

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь*

*В статье приведен анализ информативности методов представления и анализа виброакустических сигналов диагностирования зубчатых передач: амплитудно-частотный анализ, анализ боковых полос, синхронный анализ колебательного сигнала и поворота валов привода, время-частотный анализ. Каждый из них представляет определенный набор анализируемой информации, что позволяет решать определенные задачи диагностики многовальных приводов на основе зубчатых передач. Дальнейшее развитие существующих методов представления и анализа виброакустических сигналов позволит совершенствовать процедуру диагностирования зубчатых передач и повысить ее информативность путем реализации нестандартных алгоритмов обработки данных.*

**Введение.** Развитие прикладных математических методов анализа дискретных рядов определило возможность их использования для анализа как вибрационных, так и акустических сигналов, сопровождающих работу многовальных приводов на основе зубчатых передач. Для успешного решения задач диагностики недостаточно провести качественное измерение виброакустических процессов и их первичный спектральный анализ, используя его возможности как наиболее изученного и реализованного практически во всех современных контрольно-диагностических комплексах.

**Постановка задачи.** На сегодняшний день при анализе поступающих виброакустических сигналов в процессе диагностики наиболее часто используются следующие методы:

- амплитудно-частотный анализ;
- анализ боковых полос;
- синхронный анализ колебательного сигнала и поворота валов привода;
- время-частотный анализ.

Каждый из приведенных методов представления и анализа виброакустических сигналов успешно решает поставленные перед ним задачи, но при этом необходим высококвалифицированный специалист-диагност, что вносит в процедуру субъективность. Это обуславливает необходимость применения синтеза классических методов анализа параметров шума, вибрации, погрешностей угловых движений, упругих деформаций зубьев и современных математических методов обработки поступающей информации.

**Основная часть.** Приведем примеры применения отмеченных методов представления и анализа виброакустических сигналов, демонстрирующие их возможности и информативность для задач диагностики многовальных приводов на основе зубчатых передач:

1. Для анализа колебательных процессов часто используются временное представление и амплитудно-частотный анализ (рис. 1), которые являются наиболее распространенными методами. Они основаны на математических принципах, которые хорошо изучены и применяются в современных средствах контроля и диагностики. Для диагностирования периодических колебаний часто используется процедура преобразования Фурье, которая позволяет оценить состав и амплитуду характерных частот, генерируемых механическим приводом, и отслеживать их изменение. Это является важным критерием для оценки состояния зубчатых колес.

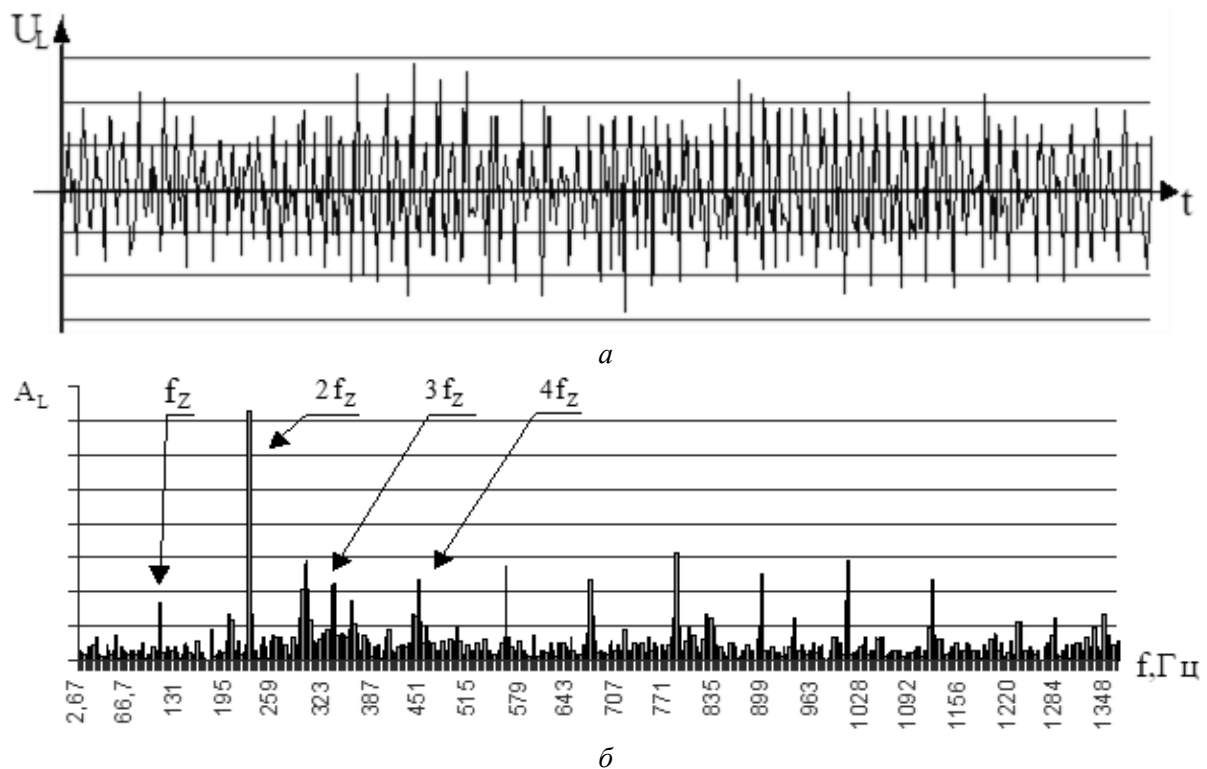


Рис. 1. Временная (а) и амплитудно-частотная (б) характеристики колебаний пары зубчатых колес

Амплитудно-частотный метод диагностики зубчатых механических приводов и систем является достаточно информативным, однако при большом количестве источников звуковой активности требуется опытный специалист-диагност, который сможет определить характеристики каждого элемента объекта и поставить соответствующий диагноз. Поэтому при диагностировании сложных механических систем на основе зубчатых передач необходимо использовать данный способ диагностирования в сочетании с другими методами преобразования, описанными ниже.

2. Анализ боковых полос [1–3] на спектральных характеристиках (рис. 2), является одним из самых простых, надежных и наиболее часто практикуемых способов диагностирования. Объектами анализа выступают классические спектры как вибрационного, так и акустического сигнала. Частотные модуляции слева и справа от гармоники зубцовой частоты и более высоких гармоник выступают в качестве критериев постановки диагноза. По мере развития дефекта наблюдается увеличение амплитуд частотных модуляций, что лежит в основе формирования обоснованных диагностических признаков, а так как их математическая основа достаточно хорошо изучена, то это дает возможность успешного использования автоматизированных методов их идентификации. Эффективность метода анализа боковых полос на спектральных характеристиках непосредственно зависит от частотного разрешения анализируемого спектра и динамического диапазона измерительных средств.

Одним из немаловажных недостатков данного метода является его чувствительность к условиям проведения измерений – состав боковых полос существенно зависит от места расположения средств измерения. Кроме того, на стадии зарождения дефекта анализ боковых полос существенно затрудняется акустической активностью других элементов механической системы, вносящих итоговый вклад в ее формирование. Локализация отдельных дефектов и определение их типа при таком способе анализа затруднены.

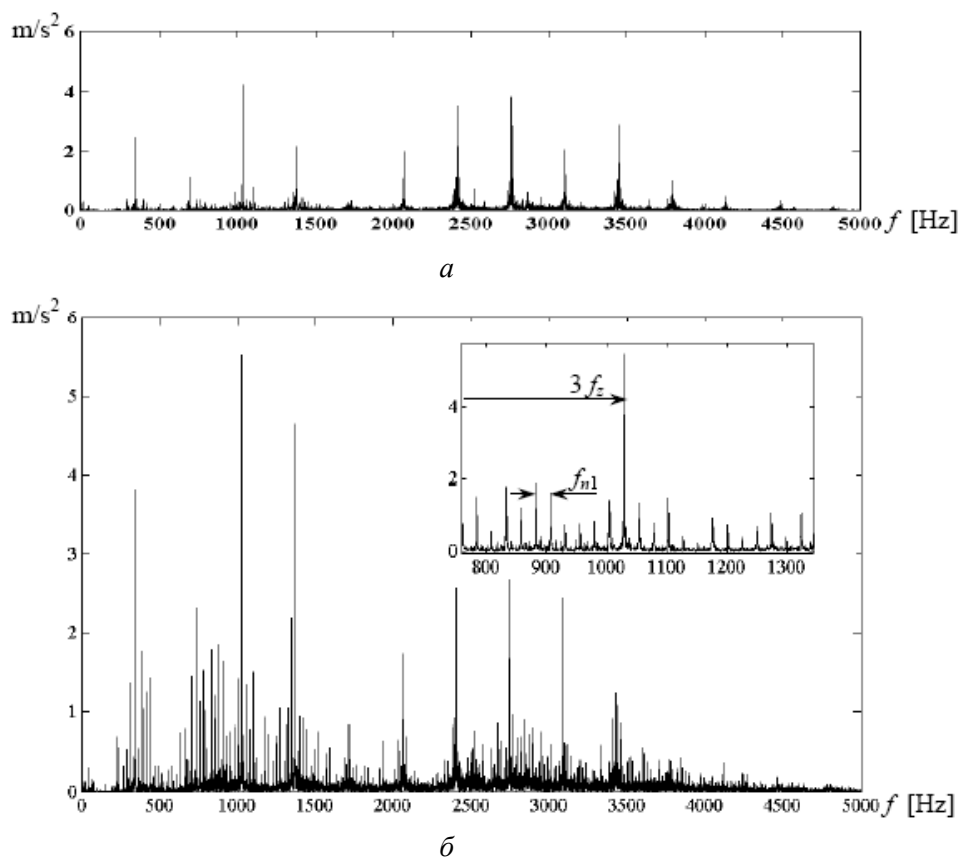


Рис. 2. Спектры вибраций исправной передачи (а) и с дефектом (б)

3. Синхронный анализ используется для разделения колебательных сигналов, которые создаются отдельными элементами привода, расположенными на различных осях и имеющими разную угловую скорость [4–7]. Суть метода заключается в том, что при суммировании реализаций сигналов на  $n$  периодах детерминированной составляющей процесса ее амплитуда растет пропорционально  $n$ , следовательно, энергия растет пропорционально  $n^2$ , в то время как дисперсия суммы случайных компонент равна сумме дисперсий  $n \cdot z^2$ , если время усреднения  $T$  больше интервала корреляции шума [4]. Таким образом, отношение сигнал/помеха на выходе синхронного накопителя равно  $E_c / E_{ш} = n \cdot (A^2 / z^2)$ , что в  $n$  раз превышает то же отношение на входе устройства [4]. Использование метода позволяет существенно увеличить точность определения местоположения дефектных элементов.

В [6; 8] описана методика практической реализации синхронного анализа колебательных сигналов, а пример ее использования приведен на рис. 3 и 4.

Таким образом, местный дефект зуба, который трудно обнаружить по акустическому сигналу в определенный момент времени, явно виден на созданной характеристике диагностируемого вала после проведения синхронного анализа в виде резкого всплеска характеристики [4].

Характеристики плавности работы, кинематической точности, вид погрешности профиля и величину радиального биения зубчатого венца можно оценить, проведя анализ сигнала кинематической погрешности, формируемого элементами исследуемого вала (рис. 4, б). На рис. 4, а представлена исходная характеристика, не позволяющая это сделать.

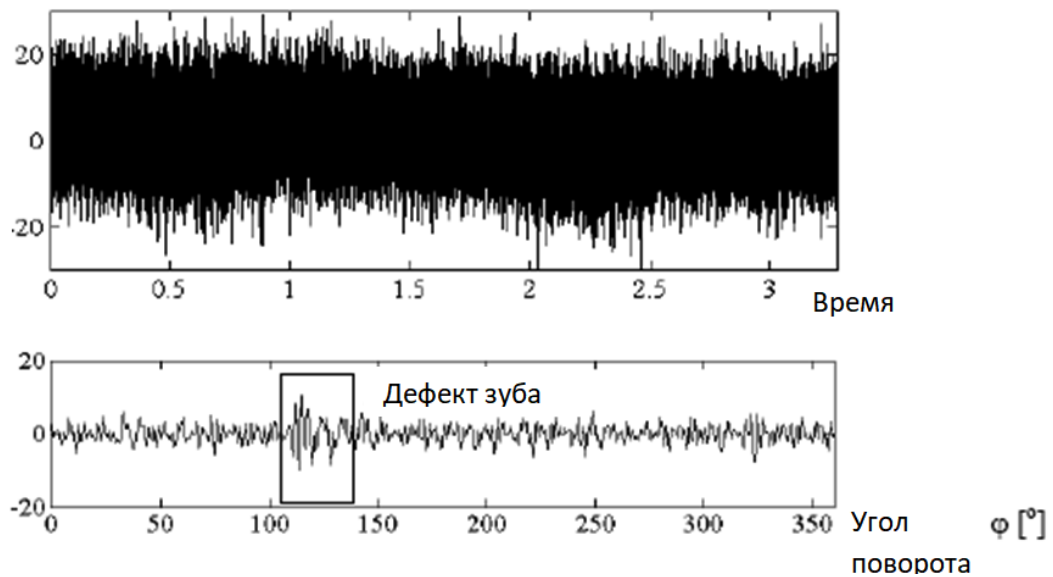


Рис. 3. Вибрационный сигнал во временном базисе и при синхронном измерении в зависимости от угла поворота вала

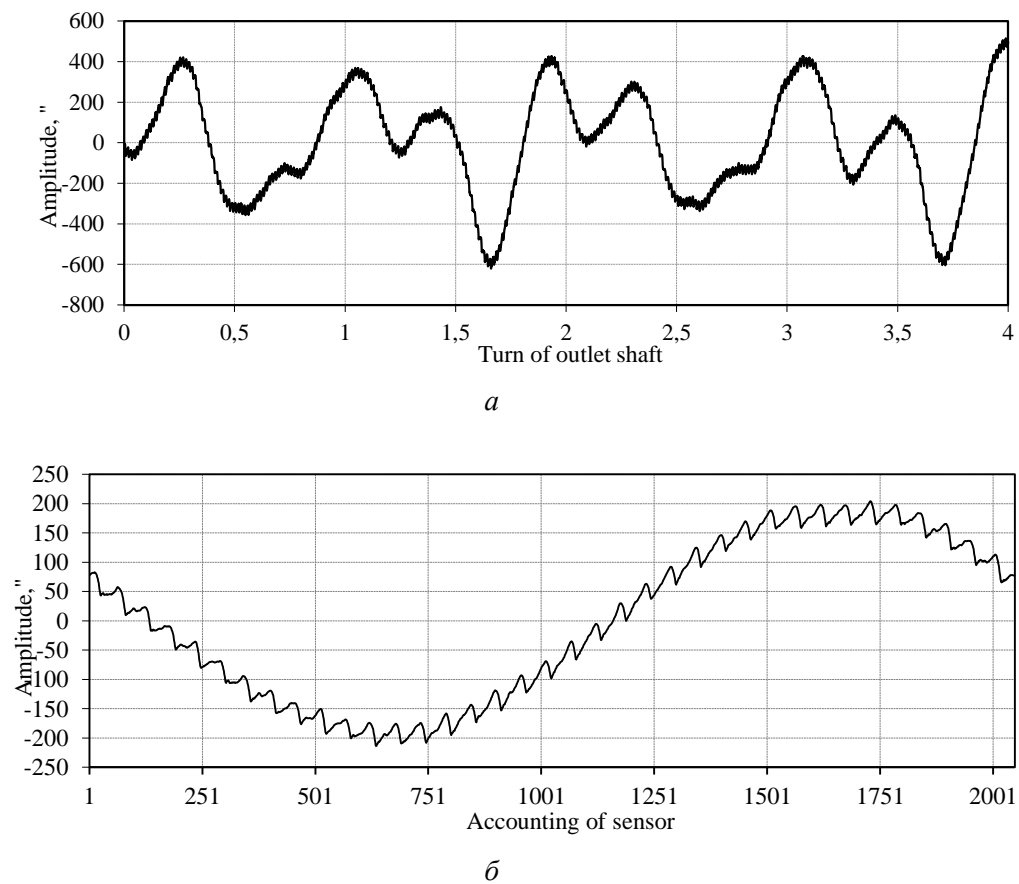


Рис. 4. Сигнал кинематической погрешности во временном базисе и при синхронном анализе в зависимости от угла поворота вала [4]

4. Преобразование Фурье позволяет представить виброакустический сигнал в виде суммы гармоник различной частоты, но не позволяет проследить за его изменениями во

времени ввиду растянутости на бесконечном интервале. Чтобы проследить за переменными анализируемого сигнала, необходимо разбить его на небольшие одинаковые временные промежутки и разнести их по времени. Для этого можно применить вейвлет-анализ, математические особенности которого приведены в работах [9–13].

Кратковременное Фурье-преобразование, в ходе которого сигнал разбивается на короткие временные отрезки посредством оконной функции  $g(t)$ , а затем определяется их частотное содержание посредством Фурье-преобразования, является одним из наиболее распространенных видов время-частотного преобразования [1]:

$$STFT(\tau, f) = \langle x(t), g_{\tau, f}(t) \rangle = \langle x(t), g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt.$$

Спектрограмма, являясь графической интерпретацией  $STFT$ , содержит в себе информацию о распределении энергии сигнала по времени и частоте (рис. 5).

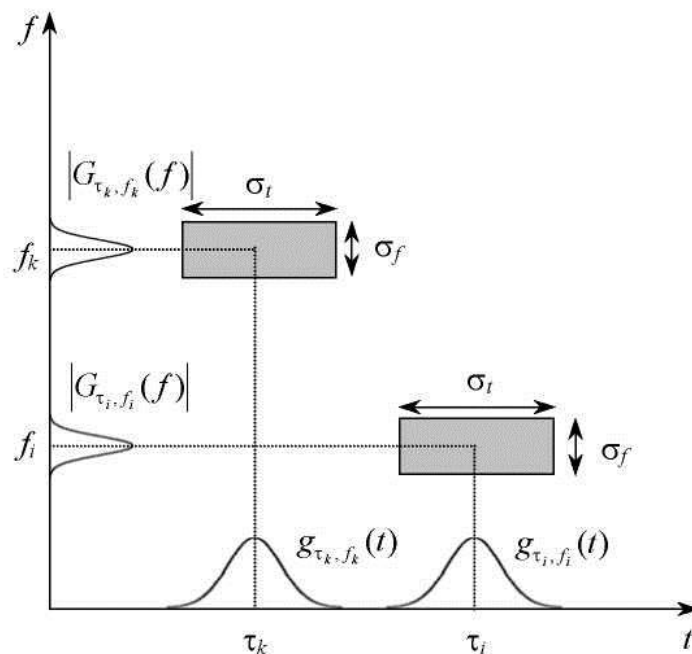


Рис. 5. Графическое отображение кратковременного Фурье-преобразования

Одним из недостатков, ограничивающим применяемость кратковременного Фурье-преобразования для анализа медленно изменяющихся частотных процессов, является тесная взаимосвязь между разрешением по частотной  $\sigma_f$  и временной  $\sigma_t$  осям.

Использование вейвлет-функция  $\psi(t)$  позволяет устранить данный недостаток:

$$\|\psi\| = \left( \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt \right)^{1/2} = 1, \quad \psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau) d\tau = 0,$$

$$\psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right), \quad s \in R^+,$$

где  $S$  – переменная, влияющая на затухание вейвлет-функции, подбирающаяся таким образом, чтобы выполнялось первое из приведенных условий.

Переменная  $S$ , определяющая ширину окна, позволяет производить анализ медленно протекающих процессов при ее значениях больше единицы, а при значениях меньше единицы – высокочастотные быстропротекающие процессы. Используемая вейвлет-функция позволяет определять среднюю частоту, эффективную продолжительность и диапазон частот рассматриваемого колебательного процесса.

**Искусственные нейронные сети для задач диагностики.** В настоящее время искусственные нейронные сети используются в различных областях деятельности, для решения задач которых классические алгоритмы обработки данных либо не подходят, либо недостаточно эффективны: автоматизация процессов распознавания образов, адаптивное управление, прогнозирование, создание экспертных систем, организация ассоциативной памяти, решение задач технической диагностики и многие другие, что и предопределило их большое распространение.

Искусственные нейронные сети используются для решения следующих задач:

1. Распознавание образов заключается в том, что необходимо соотнести поступающий набор данных к одному из известных классов, например, при идентификации различных типов клеток крови, при определении отпечатков пальцев, при технической диагностике и т. д.

2. Кластеризация данных заключается в том, что происходит объединение поступающего объема данных по заранее оговоренным критериям близости, которые закладываются при построении искусственной нейросетевой модели, например, при сжатии данных, анализе данных и поиске в них закономерностей.

3. Аппроксимация функций нашла применение при имитации работы составных систем, а также при создании алгоритмов управления сложными динамическими процессами, для которых необходимо найти значение  $Y_i$  неизвестной функции от аргумента  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , удовлетворяющее строго описанным критериям.

4. Задача предсказания применима при прогнозировании состояния объекта в рамках технической диагностики, в системах принятия решений и т. д. При решении данной задачи поступает набор, представляющий собой отображение поведения системы в промежутках времени  $t_1, t_2, \dots, t_m$ . Необходимо же по имеющейся подборке спрогнозировать поведение системы в момент времени  $t_m + 1$ .

**Заключение.** Таким образом, применение искусственных нейронных сетей совместно с одним из приведенных время-частотных методов представления виброакустических сигналов могут эффективно использоваться для анализа параметров шума, вибрации, погрешностей угловых движений и упругих деформаций зубьев. Это даст возможность совершенствовать процедуру диагностики зубчатых передач и повысить ее информативность путем использования преимуществ, предоставляемых нейросетевыми моделями: высокая степень параллелизма обработки информации, способность к обобщению, адаптация к изменениям окружающей среды, распознавание зашумленных образов, низкий уровень ресурсоемкости и т. д. Данный синтез позволит сформировать новый метод диагностики, который при описанных выше преимуществах для успешно реализованной нейросетевой модели может постоянно прогрессировать путем включения новых диагностических признаков без ущерба к качеству диагностирования многозубчатых приводов. Это даст возможность сократить время, необходимое для обработки поступающей информации, уменьшить требования к специалисту-диагносту и применить искусственную нейросетевую модель для диагностики других подобных объектов, которые имеют схожий процесс формирования анализируемого сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Klein U. Merkmalbestimmung an Zahnradgetrieben mittels Wavelet- Transformation und Koeffizientenanalyse. VDI Berichte Nr. 1466. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999. – S. 461–475.
2. Kolerus J. Zustandsüberwachung von Maschinen. / 3. Erweiterte Auflage, Renningen. – Malsheim: Expert-Verlag, 2000.
3. Reitz K. u. a. Verschleißerkennung an Getriebeverzahnungen mit Hilfe der Körperschallanalyse. // Forschungsbericht AiF-Vorhaben. – Nr. 11554 N/1, RWTH. – Aachen: Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde, 2000.
4. Драган, А. В. Способы представления виброакустического сигнала для повышения эффективности диагностики зубчатых приводов / А. В. Драган, Д. В. Омесь // Вестник Брестского государственного технического университета. – Серия: Машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 49–53.
5. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – Санкт-Петербург: Официальный сайт, 2014. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
6. McFadden P. D. Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration. Mechanical System and Signal Processing, 1(1987)2. – S. 173–183.
7. McFadden P. D., Cook J. G., Forster, L. M. Decomposition of gear vibration signals by the generalised S transform. // Mechanical System and Signal Processing, 13(1999)5. – S. 691–707.
8. Драган, А. В. Оценка плавности работы прямозубой зубчатой передачи по данным кинематического контроля // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2000. – № 4. – С. 2–6.
9. Blatter, C. Wavelets – Eine Einführung. Braunschweig / Wiesbaden: Vieweg Verlag, 1998.
10. Boashash, B. Time-Frequency Signal Analysis. – Longman Cheshire, 1992.
11. Cohen L. Time-Frequency Analysis. – NJ, Prentice Hall: Englewood Cliffs, 1995.
12. Howard L. R., Raymond O. W. J. Wavelet Analysis: The Scalable Structure of Information. – Berlin: Springer Verlag, 1998.
13. Mertins A. Signaltheorie. – Stuttgart: Teubner Verlag, 1996.

Поступила 02.11.2023

УДК 629.3

**Рынкевич С. А.<sup>1</sup>, Сонич О. А.<sup>2</sup>**

### **МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ**

1. *Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь*
2. *Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

*Рассмотрена методика диагностирования технического состояния зубчатых передач автомобильных трансмиссий со сложным движением звеньев. Исследованы причины возникновения дефектов в зубчатых зацеплениях. Разработаны основы диагностики технического состояния этих передач.*

Передачи со сложным движением звеньев – это такие зубчатые передачи и зубчатые зацепления, в которых, во-первых, оси колес и шестерен совершают сложные вращательные движения, во-вторых, происходит изменение в процессе износа геометрических параметров профилей зубьев, при этом профили отклоняются от эвольвенты, а линии зацепления трансформируются.

Для своевременного обнаружения неисправностей и дефектов в зубчатых передачах, предупреждения отказов трансмиссий мобильных машин применяются различные