

УДК 620.179.18

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В СОСТАВЕ МНОГОВАЛЬНОГО ПРИВОДА

NEURAL NETWORK METHOD OF ACOUSTIC DIAGNOSTICS OF LOCAL DAMAGE TO GEARS AS PART OF A MULTI-SHAFT DRIVE

А. Г. Баханович,

ректор УО «Брестский государственный технический университет», д-р техн. наук, доцент,
г. Брест, Республика Беларусь

А. Н. Парфиевич,

заведующий кафедрой прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет»,
канд. техн. наук, г. Брест, Республика Беларусь

В. А. Сокол,

старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей УО «Брестский государственный
технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

A. Bakhovich,

Rector of the El "Brest State Technical University", Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Brest, Republic of Belarus

A. Parfievich,

Head of the Department of Applied Mechanics of the El "Brest State Technical University", PhD, Brest, Republic of Belarus

V. Sokol,

Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering and Automobile Operation of the El "Brest State
Technical University", Brest, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 18.05.2022.

В статье рассмотрен нейросетевой подход акустической диагностики локального повреждения зуба зубчатого колеса многовального привода, основанный на синтезе амплитудно-частотного анализа акустического сигнала и искусственных нейронных сетей. Предложена искусственная нейросетевая модель, позволяющая выявлять поврежденные зубчатые колеса в составе многовальных приводов с разной кинематической структурой и оценивать степень развитости локальных дефектов. Эффективность предлагаемого подхода подтверждена экспериментально.

The article considers a neural network approach to acoustic diagnostics of local damage to a gear tooth of a multi-shaft drive, based on the synthesis of an amplitude-frequency analysis of an acoustic signal and artificial neural networks. An artificial neural network model is proposed that makes it possible to identify damaged gears in multi-shaft drives with different kinematic structures and to assess the degree of development of local defects. The effectiveness of the proposed approach has been experimentally confirmed.

Ключевые слова: акустическая диагностика, нейросетевой метод, зубчатые передачи, локальный дефект, многовальный привод.

Key words: acoustic diagnostics, neural network method, gears, local defect, multi-shaft drive.

Введение.

Практически все известные методики акустической диагностики повреждений зубчатых колес многовальных приводов обладают одним из следующих недостатков [1]:

- возможностью диагностирования оборудования, работающего только при квазистационарных и безударных режимах;
- отсутствием алгоритмов отделения информативной составляющей сигнала от вибрации, вызванной внешними воздействиями на объект диагностики;
- низкой степенью автоматизации выявления типа повреждения зубчатого колеса, обуславливающей необходимость наличия высококвалифицированного персонала в области акустической диагностики;

– наличием жестких алгоритмов, исключающих возможность изменения программной конфигурации вычислительных средств.

Анализ литературных источников [2, 3, 4], посвященных оценке технического состояния зубчатых колес многовальных приводов, показал, что одним из наиболее перспективных из существующих методов неразрушающего контроля является виброакустический, основанный на взаимосвязи степени повреждения зуба зубчатой передачи и параметров ударных импульсов в зубчатом зацеплении.

При мониторинге технического состояния механических приводов на основе зубчатых передач использование экспертного анализа затруднено вследствие наличия значительного числа источников акустической активности, формирующих итоговый анализируемый сигнал. Для оценки состояния каждого элемента рассматриваемого привода необходимо наличие определенного перечня критериев. Вследствие этого необходимо рассмотреть возможность использования синтеза амплитудно-частотного анализа акустического сигнала и искусственных нейронных сетей, позволяющего формировать массив информативных составляющих анализируемого сигнала [5, 6, 7], его автоматизированную обработку и выявление вида повреждения зубчатого колеса. Это позволит усовершенствовать процедуру диагностирования локальных повреждений зубчатых колес в составе многовального привода.

Нейросетевой метод диагностики.

Эффективность мониторинга и диагностики состояния многовального привода на основе зубчатых колес зависит от числа составляющих анализируемого сигнала, доступных для измерения и анализа с представлением в виде спектра посредством преобразования Фурье. В применяемых анализаторах разрешение спектра составляет 4000–8000 линий, что приводит к потере некоторых составляющих, характеризующих техническое состояние исследуемого объекта. Поэтому на этапе сбора информации необходимо использовать контрольно-диагностическое оборудование, позволяющее фиксировать максимальный объем информации с достаточной разреженностью [8].

С точки зрения диагностики наиболее ценным является следующий ряд частотных составляющих, изменение амплитуд которых характеризует состояние исследуемого объекта [6, 7]:

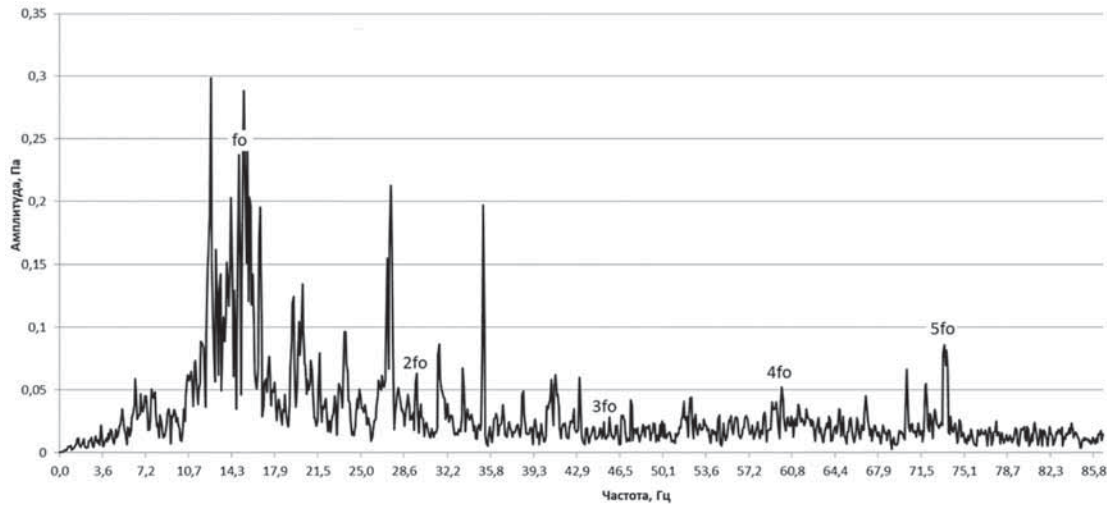
- 1) оборотные составляющие зубчатых колес f_0 и кратные им, соответствующие частоте вращения зубчатого колеса кинематической цепи (рис. 1, а);
- 2) зубцовые составляющие зубчатых колес f_z и кратные им, соответствующие частоте пересопряжения зубьев зубчатых колес (рис. 1, б);
- 3) комбинированные частотные составляющие $m \cdot f_z \pm k \cdot f_0$, появляющиеся при прохождении зоны зубозацепления локального повреждения зубчатого колеса [9, 10, 11] (рис. 1, в).

В ходе собственных экспериментальных исследований было установлено, что объем анализируемых данных для выявления поврежденного зубчатого колеса в составе многовального привода может быть ограничен: зубцовой частотой f_z и 4 кратным ей гармоникам, оборотной частотой f_0 и 4 кратным ей гармоникам, а также 5 комбинированными $m \cdot f_z \pm k \cdot f_0$ частотами по обе стороны от f_z и $m \cdot f_z$ [12]. Вычисление автоматизировано и реализовано в рамках используемого диагностического комплекса на основе функции «Анализ гармоник» (табл. 1) [8].

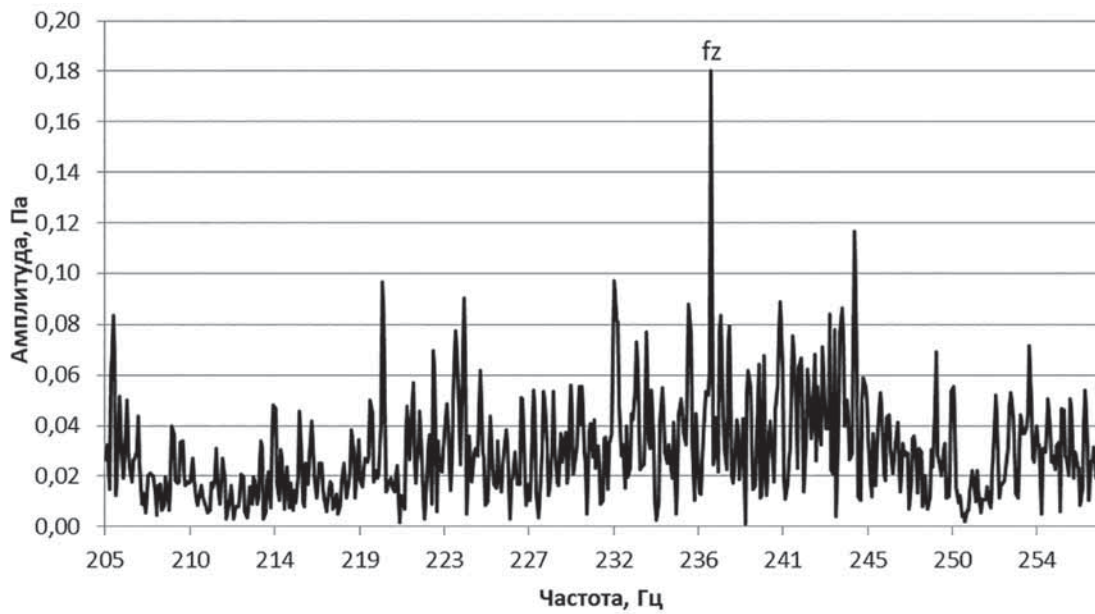
Таблица 1

Экспериментальные данные, характеризующие состояние анализируемого зубчатого колеса

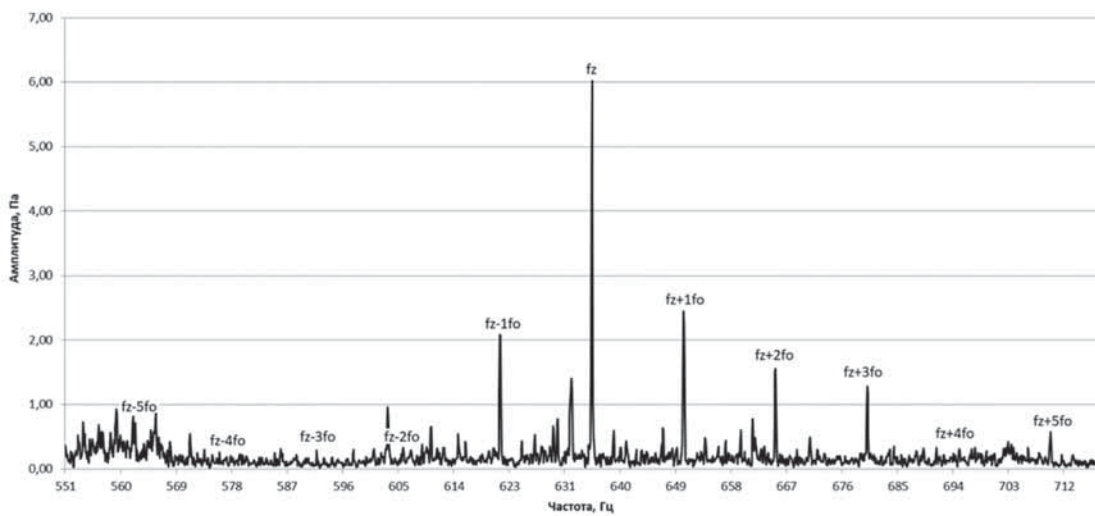
i	Амплитуды гармоник											
	оборотной частоты f_{oi}	зубцовой частоты f_{zi}	модулированных боковых полос $f_{zi} \pm i f_{oi}$									
			j = -5	j = -4	j = -3	j = -2	j = -1	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4	j = 5
1	0,067	2,73	1,06	0,89	0,74	1,28	1,65	0,96	1,14	0,46	0,46	0,15
2	0,032	0,78	0,58	0,48	1,33	0,88	1,03	0,55	0,14	0,48	0,25	0,07
3	0,017	0,67	0,84	0,13	0,16	0,41	0,22	0,15	0,17	0,72	0,20	0,44
4	0,023	0,06	0,05	0,06	0,06	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09
5	0,028	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05	0,11	0,03	0,02	0,02	0,03



а)



б)



в)

Рис. 1. Фрагменты спектра акустического сигнала

В качестве объекта экспериментальных исследований использована коробка скоростей привода главного движения токарного станка SN-501 [12].

На шестерне вала II $z = 43$ имитировался локальный дефект рабочей части зуба различной величины (25, 50, 75 % длины по вершине зуба и без зуба) [12]. Результаты, полученные при использовании серийных колес, приняты эталонными.

Для решения задачи классификации состояния зуба экспериментальной шестерни $z = 43$ полученный объем экспериментальных данных разделен на 5 классов в зависимости от состояния зуба (технически исправное зубчатое колесо, 25, 50, 75 % длины по вершине зуба повреждено и без зуба).

В качестве классификатора использована классическая искусственная нейронная сеть, построенная на нейронах Кохонена и имеющая следующую структуру (рис. 2) [13]:

- 1) первый слой, состоящий из 60 нейронов, формируется на основе функции «Анализ гармоник» (см. табл. 1) и предназначен для распределения входных сигналов на нейроны второго слоя;
- 2) второй слой, состоящий из 30 нейронов, определяется экспериментально и осуществляет кластеризацию входного пространства образов [13, 14, 15];
- 3) третий слой, состоящий из 5 линейных нейронных элементов, осуществляет отображение кластеров, сформированных предыдущим слоем.

Алгоритм обучения сформированной искусственной нейронной модели представлен в [13–15] и представляет собой последовательность следующих шагов:

- 1) случайная инициализация весовых коэффициентов нейронов слоя;
- 2) распределение входного образа из обучающей выборки на нейронную сеть и вычисление евклидова расстояния между входным образом и весовыми векторами нейронных элементов слоя; нейронного элемента-победителя с соответствующим номером; выходного значения нейрона-победителя; модификация весовых коэффициентов нейрона-победителя;

3) процесс повторяется для всех входных образов;

4) обучение производится до желаемой степени согласования между входными и весовыми векторами.

В качестве обучающей выборки сформировано 120 образов — по 24 образа для каждого из 5 классов соответственно. Тестовая выборка сформирована из 30 образов — по 6 для каждого класса соответственно. Представленная нейронная сеть имеет достаточную точность классификации, равную $\approx 97\%$ [12].

В качестве исследуемых объектов выбраны зубчатые колеса коробки передач универсального токарного станка модели SN-501:

- 1) шестерня ($z = 43$, $m = 3$ мм), имеющая локальный дефект рабочей части вершины профиля одного зуба (рис. 3, а);
- 2) блок шестерен ($z = 38$, $z = 35$, $z = 32$) с систематическими погрешностями профиля, осуществленными радиальным смещением долбяка в процессе их изготовления, а также с увеличенным боковым зазором ведущей шестерни вала II (рис. 3, б).

Наличие погрешности профиля приводит к возникновению на спектре новых частот с относительно высокими амплитудами. Так, на спектре с технически исправными шестернями

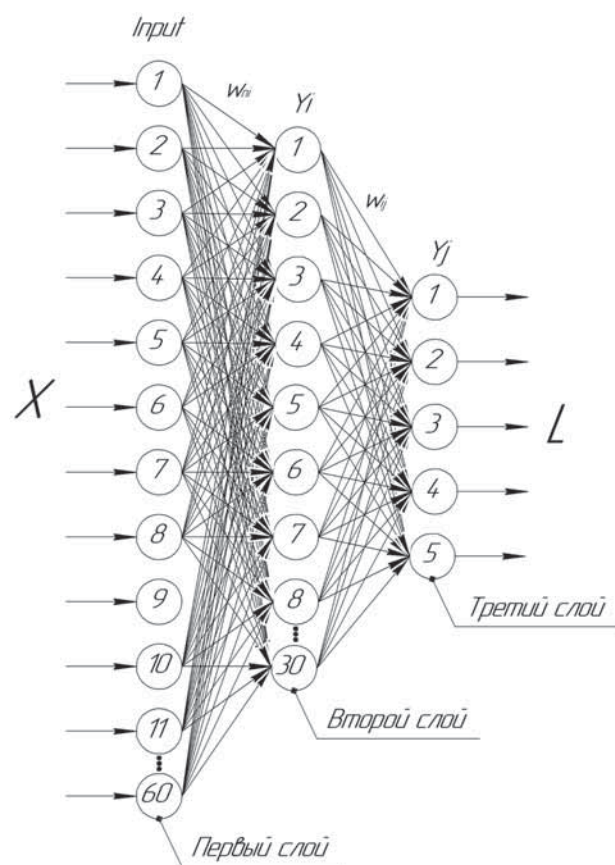


Рис. 2. Структура нейронной сети для классификации состояния зуба шестерни [13]

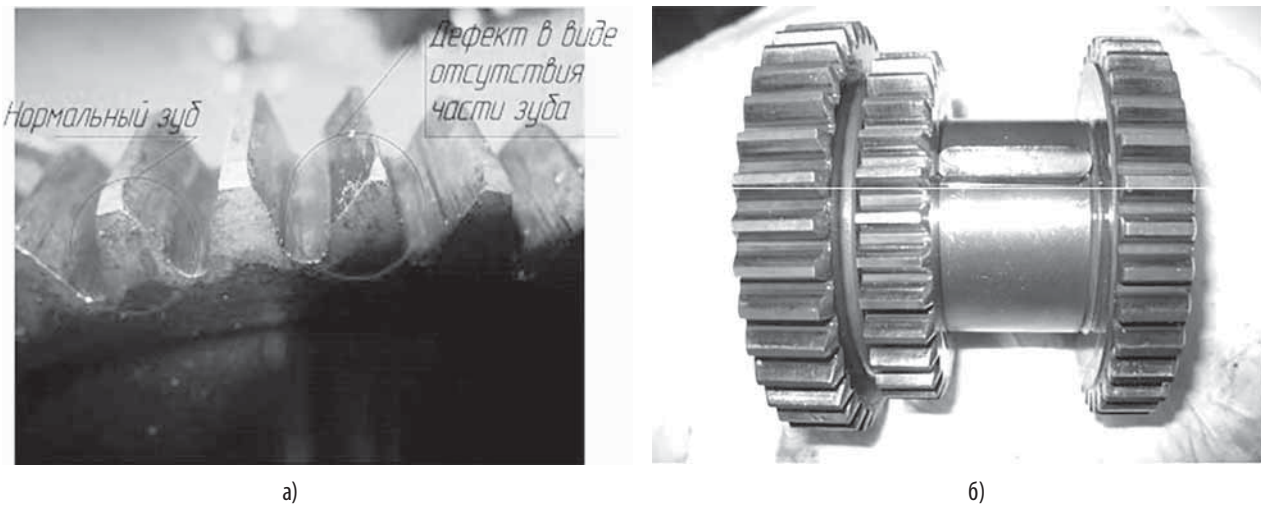


Рис. 3. Экспериментальное зубчатое колесо $z = 43$ 2-го вала привода

можно выделить частоты 635, 561 и 404 Гц (частота вращения шпинделя — 400 мин^{-1}), что соответствует частотам пересопряжения зубьев при передаче вращения с 1-го на 2-й, с 3-го на 4-й и с 5-го на 6-й валы (рис. 4). Комбинированные частоты на боковых полосах отсутствуют либо их амплитуды намного ниже отмеченных. На спектре акустического сигнала с дефектной ведомой шестерней вала II наблюдается рост порядка в 1,5 раза амплитуд частотных составляющих на частотах пересопряжения зубьев колес первой ступени (около 635 Гц) (рис. 5). Наряду с отмеченными частотами также зафиксирован рост комбинированных составляющих, отстоящих друг от друга на 14,8 Гц, что является частотой вращения вала II и указывает на месторасположение дефектного элемента. При установке на вал II ведущего и ведомого колес с погрешностями зубьев боковые полосы, отстоящие друг от друга на величину частоты вращения вала, окружают основные частоты пересопряжения зубьев как первой, так и второй ступени.

В случае отсутствия части зуба происходит нарушение закономерностей взаимодействия рабочих профилей пары, что приводит к периодическому динамическому возмущению (вследствие ударного взаимодействия входящих в зацепление зубьев) и проявляется в виде периодических всплесков

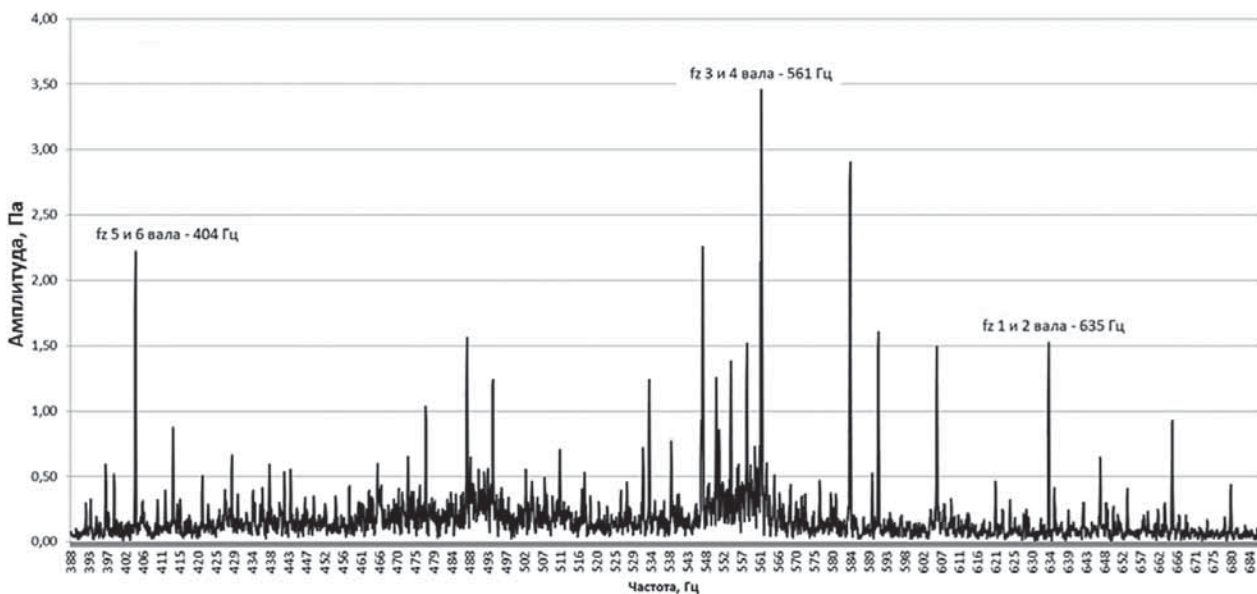


Рис. 4. Фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - kf_0) - (f_z + kf_0)$ шестерни $z = 38$ в исходном состоянии

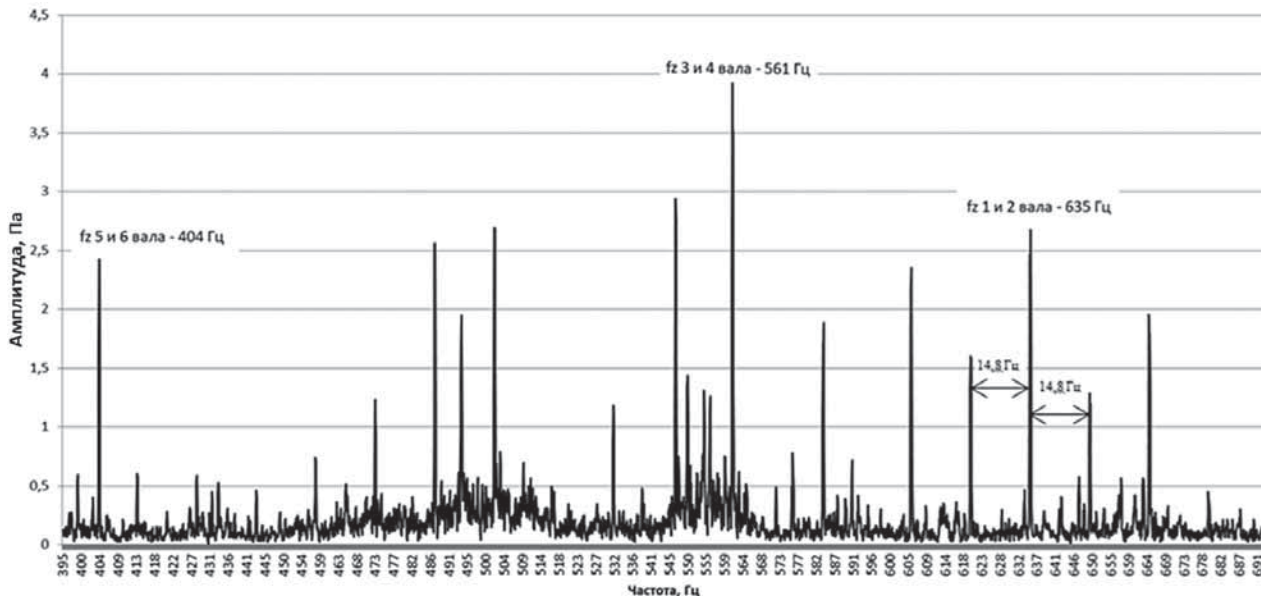


Рис. 5. Фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0)$ и $(f_z + k \cdot f_0)$ шестерни $z = 38$ с систематическими погрешностями зубьев в виде погрешности профиля и увеличенным боковым зазором

временной характеристики колебательного процесса с частотой вращения вала, а на спектре акустического сигнала приводит к увеличению зубцовой гармонической f_z и появлению по обе стороны от нее семейства комбинированных частотных составляющих $(f_z - k \cdot f_0)$ и $(f_z + k \cdot f_0)$. Это достаточно убедительно иллюстрирует фрагмент спектра, приведенный на рис. 6.

На основании полученных данных сформированы численные образы диагностируемых зубчатых колес ($z = 43$ с локальным повреждением зуба в виде отсутствия его части и $z = 38$ с систематическими погрешностями зубьев в виде погрешности профиля и с увеличенным боковым зазором), которые обработаны с помощью разработанной нейросетевой модели. Результаты классификации приведены на рис. 7 и 8.

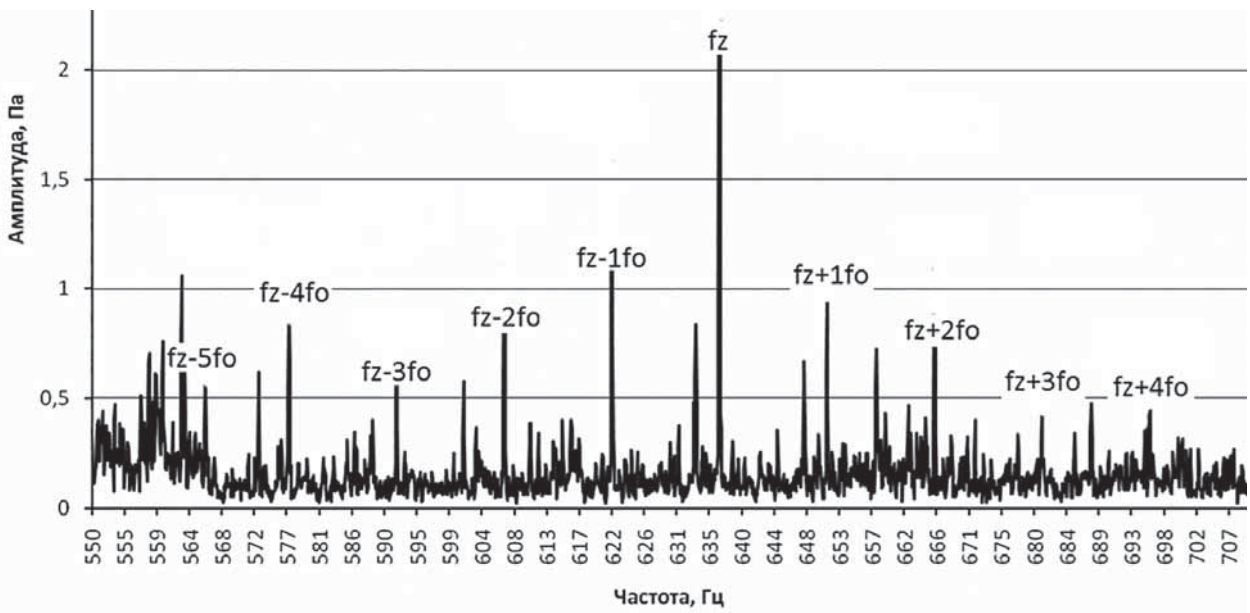


Рис. 6. Фрагмент спектра акустического сигнала в области частот $(f_z - k \cdot f_0)$ и $(f_z + k \cdot f_0)$ шестерни $z = 43$ с локальным повреждением зуба в виде отсутствия его части

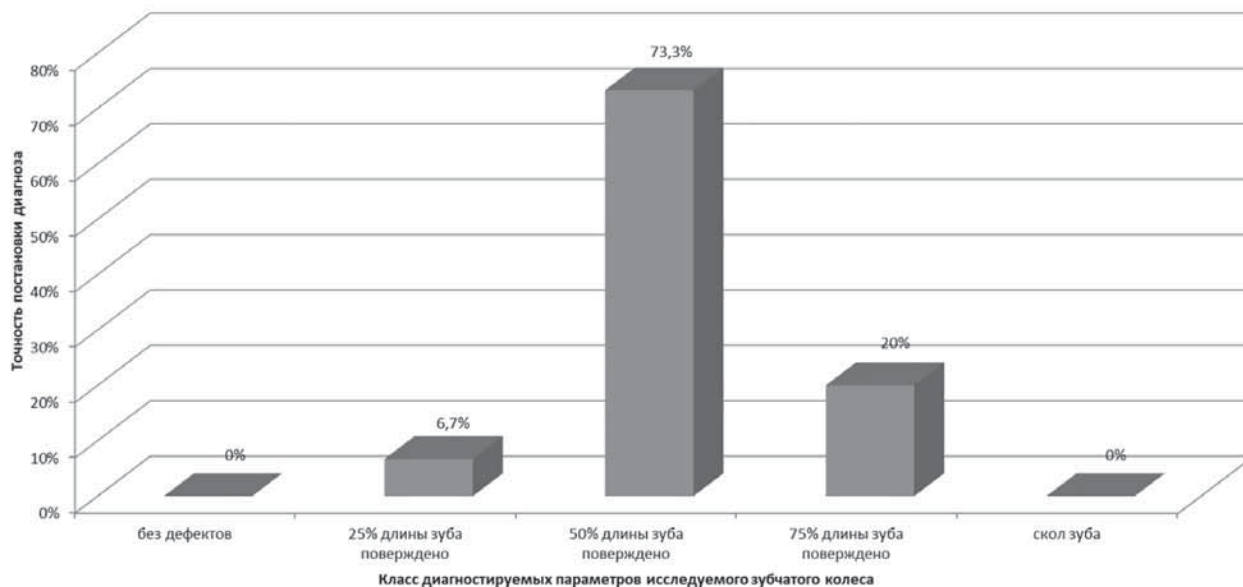


Рис. 7. Диаграммы неточностей нейросетевого классификатора шестерни z = 38

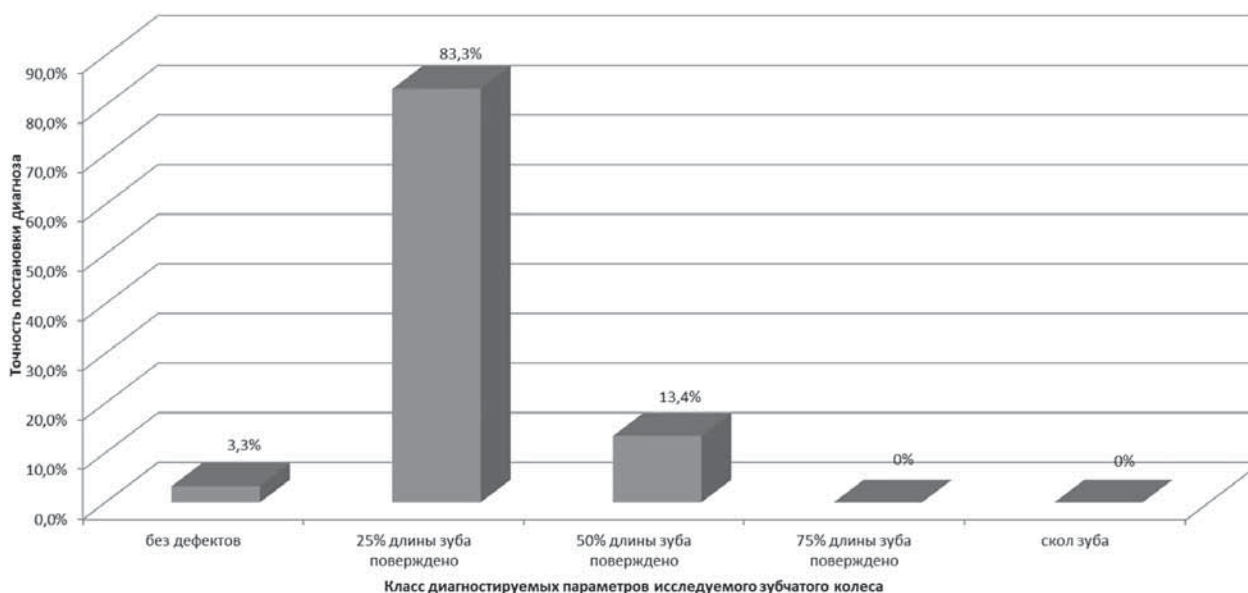


Рис. 8. Диаграммы неточностей нейросетевого классификатора шестерни z = 43

Из представленных диаграмм видно, что используемый нейросетевой классификатор идентифицирует диагностируемые зубчатые колеса в большинстве случаев в рамках двух классов состояния зуба: 50 % длины зуба повреждено (для шестерни z = 38) и 25 % длины зуба повреждено (для шестерни z = 43). Это говорит о том, что используемая нейросетевая модель, обучающая выборка которой построена на численном образе, включающем в себя зубцовую гармонику f_z и 4, кратные ей, оборотную гармонику f_0 и 4, кратные ей, а также 5 комбинированных гармоник $(m \cdot f_z) \pm (k \cdot f_0)$, эффективно диагностирует не только эксплуатационные дефекты, но и технологические погрешности изготовления зубчатых колес.

Заключение.

Результаты представленных исследований показали возможность синтеза амплитудно-частотного анализа акустического сигнала и искусственных нейронных сетей при диагностике локальных

повреждений зубьев зубчатых колес многовальных приводов. Предложенный подход позволяет перейти от трудоемкого экспертного анализа к выявлению вида повреждения зубчатого колеса на основе использования искусственного интеллекта и дает возможность:

1) сократить время диагностирования за счет уменьшения объема анализируемых данных (зубцовая гармоника f_z и 4, кратные ей; обратная гармоника f_0 и 4, кратные ей; 5 комбинированных гармоник $(m \cdot f_z) \pm (k \cdot f_0)$) без ущерба к итоговому результату;

2) повысить точность выявления зубчатых колес с локальным повреждением зубьев в составе многовального привода за счет автоматизированного получения перечня информативных частотных составляющих;

3) снизить стоимость ремонтных работ за счет уменьшения времени простоя оборудования и преждевременного изготовления дефектных зубчатых колес в составе многовального привода.

Литература:

1. Ишин, Н. Н. Вибродиагностика зубчатых передач мобильных машин в эксплуатации / Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов // *Неразрушающий контроль и диагностика*. — 2017. — № 2. — С. 3–17.
2. Герике, Б. Л. Вибромониторинг горных машин и оборудования / Б. Л. Герике, И. Л. Абрамов, П. Б. Герике. — Кемерово: КГТУ, 2007. — 190 с.
3. Радкевич, Я. М. Методология оценки качества и управления состоянием горных машин с использованием вибрационных характеристик / Я. М. Радкевич, М. С. Островский, П. Ф. Бойко // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2008. — № 10. — С. 8–12.
4. Сергеев, В. Ю. Диагностические методы и средства контроля для технического аудита узлов и агрегатов карьерных самосвалов / В. Ю. Сергеев // *Горная промышленность*. — 2009. — № 6 (88). — С. 45–47.
5. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования: Учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко и др. — Омск: НПЦ «Динамика», 2007. — 286 с.
6. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. — Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>. — Дата доступа: 15.04.2022.
7. 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. — Дата доступа: 15.04.2022.
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. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева* — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.
10. Руссов, В. А. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам / В. А. Руссов. — Пермь, 2012. — 252 с.
11. Ширман, А. Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Р. Ширман, А. Б. Соловьев. — М.: Наука, 1996. — 276 с.
12. Парфиевич, А. Н. Использование нейронных сетей в виброакустической диагностике локальных повреждений зубчатых колес многовальных приводов / А. Н. Парфиевич, В. С. Александрова, Ю. Н. Саливончик // *Актуальные вопросы машиноведения*. — 2021. — № 10. — С. 154–159.
13. Kohonen, T. The self organizing map // *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*. — 1990. — Vol. 78. — P. 1464–1480.
14. Головкин, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных: Учеб. пособие / В. А. Головкин, В. В. Краснопрошин. — Минск: БГУ, 2017. — 263 с.
15. Искусственные нейронные сети и искусственные иммунные системы для обнаружения вторжений: Моногр. / М. П. Комар, В. А. Головкин, А. О. Саченок [и др.]. — Тернополь: ТНЭУ, 2018. — 192 с.