

го индуктора, является значительное повышение плотности и прочности поверхностного слоя. Применение дополнительных способов упрочнения поверхности может увеличить эффект повышения износостойкости пар трения. Для выбора обоснованных решений при разработке комплексной упрочняющей технологии была проведена лазерная обработка идентичных по конструкции и материалам деталей. Происходящие в результате лазерного упрочнения изменения структуры поверхностного слоя, связанные с преобразованиями перлита и мартенсита, привели к повышению показателя микротвердости на 20...22 %. Обозначенные на диаграмме окружностью параметры обработки без оплавления с параметрами ($E = 100...120$ мДж; $P = 41 \cdot 10^6$ Вт; $\tau = 16 \cdot 10^{-9}$ с) обеспечивают стабильное повышение микротвердости поверхностного слоя толщиной в пределах 1...5 мкм.

Заключение. Проведенное исследование методов упрочнения поверхностного слоя одинаковых деталей, изготовленных из доэвтектоидной стали способствовало выявлению наиболее рациональных режимов для каждого метода и, в перспективе, при схожем протекании фазовых изменений в поверхностной структуре материала, возможность их совместного использования для увеличения срока службы деталей при воздействии циклических нагрузок и абразивного износа.

Несмотря на незначительное повышение числа микротвердости (магнитно – импульсная обработка – 12...14 %; лазерная обработка – 20...22 %) для деталей выполненных из стали 40Х, показатели структуры поверхностного слоя предполагают значительное повышение прочностных характеристик материала и износостойкости.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц, А.Г. Технические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц [и др.] – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
2. Алифанов, А.В. Исследование влияния режимов магнитно-импульсной обработки на микротвердость и микроструктуру образцов сталей, применяемых для изготовления рубильных ножей / А.В. Алифанов, Г.П. Горецкий, А.М. Милюкова, А.А. Лях, В.Н. Шишмолин // Вестник Барановичского государственного университета. – Серия: Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 12.
3. Бакулин, Б.А. Анализ химического состава и физико-механических свойств материалов для изготовления деталей батанного механизма ткацкого станка / Б.А. Бакулин, Ю.К. Калугин // Вестник БарГУ. – Серия: Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 22–28.

Материал поступил в редакцию 30.11.2017

KALUGIN Yu. K., BAKULIN B.A. Comparative analysis of methods of surface hardening of parts of looms

The results of a comparative analysis of the magnetic-pulsed and laser methods for treating the surface layer of parts of the battery mechanism are presented. In laser processing, surface hardening of parts was carried out using a neodymium laser LS-2147 with a wavelength of 532 nm, 355 nm. The pulse frequency was chosen in accordance with the requirements of the experiment. The energy in the pulse varied from 15 to 140 mJ with a pulse duration of 32 ns (16 ns at half-height of the pulse). For magnetic pulse processing, we used a modernized MIU magnetic pulse device made in the mechanophysics laboratory for the formation of heterogeneous systems of the Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, which allows receiving pulse energy up to 15 kJ. Comparative diagrams with the designation of the most rational modes of hardening treatment.

УДК 620.179.18

Драган А.В., Парфиевич А.Н.

ВЫЯВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Введение. В процессе эксплуатации зубчатых передач зубья при каждом вхождении в зацепление постоянно воспринимают:

- ударные взаимодействия, сопровождающие вход зубьев в зацепление из-за погрешностей изготовления и износа, а также вследствие параметрических факторов по причине деформаций зубьев под нагрузкой;
- периодические переменные нагрузки, возникающие из-за непостоянства числа зубьев, принимающих участие в передаче крутящего момента;
- трение контактирующих поверхностей зубьев.

Сочетание данных факторов для нагруженных приводов может приводить к появлению локальных повреждений на рабочих поверхностях зубьев либо к полному разрушению зубьев (рисунок 1). Данный дефект опасен тем, что продукты его образования могут привести к внезапной остановке всего агрегата при непосредственном попадании в зону зацепления. Поэтому его выявление на ранней стадии появления носит стратегический характер, т. к. даёт возможность не допустить развитие дефекта до критических размеров и аварийной остановки.

а)



Драган Александр Вячеславович, к.т.н., декан машиностроительного факультета Брестского государственного технического университета.

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

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

Машиностроение

б)



- а) паразитная шестерня коробки передач автомобиля Fiat Ducato;
- б) зубчатое колесо коробки передач автомобиля ЗИЛ

Рисунок 1 – Локальные повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес

Постановка задачи. Известно, что для диагностики состояния зубчатых колес и передач широко используются виброакустические методы, основанные на проявлении в сигналах характерных диагностических признаков. Однако их выявление чаще всего достоверно осуществляется для передач, состоящих из отдельных зубчатых пар в стендовых условиях путем экспертного анализа.

Использование экспертного анализа параметров виброакустического сигнала при диагностировании сложных механических систем на основе зубчатых передач имеет существенные ограничения в силу того, что требует оценки состояния каждого из элементов рассматриваемого привода, вносящих свой вклад в итоговое формирование анализируемого сигнала, по определенному перечню критериев. Это в свою очередь затягивает процедуру диагностирования, но эксперт-диагност при постановке окончательного решения о результатах приведенной диагностики не располагает значительным запасом времени, т. к. при постоянно работающем под нагрузкой

зубчатом приводе имеется риск быстрого развития дефекта, что может привести к его внезапному отказу. Это приводит к тому, что диагностика основывается на опыте специалиста, т.е. носит субъективный характер. Также диагносту трудно выявить зарождающиеся либо слаборазвитые дефекты отдельных элементов сложных приводов при высокой виброакустической активности других элементов механической системы.

В приведенных случаях для постановки диагноза в основу закладывается тот факт, что при появлении локального повреждения рабочей поверхности зуба на временной характеристике виброакустического сигнала появляются периодические импульсы, а также возникают частотные, амплитудные и иные модуляции сигнала, приводящие к отражению на спектральных характеристиках [1, 2, 3, 4].

В проведенных исследованиях решалась задача разработки методики диагностирования механических систем и приводов на основе зубчатых колес, предполагающей формирование массива информативных для диагностики виброакустических составляющих, его автоматизированный анализ и постановку диагноза, что позволяет минимизировать участие специалиста-диагноста, упростить процедуру диагностирования и снизить вероятность внезапных отказов при быстро развивающихся локальных дефектах.

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 2.

В качестве источника информации использовался акустический сигнал, сформированный аппаратно-программным комплексом [5] на основе данных, полученных с измерительного микрофона с капсюлем М101, установленного на расстоянии 300 мм от корпуса коробки скоростей в горизонтальной плоскости.

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) и отсутствие зуба шестерни $z=43$ (рисунок 2). Исходя из этого были сформированы классы состояния рассматриваемой экспериментальной шестерни $z=43$ (таблица 1).

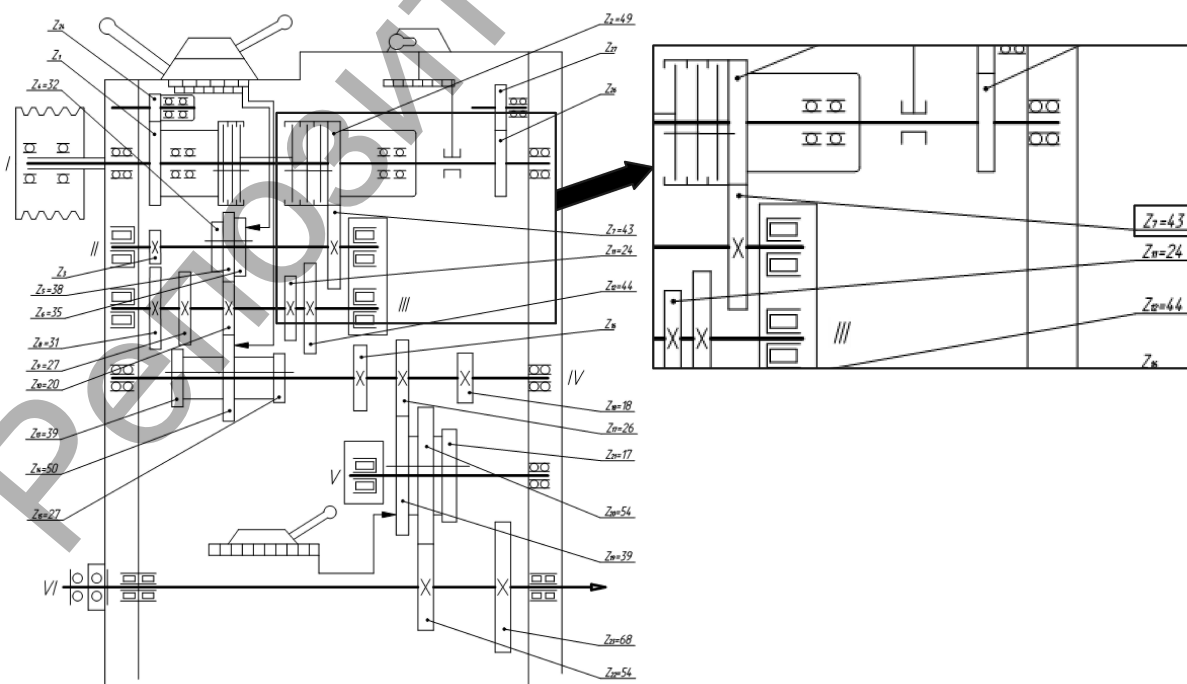


Рисунок 2 – Кинематическая схема коробки скоростей привода главного движения токарного станка SN-501

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

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 виброакустические измерения с кинематическими, что позволило упростить идентификацию частотных составляющих на спектральных характеристиках.

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

Следует отметить, что при работе привода находятся в движении и другие его шестерни, не влияющие на вращение выходного вала и не отображенные на его кинематической схеме (приводы гитары сменных колес, реверса, тормозного механизма и паразитные шестерни), но оказывающие влияние на формирование итогового акустического сигнала работы привода. Это приводит к возникновению на спектре большого количества дополнительных составляющих, затрудняющих выявление и анализ гармоник на интересующих частотах (рисунок 3).

Результаты измерений и обработки данных. Из литературных источников и результатов собственных исследований следует, что локальные повреждения рабочей поверхности приводят к изменению амплитуд характерных частотных составляющих, формируемых каждым колесом многовального привода, обусловленных спецификой работы зубчатых передач при наличии отмеченных повреждений [1, 3, 4 и др.]:

- в области низких частот - оборотные f_o и кратные им составляющие;
- в области пересопряжения зубьев наблюдаются зубцовые f_z , кратные им составляющие;

- составляющие на комбинированных частотах $lf_z \pm nf_o$.

Для принятия решения о наличии локальных повреждений сформированный набор значимых информативных составляющих должен быть подвергнут анализу по разработанному алгоритму с минимальным участием специалиста-диагноста. Экспертное выявление набора характерных частотных составляющих спектра акустического сигнала при максимальном разрешении спектральных характеристик вызывает определенные трудности ввиду чрезмерной насыщенности сигнала различными компонентами от всех элементов многовального привода, находящихся в работе (рисунок 3). Для упрощения процедуры анализа характеристик в программных средствах контрольно-диагностического комплекса была реализована функция «Анализ гармоник» [6], позволяющая автоматически получать значения частот и амплитуд отмеченных выше частотных составляющих, несущих диагностическую ценность.

Следующим шагом стало выявления возможности «связать» информацию, полученную с помощью функции «Анализ гармоник», и итоговым состоянием экспериментальной шестерни. Учитывая наличие способности искусственных нейронных сетей в процессе обучения выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, которые отсутствовали в обучающей выборке, и способностью корректно классифицировать образы, полученные с объектов с высокой степенью акустической активности всех элементов исследуемой механической системы, они являются привлекательным инструментом для решения сложных разнообразных задач классификации. Все это послужило причиной для выбора искусственных нейронных сетей в качестве основного инструмента классификации различной степени развитости локального повреждения зуба исследуемой шестерни.

Для решения поставленной задачи была использована классическая многослойная нейронная сеть – сеть векторного квантования, построенная на нейронах Кохонена (рисунок 4), которая характеризуется малым объемом обучающей выборки, что позволяет обучить нейросетевой классификатор на ограниченном объеме имеющихся данных. Скрытые нейроны осуществляют связь между входными и выходными элементами используемой сети. Добавляя один или несколько скрытых слоев, можно существенно расширить возможности нейросетевой модели. Такие сети позволяют выделять глобальные свойства данных за счет наличия дополнительных синоптических связей и повышения уровня взаимодействия нейронов [7].

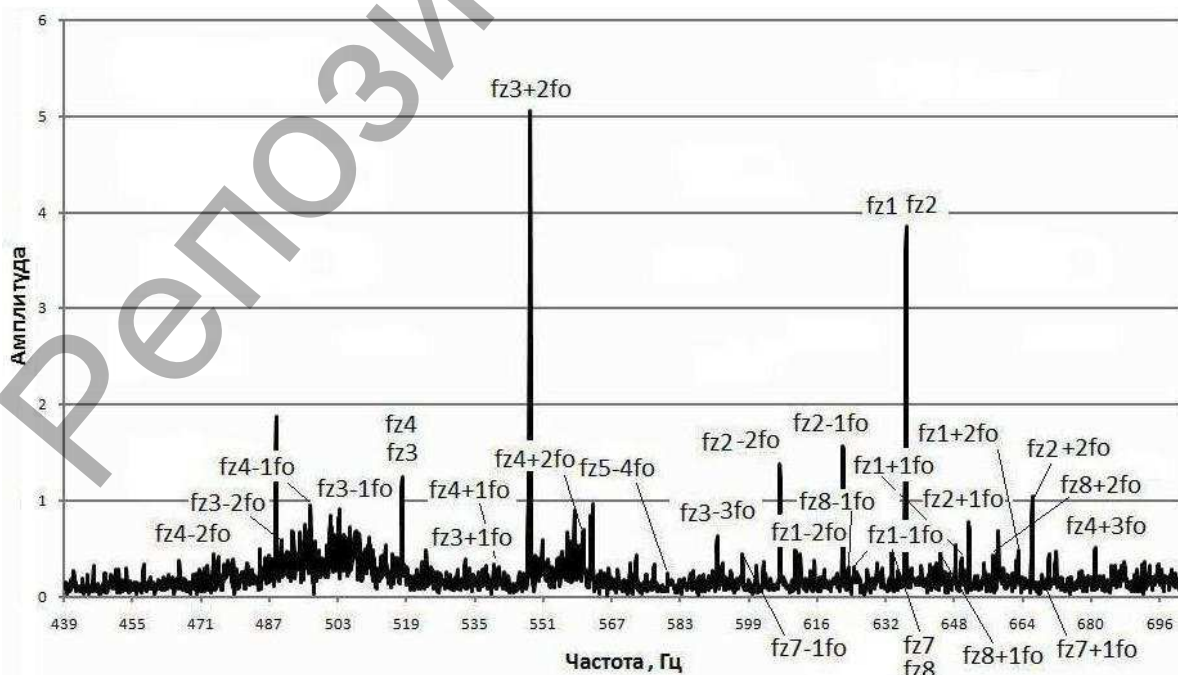


Рисунок 3 – Фрагмент спектра акустического сигнала многовального зубчатого привода и значимые частотные составляющие на нем

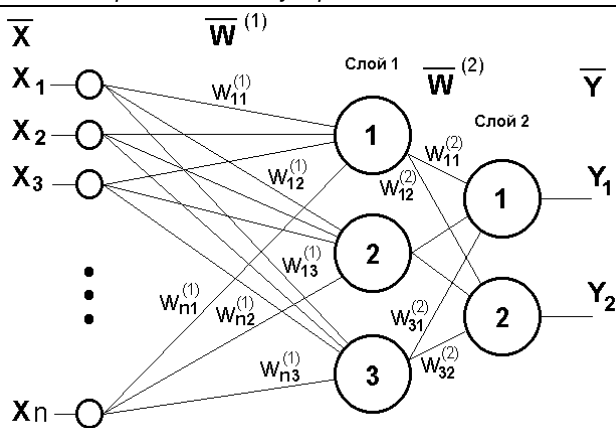


Рисунок 4 – Нейронная сеть с одним скрытым и одним выходным слоем

Предлагаемая структура нейросетевого классификатора состоит из трех слоев:

- первый слой формируется на основе данных, получаемых посредством функции аппаратно-программного комплекса «Анализ гармоник», и предназначен для распределения входных сигналов на нейроны Кохонена скрытого слоя;
- второй слой играет ключевую роль в классификации данных и осуществляет кластеризацию входного пространства образов, в результате чего образуются кластеры различных образов, каждому из которых соответствует свой нейронный элемент;

- третий слой осуществляет отображение количество диагностируемых классов (таблица 1).

Для использования нейросетевого классификатора производилось его обучение на основе сформированных данных, проводимое с помощью «учителя» [8, 9, 10]. Это необходимо для того, чтобы в процессе обучения можно было жестко «связать» каждый входной набор данных с целевым набором, представляющим собой требуемый выход.

С помощью данной функции аппаратно-программных средств «Анализ гармоник» были сформированы 120 наборов данных для обучения, характеризующих состояние рабочей поверхности анализируемой шестерни, по 24 набора для каждого из классов состояния соответственно.

Отдельно была подготовлена тестируемая выборка, не участвующая в обучении, – 30 образов, по 6 для каждого класса соответственно.

Общая точность постановки диагноза обученной на диагностируемом объекте искусственной многослойной нейронной сети при выявлении поврежденного зубчатого колеса с высокой акустической активностью других элементов привода составила 96,7%. Причем во всех случаях ошибочные результаты соответствовали соседнему классу состояния зуба, а колеса с неповрежденными зубьями оценивались исправными безошибочно. Очевидно, что выбранный набор параметров акустического сигнала для описания состояния поврежденных зубчатых колес является минимально достаточным для работы нейросетевого анализатора по предоставленным состояниям рабочей поверхности зуба.

Заключение. Предлагаемая методика выявления поврежденной шестерни в составе многовального рядного зубчатого привода с использованием классической нейросетевой модели показала доста-

Таблица 2 – Достоверность выявления повреждения рабочей поверхности зуба шестерни z=43 коробки скоростей токарного станка SN-501 по акустическим данным с применением искусственной нейросетевой модели

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	12,5%	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	87,5%	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	-	-	-
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	-	-	4,2%	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	95,8%	-
Скол зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба					
Цельный зуб	-	-	-	-	-
25% повреждения зуба	-	-	-	-	-
50% повреждения зуба	-	-	-	-	-
75% повреждения зуба	-	-	-	-	-
Скол зуба	-	-	-	-	100%

точно высокую эффективность и точность. Предложенная структура нейросетевого классификатора характеризуется малым объемом обучающей выборки и отличается высоким уровнем точности классификации при анализе акустического сигнала, что позволяет использовать ее для такого класса объектов, как зубчатые приводы.

Предлагаемый подход в исследовании многовальных зубчатых приводов предполагает минимизировать участие человека непосредственно при процедуре диагностирования, что в свою очередь призвано повысить ее объективность. Данная обученная нейросетевая модель показала адекватные результаты для постановки диагноза на других аналогичных объектах, имеющих схожую природу формирования анализируемого сигнала, что повышает ее универсальность. Предлагаемая методика в ходе дальнейших исследований будет адаптироваться для использования таких видов виброакустического сигнала, как вибрация и угловые колебания, что направлено на совершенствование процедуры диагностики за счет комплексной оценки виброакустической активности.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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>.
2. Anil Jacob, 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.

3. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова – Москва : Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.] – Омск : НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
5. 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.
6. 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.
7. Хайкин С. Нейронные сети. – Москва : Вильямс, 2006. – 1103 с.
8. Комашинский, В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – Москва : Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
9. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация, применение / В.А. Головкин // Нейрокомпьютеры и их применение : учеб. пособие / В.А. Головкин. – Москва, 2001 – 256 с.
10. Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps / T. Kohonen // Biological Cybernetics. – 1982. – N 43. – P. 59–69.

Материал поступил в редакцию 22.11.2017

DRAGAN A.V., PARFIEVICH A.N. The identification of local damages of the teeth of gear wheels multi-shaft drives use of artificial intelligence methods

In the article the possibility of detecting local damage of gear teeth in the composition of multi-shaft gear of a mechanical system based on the analysis of acoustic signal using neural network model on the example of a box of speeds of the lathe SN-501. The proposed method of identifying damaged gear in the considered object in conditions of high acoustic activity of all its components has shown a sufficiently high efficiency and accuracy with minimal involvement of the specialist diagnostician.

УДК 621.833:517.443

Омесь Д.В., Сокол В.А.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ МНОГОВАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Введение. Теория вейвлетов даёт удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала, но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. Вибродиагностика является одной из множества областей применения вейвлет-анализа.

Вибрации зубчатых передач имеют сложную структуру, однако при этом в сложном вибросигнале можно выделить определённые закономерности формирования локальных всплесков. Форма, периодичность и продолжительность всплесков, порождаемых в зубчатом зацеплении, зависит от состояния рабочих поверхностей зубьев, имеет экспоненциальный закон затухания и может быть диагностирована с помощью вейвлет-разложения сигнала вибрации.

Также можно отметить, что не все из вейвлетов, разработанных в настоящее время, подходят для анализа вибросигналов ввиду принципиально неприемлемых свойств. В результате этого актуальной является задача по разработке новых видов вейвлетов, максимально адаптированных для диагностики неисправностей зубчатых передач в составе многовальных приводов.

Постановка задачи. Вибрационный всплеск, возникающий в зубчатом зацеплении при взаимодействии зубьев, имеет во временной области характерную форму – быстро возникающий импульс с последующим быстрым экспоненциальным затуханием. Частота таких затухающих колебаний зависит от резонансных свойств элементов конструкции зубчатой передачи. Период следования таких импульсов в вибросигнале соответствует частоте пересопределения зубьев в передаче, их начальная амплитуда будет зависеть от перегренности зацепления и состояния рабочих поверхностей зубьев.

При решении задач вибродиагностики зубчатых передач требуется найти характерные всплески вибрационной энергии, происходящие

Омесь Д.В., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета.

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

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