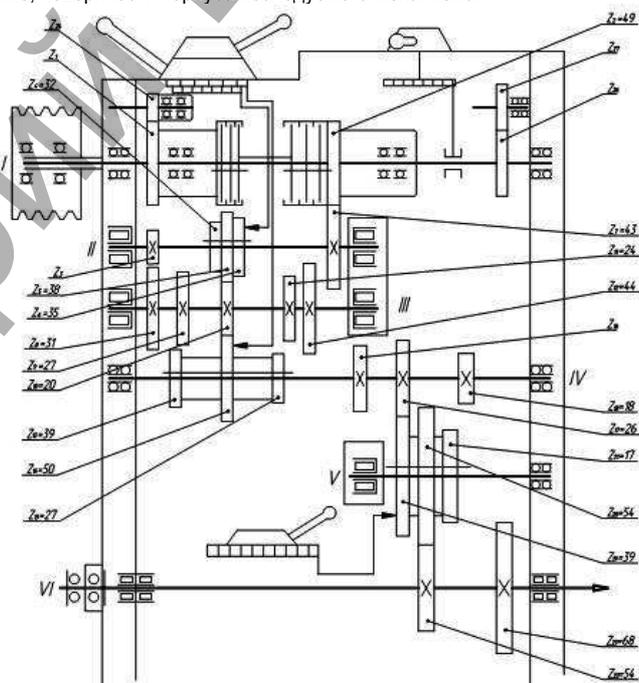
Также следует отметить, что повышению надежности и снижению вероятности внезапных отказов при быстро развивающихся локальных повреждениях рабочих поверхностей зубьев может способствовать подход комплексной диагностики, когда анализ производится как по акустическому шуму, так и по вибрации, сопровождающих работу механических систем и приводов на основе зубчатых передач.

В основу постановки диагноза закладывается тот факт, что при появлении локального повреждения рабочей поверхности зуба на временной характеристике как акустического, так и вибрационного

сигналов появляются периодические импульсы, а также возникают частотные, амплитудные и иные модуляции сигнала, приводящие к отражению на спектральных характеристиках [4, 5, 6, 7].

**Объект и предмет экспериментальных исследований.** Одним из объектов экспериментальных исследований, в ходе которых была опробована предлагаемая методика, являлась коробка скоростей привода главного движения токарного станка SN-501, кинематическая схема которого изображена на рисунке 1.

В качестве источника информации использовался вибрационный сигнал, сформированный аппаратно-программным комплексом [8] на основе данных, полученных с акселерометра AP-98 (рисунок 2), установленного с помощью специального магнитного основания AM04 (рисунок 3) на корпусе коробки скоростей диагностируемого объекта. Установка акселерометра осуществляется на горизонтальную поверхность корпуса для измерения вибраций вдоль вертикальной оси. Также возможно производить быструю переустановку датчика на магнитном основании на различные, в том числе неплоские, поверхности корпуса исследуемого механизма.



**Рисунок 1** – Кинематическая схема коробки скоростей привода главного движения токарного станка SN-501

Для оценки эффективности разрабатываемой методики диагностирования многовального зубчатого привода были изготовлены экспериментальные зубчатые колеса, на которых моделировалось локальное повреждение рабочей поверхности зуба различной степени развитости (повреждение 25%, 50% и 75% поверхности зуба) (рисунок 4) и отсутствие зуба шестерни  $Z=43$ . Исходя из этого, были сформированы классы состояния рассматриваемой экспериментальной шестерни  $Z=43$  (таблица 1).

**Драган Александр Вячеславович**, к.т.н., ректор Брестского государственного технического университета.

**Парфиевич Андрей Николаевич**, м.т.н., аспирант кафедры технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

**Сокол В.А.**, магистр технических наук, ст. преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.



Рисунок 2 – Общий вид акселерометра AP-98

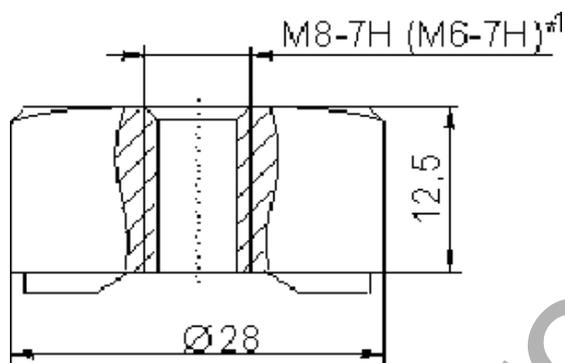


Рисунок 3 – Крепежный магнит AM04

Таблица 1 – Классификация состояния зуба экспериментальной шестерни z=43

№ класса	Состояние зуба
1	Без дефектов
2	25% длины зуба повреждено
3	50% длины зуба повреждено
4	75% длины зуба повреждено
5	Скол зуба

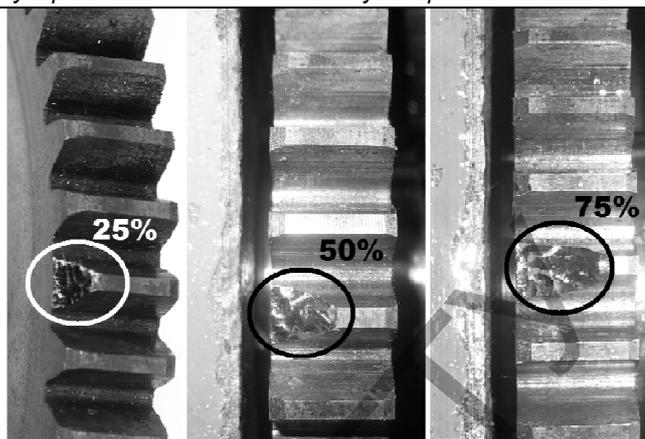


Рисунок 4 – Экспериментальная шестерня z=43 с эксплуатационным местным дефектом зуба

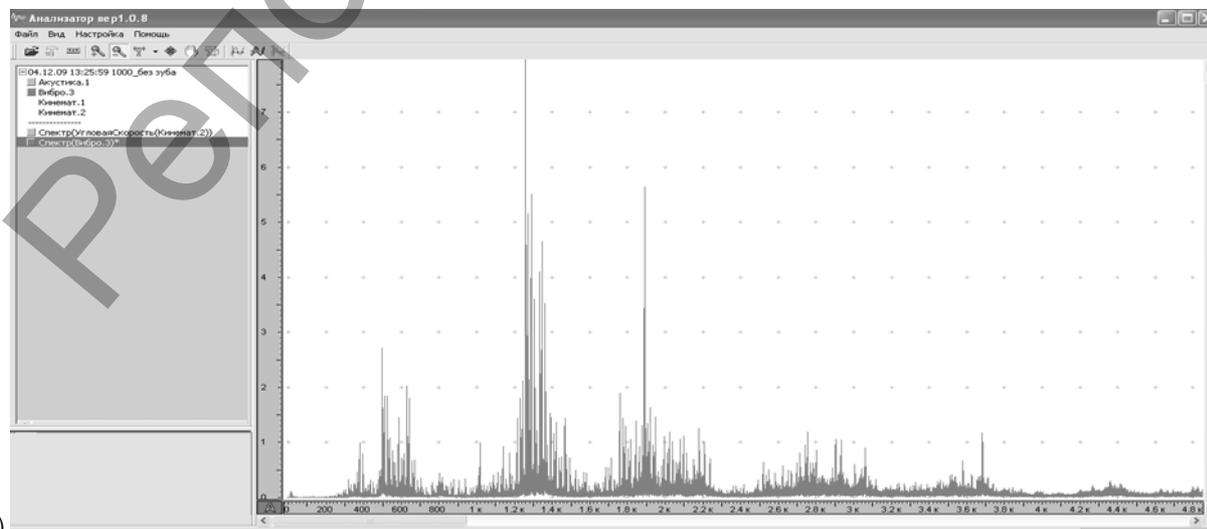
Одновременное применение преобразователей угловых перемещений на входном и выходном валах привода дало возможность с высокой точностью определять частоты вращения входного и выходного вала и синхронизировать вибрационные измерения с кинематическими, что позволило упростить идентификацию частотных составляющих на спектральных характеристиках.

Предметом анализа и обработки являлись спектральные характеристики вибрационного сигнала, имеющие достаточно высокую чувствительность к изменению состояния зубчатых колес, в том числе и в результате локальных повреждений, исследуемых в данной работе.

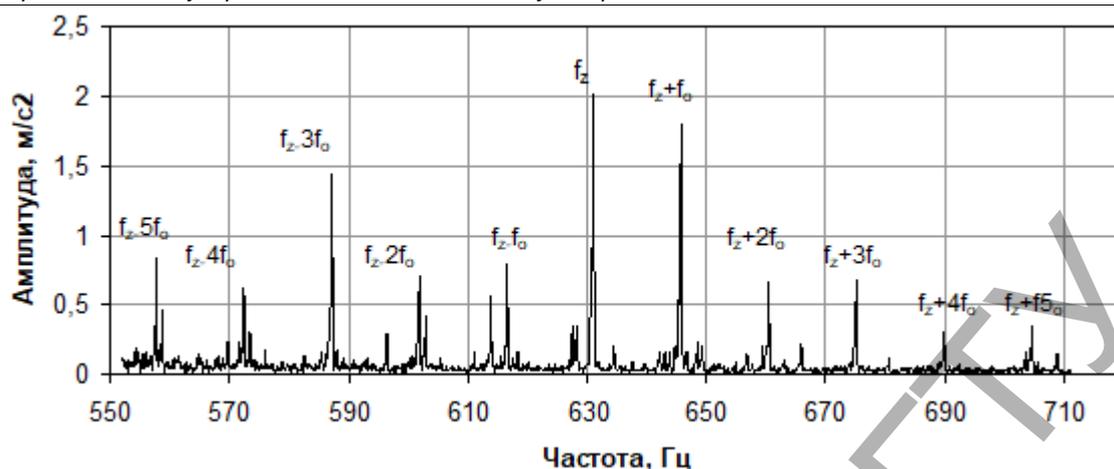
**Результаты измерений и обработки данных.** Известно, что при эксплуатации любого привода на основе зубчатых передач в спектре его колебаний можно выявить целый ряд характерных частотных составляющих (рисунок 5), обусловленных спецификой работы данных механизмов [4, 5, 6 и др.]:

- низкочастотные составляющие, кратные частоте вращения элементов привода  $f_0$ ;
- высокочастотные составляющие с частотами пересопряжения зубьев всех зубчатых пар  $f_z$ , а также на кратных им частотах;
- составляющие колебаний с комбинированными частотами  $lf_z \pm nf_0$ , возникающие вследствие разного рода модуляций сигнала при отклонении состояния зубчатой передачи от нормального.

Следующим шагом стало использование функции «Анализ гармоник» [9] для автоматического получения абсолютных значений частот и амплитуд отмеченных выше частотных составляющих, несущих диагностическую ценность, и формирования 120 наборов данных для обучения, характеризующих состояние рабочей поверхности анализируемой шестерни, по 24 набора для каждого из



а)



б)

Рисунок 5 – Общий вид спектра виброускорений в области частот до 5 кГц с высоким разрешением по частоте (а) и фрагмент исходного спектра виброускорений в области частот  $f_z-5f_0$  до  $f_z+5f_0$  шестерни второго вала  $Z=43$  с локальным повреждением рабочей поверхности зуба (б)

Таблица 2 – Достоверность выявления повреждения рабочей поверхности зуба шестерни  $Z=43$  коробки скоростей токарного станка SN-401 по вибрации с применением сети векторного квантования, построенной на нейронах Кохонена

Классы диагностируемых параметров зубчатого колеса	Точность постановки диагноза, %				
	Цельный зуб	повреждение 25% зуба	повреждение 50% зуба	повреждение 75% зуба	Скол зуба
Цельный зуб					
Цельный зуб	100%	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	-	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба					
Цельный зуб	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	95,5%	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	5,5%	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба					
Цельный зуб	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	100%	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба	-	-	-	-	-
75% повреждения зуба					
Цельный зуб	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	-	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	100%	-
Скол зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба					
Цельный зуб	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	-	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба	-	-	-	-	100%

классов состояния соответственно. Также отдельно была подготовлена тестируемая выборка, не участвующая в обучении, – 30 образов, по 6 для каждого класса соответственно. Данные наборы данных были сформированы аналогично наборам, отображенным в работах [1, 3].

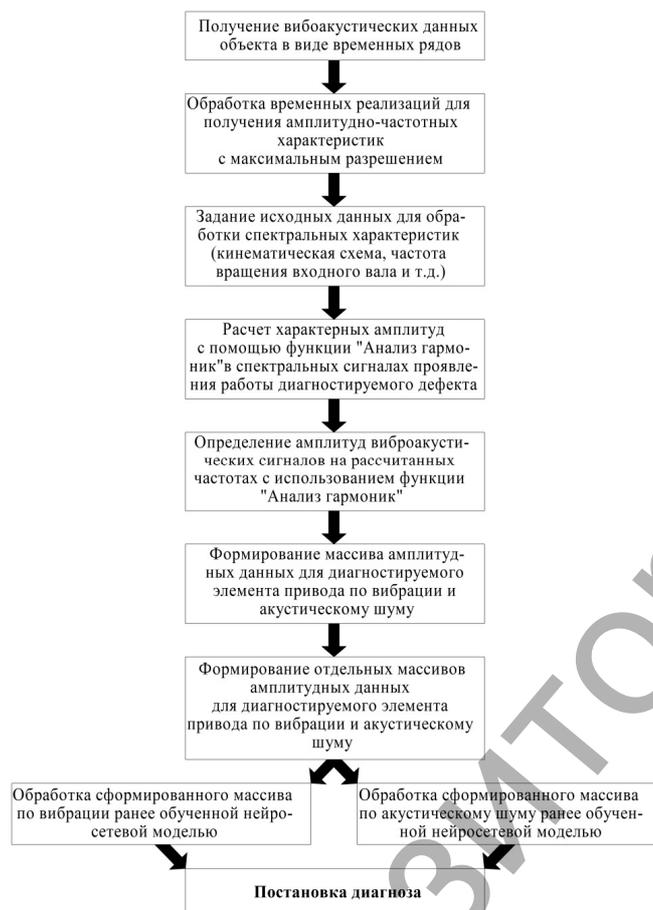
В качестве инструмента решения поставленной задачи использовалась сеть векторного квантования, построенная на нейронах Кохонена, хорошо зарекомендовавшая себя в работах [1, 2, 3].

Согласно приведённой таблице, общая точность выявления локального повреждения рабочей поверхности зуба шестерни  $Z=43$  в рамках рассматриваемого зубчатого привода искусственной нейросетевой моделью составила 97,75%. Причем во всех случаях ошибочные результаты соответствовали соседнему классу состояния зуба, а колеса с неповрежденными зубьями оценивались исправными безошибочно. Однозначно можно утверждать, что используемый набор параметров, как для вибрационного, рассматриваемо-

го в рамках данной работы, так и акустического, изложенного в работах [1, 2, 3], сигналов для описания состояния поврежденных зубчатых колес является минимально достаточным для устойчивой работы нейросетевого анализатора по предоставленным состояниям рабочей поверхности зуба.

Используя нейросетевую модель, описанную в работах [1,3], дополним ее новым параметром (вибрацией) контроля состояния рабочей поверхности зуба шестерни. Это будет направлено на совершенствование процедуры диагностирования за счет комплексной оценки виброакустической активности анализируемого объекта.

Исходя из этого, алгоритм постановки диагноза по двум параметрам будет выглядеть следующим образом:



**Рисунок 6** – Алгоритм постановки диагноза на основе анализа виброакустической активности элементов зубчатого привода с использованием нейросетевых моделей

**Заключение.** Предлагаемый подход при диагностировании локальных повреждений рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес в составе сложных многовальных приводов по их виброакустической активности с использованием классических нейросетевых моделей

показал достаточно хороший результат при ограниченном объеме обучаемых данных. Данный вариант диагностики минимизирует участие человека при постановке диагноза, тем самым повышая ее объективность и скорость.

Безразборная диагностика сложных зубчатых передач и приводов одновременно по вибрации и акустическому шуму с использованием в качестве инструмента постановки диагноза искусственных нейросетевых моделей позволяет оценивать не только общее техническое состояние объекта, но и технологические и эксплуатационные погрешности зубчатых колес, повышая тем самым их надежность при эксплуатации.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган, А.В. Выявление локальных повреждений зубьев зубчатых колес многовальных приводов с использованием методов искусственного интеллекта / А.В. Драган, А.Н. Парфиевич // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2017. – № 4. – С. 27–31.
2. Драган, А.В. Акустическая диагностика многовальных зубчатых приводов на основе использования искусственных нейронных сетей / А.В. Драган, А.Н. Парфиевич, С.В. Безобразов // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2016. – № 4. – С. 2–6.
3. Драган, А.В. Использование нейросетевого детектора при акустической диагностике многовальных зубчатых приводов / А.В. Драган, А.Н. Парфиевич, С.В. Безобразов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2017. – № 2. – С. 58–70.
4. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
5. Anil Jacob and Dr. Y. I. Sharaf-Eldeen Диагностирование зубчатой передачи с помощью нового метода контроля состояния роторного оборудования: перевод с англ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/d\\_zub\\_peredach.shtml](http://www.vibration.ru/d_zub_peredach.shtml).
6. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
7. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования: учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.]. – Омск: НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
8. Драган, А.В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А.В. Драган, И.П. Стецко, Д.А. Ромашко, Н.В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – № 4. – С. 17–26.
9. Разработка методов и мобильных средств диагностики механических систем автотракторной техники в процессе ее эксплуатации: отчет о НИР № ГБ 11/101 (аннотированный) / Брестский государственный технический университет; руководитель работы А.В. Драган; № госрегистрации 20111589. – Брест, 2012. – 17 с.

Материал поступил в редакцию 20.11.2018

#### DRAGAN A.V., PARFIEVICH A.N., SOKOL V.A. Vibroacoustic diagnostics of multi-shaft gear drives are based on the use of neural network vector quantization

The article considers the possibility of diagnosing local damage to the working surfaces of the gear teeth as part of a multi-shaft gear drive based on the analysis of the vibroacoustic signal using a neural network of vector quantization on the example of the speed box of the lathe SN-501. The proposed approach has shown rather high efficiency and accuracy of detection of the damaged gear wheel as a part of the considered object in the conditions of high vibroacoustic activity of all its components.