

Подвеска транспортного средства содержит рессору 1, состоящую из упругих элементов 2, соединенных между собой тросами 3. Упругие элементы 2 установлены в кронштейнах 4 рамы 5 транспортного средства с возможностью поворота относительно осей 6. Средней частью рессоры 1 с помощью скобы 7 и хомутов 8 крепится к балке оси транспортного средства 9. Упругий элемент 2 состоит из гильзы 10, в которую помещены отрезки троса 11 различной длины, и подвижного поршня 12 с закрепленными в ней тросами 3.

Под воздействием вертикальных нагрузок тросы 3 получают натяжение и через подвижный поршень 12 воздействуют на отрезки тросов 11, которые в результате этого воздействия получают продольный изгиб и за счет уменьшения расстояния между подвижным поршнем 12 и днищем гильзы 10 позволяют тросам 3 получить прогиб на величину, пропорциональную приложенной силе. При снятии нагрузки с тросов 3, они вместе с подвижным поршнем 12 возвращаются в исходное положение за счет упругости отрезков тросов 11. Демпфирование колебаний происходит как за счет трения между отрезками тросов, так и между проволоками одного троса, при этом оно значительно эффективнее, чем трение в монолитных рессорных листах. Вертикальный ход оси 9 вверх ограничивается упором ее в буфер 13 рамы 5. Поперечные и продольные силы,

действующие на подвеску в условиях эксплуатации, воспринимаются реактивными штангами 14 и 15.

Эффект достигается за счет улучшения упругой характеристики подвески, что в конечном счете приводит к улучшению плавности хода и увеличению производительности транспортных средств, а также снижению металлоемкости.

**Заключение.** Развитие современного материаловедения, оборудования и технологий изготовления позволяют конструкторам-машиностроителям смело проектировать детали переменного профиля, многоэлементные комбинированные конструкции, закладывать новые методы упрочнения и т.д. Приведенные в данной статье предложения обеспечивают улучшение плавности хода, безопасности и комфортабельности езды при снижении металлоемкости узлов и повышении эксплуатационного ресурса наземных мобильных машин.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ракицкий, А.А. Обеспечение ресурса рессорных подвесок / А.А. Ракицкий, А.К. Бернацкий. – Минск: Наука и техника, 1988. – 167 с.

Материал поступил в редакцию 03.11.15

#### RAKITSKY A.A. Perspective suspension structures for ground mobile machinery

The paper is devoted to the development of suspensions with non-linear characteristics. Some structures are proposed on the base of new materials, technologies and complex combinations of elements. A plate spring has variable profiles as equal resistance beams and other peculiarities. A rope spring is distinguished by effective damping properties.

УДК 621.833:517.443

Омель Д.В., Драган А.В.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УДАРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ МНОГОВАЛЬНЫХ ПРИВОДОВ

**Введение.** Вращающиеся узлы машин, такие как редукторы, передаточные механизмы, подшипниковые узлы подвержены износу и поломкам в силу высоких нагрузок и скоростей. Анализ виброакустических сигналов таких узлов позволяет заблаговременно выявлять дефекты и планировать обслуживание. Наличие периодически повторяющихся ударных импульсов повышенной магнитуды в вибросигнале свидетельствует об ухудшении технического состояния механической системы, как правило, это уже имеющийся в исследуемой системе дефект [1].

Ударные импульсы, присутствующие в вибрационном сигнале зубчатых механизмов, характеризуются рядом параметров, таких как момент возникновения, декремент затухания, начальная амплитуда и частота повторения [2]. Приведенные параметры являются диагностическими признаками, отражающими техническое состояние механической системы, и могут быть использованы при решении задач выявления и классификации дефектов зубчатых колес многовальных зубчатых приводов.

Фурье-анализ вибросигналов обладает меньшими в сравнении с вейвлетным анализом диагностическими возможностями ввиду ряда принципиальных ограничений [3]. Вейвлет-преобразование вибросигнала позволяет определить время возникновения ударных импульсов, оценить резонансную частоту, а также реализовать совершенно новое графическое представление вибрационного процесса.

Вейвлеты и основанные на них интегральные вейвлет-преобразования были предложены в начале 90-х гг. прошлого века и в последующее время интенсивно развивались. По локализации во временной и частотной областях вейвлеты занимают промежуточ-

ное положение между синусоидальной функцией, локализованной по частоте, и функцией Дирака, локализованной во времени. Благодаря прекрасному представлению локальных особенностей сигналов, принципиально отсутствующих у рядов Фурье, вейвлеты нашли практическое применение для анализа тонких особенностей сложных нестационарных сигналов.

**1. Вейвлетный анализ.** Вейвлет-преобразования в понимании существенно сложнее, чем преобразования Фурье. Вейвлеты характеризуются своим временным и частотным образами. Временной образ определяется некоторой пси-функцией времени  $\Psi(t)$ . Частотный образ пси-функции представляет собой ее Фурье-образ  $\bar{\Psi}(\omega)$ , который задает огибающую спектра вейвлета [4]. На рис. 1 представлены временной и частотный образы одного из вейвлетов.

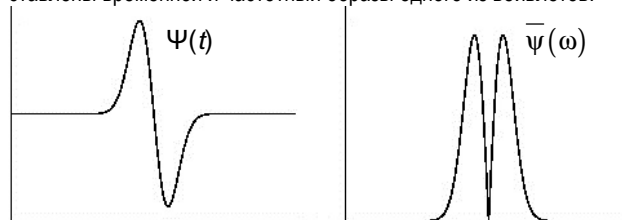


Рис. 1. Временной и частотный образы вейвлета Wave

Таким образом, сигнал представляется совокупностью волновых пакетов, образованных на основе некоторой базисной функции

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

Омель Дмитрий Владимирович, м.т.н., старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, аспирант кафедры технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

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

$\psi_0(t)$  – вейвлета, который характеризуется четырьмя принципиально важными свойствами:

- имеет вид коротких, локализованных во времени волновых пакетов с нулевым интегралом;
- обладает возможностью сдвига по оси времени;
- способен к масштабированию (сжатию, растяжению);
- имеет ограниченный частотный спектр.

Первым свойством обладают так называемые ортогональные вейвлеты, позволяющие реконструировать сигнал после разложения, что применяется при сжатии и очистке сигнала от шума. Однако ряд вейвлетов свойствами ортогональности не обладают, но тем не менее практически полезны в задачах, не требующих восстановления сигнала, например, в вибродиагностике [4].

Во всем многообразии базисных функций, применяемых для вейвлет-анализа, выделяют подкласс «грубых». Среди характерных особенностей базисных функций, входящих в этот класс, следует отметить не выполнение условий ортогональности. Данные функции удовлетворяют минимальному набору требований, предъявляемых к базисным функциям. Общим правилом при анализе сигналов является то, что вид базисной функции должен быть максимально подобен форме анализируемых данных [4], поэтому «грубым» вейвлетам отдается предпочтение. За счет соответствия минимальному набору требований расширяются возможности по выбору формы функции, а с учетом свойств различных функций можно выявлять в анализируемых сигналах особенности, которые трудно выделить другими методами анализа, особенно в присутствии сильных шумов.

Сейчас выбор вейвлетов довольно обширен. В системе компьютерной математики MATLAB представлено полтора десятка базовых типов вейвлетов. Однако необоснованное применение того или иного типа вейвлета способно привести к невозможности решения поставленных диагностических задач. Поэтому следует учитывать основные свойства вейвлетов при выборе наиболее подходящего типа для решения конкретных задач обработки сигналов [4].

## 2. Проблема выбора вейвлета при анализе вибросигналов.

Сигнал, возникающий от соударений зубьев колес, имеет во временной области характерную форму резко возникающего импульса с быстрым экспоненциальным затуханием [5]. Частота затухающих колебаний определяется массо-жесткостными свойствами конструкции элементов зубчатого привода.

Возникающий при ударе зубчатой пары импульс является источником упругих колебаний и характеризуется такими параметрами, как форма, длительностью действия и максимальное значение. Эти параметры тесно взаимосвязаны с состоянием зубьев колес, поэтому ударные импульсы используются в качестве диагностического признака для оценки технического состояния зубчатых передач. В работе [6] на основании динамической модели зубчатой передачи и тензометрирования зубчатого зацепления предложено решение задачи по определению формы ударного импульса, позволяющее выявить спектральные характеристики ударного взаимодействия зубчатых колес. Первая полуволна осциллограммы нагруженности зуба ведомого колеса (рис. 2) представляет собой ударный импульс, возникающий при входе зуба в зацепление. Последующие изменения нагруженности зуба соответствуют динамическому колебательному процессу масс зубчатых колес на жесткости зацепления.

Наличие импульсов характерной формы является надежным диагностическим признаком. Период следования ударных импульсов в вибросигнале соответствует частоте, характеризующей дефект определенного зубчатого колеса. Интенсивность характерных импульсов, степень их выраженности и превышения над фоном вибрации зависят от степени развития дефекта [7].

Базисная функция (вейвлет), применяемая для диагностики зубчатых колес, должна быть асимметрична, приспособлена для выделения характерного резкого скачка амплитуды колебаний в начале ударного импульса, должна иметь узкий частотный образ, т.е. содержать выраженную центральную частоту для обеспечения избирательности в частотной области. Закон убывания функции по возможности должен

быть экспоненциальным. В работе [5] для диагностики подшипников с помощью вейвлетного анализа вибрационного сигнала предложено создание (проектирование) новой базисной функции вейвлета, которая удовлетворяет перечисленным условиям.

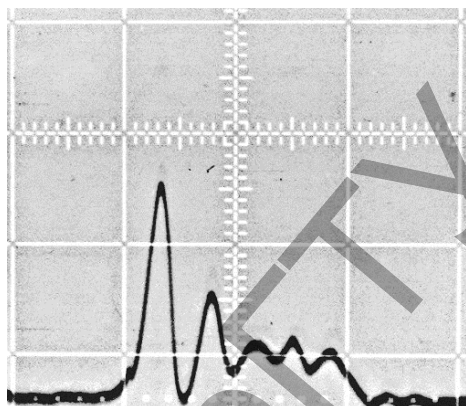


Рис. 2. Ударный импульс пары зубьев на осциллограмме

Среди известных вейвлетов указанным выше условиям в полной мере не удовлетворяет ни один из «грубых» вейвлетов. Однако наиболее близки к описанным критериям базисные функции вейвлетов «Мексиканская шляпа» и Морле (рис. 3), так как имеют узкий частотный образ с хорошо выраженной центральной частотой. Причем левая часть ударного импульса (рис. 2) наиболее подобна первому вейвлету (рис. 3а), а правая часть импульса – второму (рис. 3б).

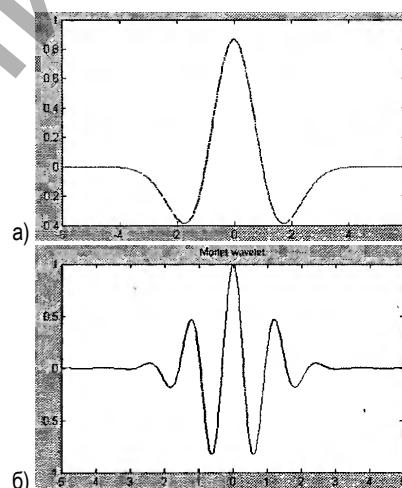


Рис. 3. «Грубые» вейвлеты: а – «Мексиканская шляпа», б – Морле

**3. Взаимосвязь между временным масштабом  $a$  и частотой вибросигнала  $f$ .** Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $s(t)$  задается путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле:

$$C_{a,b} = \int_{a,b} s(t) \psi_{a,b} \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где  $a$  – временной масштаб (аналог частоты);

$b$  – временная локализация (аналог времени).

Результатом вейвлет-преобразования сигнала является двумерный массив значений коэффициентов  $C_{a,b}$ , который может быть представлен в графическом виде или подвергнут другому виду анализа для решения поставленных задач диагностики [4]. Скалограмма (scalogram) такого массива коэффициентов представляет собой трехмерный график: ось  $X$  – временная локализация  $b$ , ось  $Y$  – временной масштаб  $a$ , ось  $Z$  – вейвлетный коэффициент  $C_{a,b}$ . Величина  $a$  является аналогом частоты  $f$  классического спектрального анализа и находится в обратной пропорциональной зависимости  $a \sim 1/f$ .

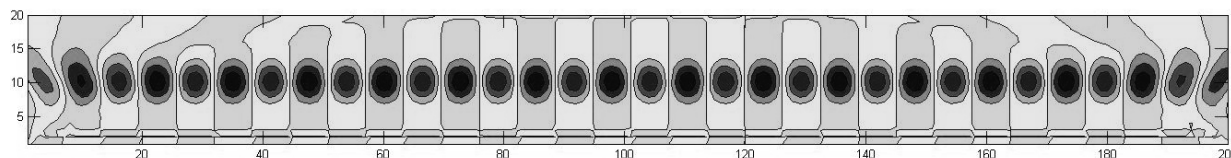


Рис. 4. Вейвлет-скалограмма синусоидального сигнала

Таблица 1

<i>a</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	19	20
<i>f<sub>a</sub></i> , Гц	833	417	278	208	167	139	119	104	93	83	76	69	64	60	56	52	49	44	42

Для правильной интерпретации графической информации, содержащейся в скалограммах, выясним зависимость между временным масштабом и реальной частотой вибросигнала. Сгенерируем в среде MATLAB произвольный синусоидальный сигнал  $s(t)$  длиной 200 отсчетов с известными амплитудно-частотными характеристиками:

$$s(t) = \sin(0,5 \cdot t). \quad (2)$$

Также следует учесть, что реальные сигналы имеют дискретизацию  $n$ , показывающую число отсчетов в единицу времени или разрешающую способность датчика (регистрирующей аппаратуры). Положим, что для нашего сигнала  $n=1024$  отсчета в секунду. Круговая частота генерируемого синусоидального сигнала  $\omega=0,5$ . Реальную частоту можно определить по следующей зависимости:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \cdot n = \frac{0,5}{2 \cdot 3,14} = 81,53, \text{ Гц}. \quad (3)$$

Подвергнем сигнал непрерывному вейвлетному преобразованию с помощью вейвлета Морле, который имеет центральную частоту  $f_c=0,8135$  Гц. Для каждого уровня разложения  $a$  центральная частота «сканирующего» вейвлета (частота просмотра) будет равна:

$$f_a = \frac{f_c}{a} \cdot n, \text{ Гц}. \quad (4)$$

Когда масштабный коэффициент  $a=1$ , частота вейвлета  $f_a=0,8135 \cdot 1024/1=833,02$  Гц. Значение  $a=20$  обеспечивает частоту просмотра  $f_a=0,8135 \cdot 1024/20=41,65$  Гц. Таким образом, если временной масштаб изменяется в пределах от 1 до 20, то в вейвлет-коэффициентах будут отображены свойства сигнала в пределах частот от 833,02 Гц до 41,65 Гц, куда попадает частота сгенерированного сигнала 81,53 Гц. На рис. 4 представлена вейвлет-скалограмма синусоидального сигнала.

Максимумы и минимумы сигнала нашли свое отражение на графике при временном масштабе  $a \approx 10$ , что соответствует частоте  $f_a=0,8135 \cdot 1024/10=83,3$  Гц практически совпадающей с частотой модельного сигнала. Обратим внимание, что сигнал проявляется на скалограмме при временном масштабе  $7 < a < 13$ , т.е. его частота как бы «размазывается» в пределах  $64 < f < 119$  Гц, что объясняется частотным образом применяемого вейвлета (см. рис. 1).

Таким образом, с помощью зависимости (3) по результатам вейвлет-разложения сигнала можно определить частоту процесса, проявляющегося на скалограмме. Для того чтобы отразить более

высокие частоты, нужно выбрать значения масштабного временного масштаба  $a$ , меньшие единицы, либо выбрать другой вейвлет с большей центральной частотой.

Выше было осуществлено вейвлет-преобразование вейвлетом Морле с центральной частотой  $f_c=0,8135$  Гц. Временной масштаб менялся равномерно от 1 до 20 с шагом 1. Соответствующие частоты просмотра изменялись очень неравномерно (таблица 1).

Из таблицы 1 видно, что высокие частоты на скалограмме отражены лишь несколькими линиями, поэтому при равномерном изменении временного масштаба мы не увидим графического отображения высокочастотных компонент исследуемого сигнала, а низкие частоты будут отображены хорошо. Эта неравномерность может быть исправлена применением равномерной шкалы частоты просмотра  $f_a$ , изменяющей с некоторым заданным интервалом  $\Delta f$ . В этом случае следует рассчитать значения временного масштаба по зависимости:

$$a_k = \frac{f_{a1}}{f_{a1} - \Delta f \cdot (k - 1)}, \quad (5)$$

где  $k$  – порядок временного масштаба;

$f_{a1}$  – частота просмотра при начальном временном масштабе  $a_1=1$ .

Рассчитаем значения временного масштаба для частот просмотра изменяющихся равномерно с шагом 41 Гц (таблица 2), произведем вейвлет-преобразование модельного сигнала и построим скалограмму (рис. 5).

На рис. 5 по-прежнему видно проявление сигнала при  $k \approx 19$ , что соответствует частоте просмотра  $f_a \approx 94$  Гц. При этом «размазывание» вдоль оси временного масштаба значительно меньше и область высоких частот стала шире. Такое решение позволяет управлять частотами просмотра при вейвлет-разложении сигнала с целью выявления его локальных особенностей. Интервал  $\Delta f$  может быть очень малым, что позволит не пропустить важные составляющие сложного нестационарного вибросигнала.

**4. Результаты исследований.** В результате соударения зубьев в передаче возбуждаются затухающие колебания с широким спектром [4], кроме того, при наличии локальных дефектов зубцовые гармоники модулируются частотами вращения колес. Поэтому можно предположить, что вейвлет – преобразование должно показать всплески коэффициентов в узком диапазоне временной локализации и с широким диапазоном во временном масштабе.

Таблица 2

<i>k</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>a<sub>k</sub></i>	1,00	1,05	1,11	1,17	1,25	1,33	1,42	1,53	1,65	1,80	1,97	2,18	2,45	2,78	3,22	3,83	4,73	6,16	8,85	15,70
<i>f<sub>a</sub></i> , Гц	833	792	751	710	669	628	587	546	505	464	423	381	340	299	258	217	176	135	94	53

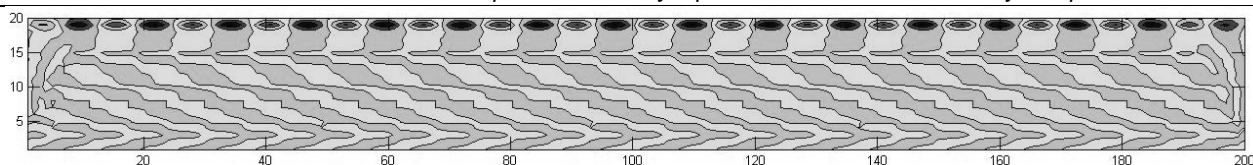


Рис. 5. Вейвлет-скалограмма синусоидального сигнала с равномерной шкалой частоты просмотра

Произведем анализ вибросигналов, измеренных при работе многовального зубчатого привода с различной степенью повреждения экспериментального зубчатого колеса с числом зубьев  $Z=43$ , устанавливаемого на втором валу. На колесе моделировался скол одного зуба, который составлял 25%, 50% и 75% ширины венца, также были произведены замеры вибрации привода с серийными колесами. Разрешающая способность используемого датчика виброускорения  $\eta=46875$  Гц. При этом частота вращения вала с экспериментальным колесом составила  $f_{об}=11,3$  Гц, а зубцовая частота  $f_z=486,1$  Гц.

Период одного оборота экспериментального колеса составляет  $T=1/f_{об}=0,088$  с. Для осуществления вейвлетного анализа «вырезаем» фрагмент вибросигнала таким образом, чтобы он содержал как минимум один удар дефектного зуба колеса и чтобы сам удар располагался подальше от границ фрагмента.

При непрерывном вейвлет-преобразовании вибросигналов использовался вейвлет Морле с центральной частотой  $f_c=0,8135$  Гц. Задавался интервал частот просмотра  $10 < f_a < 1000$  Гц, чтобы зубцовая частота экспериментального колеса оказалась в середине этого интервала. Шаг «вейвлетного сканирования»  $\Delta f=10$  Гц. С помощью выражения (5) вычислялся вектор значений временных масштабов  $a_k$ , и далее осуществлялось непрерывное вейвлетное преобразование вибросигналов.

На скалограммах, приведенных на рис. 6, наблюдается неоднородность в диапазоне временных масштабов  $a_{40} < a < a_{60}$ , что соответствует, согласно выражению (4) окну частот просмотра  $400 < f_a < 600$  Гц, в который попадает зубцовая частота  $f_z$ . Во всех случаях максимальные значения вейвлетных коэффициентов наблюдаются на временном масштабе  $a_{52}=78$ , что соответствует частоте просмотра  $f_{a52}=490$  Гц практически совпадающей с зубцовой частотой.

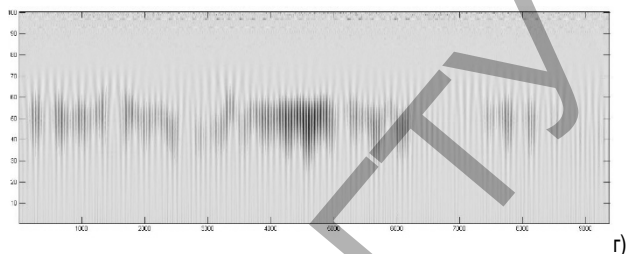
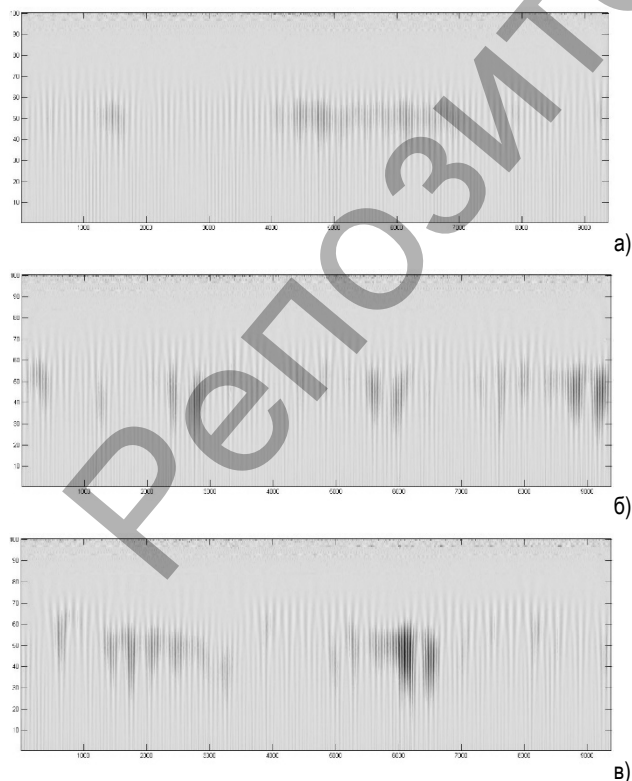


Рис. 6. Скалограммы вибросигнала при развитии локального дефекта зубчатого колеса: а – все зубья целые, б – скол 25% ширины зуба, в – скол 50% ширины зуба, г – скол 75% ширины зуба

Так как временной масштаб  $a$  и частота сигнала  $f$  находятся в обратной пропорциональной зависимости, то область высоких частот находится в нижней части графиков. На всех графиках (рис. 6) прохождение зоны зацепления дефектного зуба локализовано на разных промежутках времени, так как при выборке фрагментов вибросигнала нет возможности связать временную шкалу с положением дефектного зуба.

Рис. 7. Максимальные значения вейвлетных коэффициентов  $C_{a,b}$  при частоте просмотра  $f=490$  Гц

Увеличение скола зуба усиливает общий уровень вибрации. Таким образом, локальный дефект колеса проявляется в возрастании вейвлетных коэффициентов на коротких промежутках временной локализации. Принимая во внимание, что экспериментальное зубчатое колесо в исходном состоянии имеет и другие технологические погрешности в пределах своей степени точности, не обеспечивающие идеальные условия пересопрежения каждой пары зубьев, на рис. 6а видна некоторая неравномерность сигнала. Однако максимальные значения вейвлет-коэффициентов в этом случае ниже, поскольку на вибросигнал не накладываются дополнительные динамические воздействия от смоделированных локальных дефектов. На рис. 7 приведена выборка из максимальных коэффициентов вейвлет-преобразования вибросигналов при различной степени локального дефекта зубчатого колеса, свидетельствующая о наличии между ними взаимосвязи и возможности использования величин коэффициентов для оценки состояния привода.

**Заключение.** Полученные результаты при определении зависимости между частотой сигнала и временным масштабом при вейвлетном анализе вибросигналов, а также использовании равномерной шкалы частоты при проведении вейвлет-преобразования и построении скалограмм позволяют более осознанно и объективно подходить к анализу полученных результатов, перейти от оценки зрительных образов к числовым характеристикам вейвлетных коэффициентов. Результаты натурального эксперимента на реальном

многовальном зубчатом приводе с последующим вейвлет-анализом вибросигналов показали взаимосвязь вейвлетных коэффициентов и степени развития локального дефекта одного из колес привода.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Давыдов, И.Г. Алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования / И.Г. Давыдов, С.Ю. Васюкевич [и др.] // Доклады БГУИР. – 2014. – №6(84). – С. 22–27.
2. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова – М.: Машиностроение, 1987.
3. Dmitry Omes. Vibroacoustic diagnostics of gear drives by using of wavelet analysis / Dmitry Omes, Alexandr Dragan // Proceedings of XVI International Scientific Conference on INDUSTRIAL SYSTEMS –

IS '14, Novi Sad, October 15-17 2014 / University of Novi Sad - Faculty of Technical Sciences, Department of Industrial Engineering and Management, 2014 (Novi Sad : GRID). – P. 195–198.

4. Дьяконов, В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: специальный справочник / В. Дьяконов, И. Абраменкова – СПб.: Питер, 2002.
5. Давыдов, И.Г. Диагностика качества подшипников качения с применением вейвлет-анализа / И.Г. Давыдов, Л.М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2005. – №3(11), С. 48–52.
6. Ишин, Н.Н. Приближенный метод определения параметров ударного виброимпульса зубчатого зацепления / Н.Н. Ишин, А.Н. Гоман [и др.] // Наука и техника. – 2012. – №3, С. 63–67.
7. Русов, В.А. Спектральная вибродиагностика / В.А. Русов // Производ.-внедренч. фирма «Вибро-центр». – Пермь, 1996.

Материал поступил в редакцию 25.11.15

#### OMES D.V., DRAGAN A.V. Wavelet-analysis application in research of multishaft drives tooth gears impact interactions

The choice of basis function at tooth gears vibrosignals wavelet analysis is proved. The application of a uniform frequency scale at vibrosignals continuous wavelet-transform is offered. The results of experiment confirming relationship between the value of the wavelet coefficients and degree of cogwheel local damage are described.

УДК 621.9.06

Медведев О.А.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ МЕХОБРАБОТКИ

Состояние вопроса и постановка задач исследования. Гибкие (многономенклатурные) автоматизированные участки (ГАУ) являются эффективным средством повышения производительности труда в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства деталей. При большом разнообразии номенклатуры деталей, обрабатываемых на каждом ГАУ, интервалы времени обработки деталей на многоцелевых станках и интервалы времени транспортирования деталей с помощью автоматизированной транспортно-складской системы характеризуются большим рассеянием значений. В этих условиях оценка эффективности работы элементов ГАУ путем построения циклограмм, характерных для оценки работы автоматических линий, с учетом средних значений указанных интервалов приводит к завышенным результатам. При этом не учитываются потери, связанные с возможностью одновременного простоя нескольких станков в ожидании загрузки новыми заготовками, а также простои, возникающие из-за неравномерного поступления заготовок. Поэтому возникает потребность в других способах моделирования взаимосвязанной работы элементов ГАУ на стадии их проектирования, которые будут учитывать стохастический характер времени работы отдельных элементов. В данной работе рассмотрены возможности использования методов теории массового обслуживания для моделирования и оценки эффективности работы ГАУ на основе определения вероятностей возможных состояний ГАУ.

Анализ взаимосвязанной работы элементов ГАУ показал, что их можно считать многоканальными двухфазными системами массового обслуживания [1, 2] (первая фаза – транспортирование заготовок к станкам транспортным роботом, вторая – их обработка на станках) с очередью из заготовок перед первой фазой в виде центрального накопителя, обслуживаемого штабелером, и очередью из заготовок перед второй фазой в виде пристаночных накопителей. Требованиями на обслуживание являются заготовки, поступающие с участка их подготовки.

Теория массового обслуживания позволяет осуществить анализ работы такой системы при допущениях, что интервалы между поступающими требованиями на обслуживание и интервалы времени обслуживания подчиняются показательному закону распределения. В ряде работ [1, 2] показывается, что к таким условиям система при-

способливается труднее. Рассчитанная на этот случай при других распределениях система работает эффективнее. Поэтому, на стадии проектирования ГАУ, когда нет сведений о распределении указанных интервалов времени можно принять гипотезу о показательном законе их распределения. При моделировании работы ГАУ на основе теории массового обслуживания необходимо: выявить возможные состояния ГАУ, характеризующиеся числом приспособлений-спутников в обслуживающих фазах; разработать правила составления уравнений взаимосвязей вероятностей этих состояний; разработать математические выражения для определения коэффициента загрузки многоцелевых станков и транспортных средств во времени, для определения требуемого количества приспособлений-спутников, циркулирующих в ГАУ.

**Моделирование работы многономенклатурных автоматизированных участков мехобработки.** Для моделирования работы ГАУ необходимо знать его структуру и последовательность работы его оборудования. В большинстве случаев основное оборудование в ГАУ (многоцелевые станки с ЧПУ) расположено в линию вдоль трассы транспортного средства [2]. Предварительно количество требуемого оборудования для выполнения основных и вспомогательных операций определяется на основе нормированных технологических процессов, разработанных для каждого наименования детали по рекомендациям [2] с учетом среднего времени обработки одной заготовки на станке, среднего времени подготовки приспособления спутника с заготовкой, среднего времени транспортирования одного приспособления спутника.

ГАУ можно рассматривать как систему массового обслуживания, на вход которой поступает поток приспособлений – спутников, формируемый участком их подготовки. Обслуживание приспособлений спутников осуществляется в две фазы: транспортирование; обработка на одном из многоцелевых станков. Перед первой и второй фазой обслуживания возможны очереди (спутники, размещаемые в центральном и пристаночных накопителях, соответственно). Первая очередь ограничена числом спутников, находящихся в обращении в ГАУ, а вторая – суммарной емкостью пристаночных накопителей. В те моменты, когда заняты все накопители перед станками, транспор-

Медведев Олег Анатольевич, к.т.н., зав. кафедрой технологии машиностроения Брестского государственного технического университета.

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