

12. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк – М.: Машиностроение. – 2004. – 510 с.
13. Лахтин, Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган – М.: Машиностроение, 1976. – 255 с.
14. Афонский, И. Ф. Теория и практика азотирования стали / И. Ф. Афонский, А. В. Смирнов, О. И. Вер – Л.: Госмашметиздат, 1933. – 160 с.
15. Балашов, Б. Ф. Азотирование как метод повышения прочности деталей машин // Повышение усталостной прочности деталей машин поверхностной обработкой. – М.: Машгиз, 1952. – С. 64–82.
16. Гура, П. С. Ионно-плазменное азотирование поверхности сталей в индукционном разряде с плоской катушкой / П. С. Гура, В. И. Сысун // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – № 6–1. – С. 82–85.
17. Токарев, А. В. Ионное азотирование стали в импульсном тлеющем разряде // Вестник КРСУ. – 2009. – Т. 9. – № 11. – С. 51–57.
18. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем тлеющем разряде / Б. А. Ляшенко [и др.] // Вісник Черкаського національного університету. – 2007. – Випуск 117. – Серія "Фізико-математичні науки". – С. 107.
19. Андреев, А. А. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, Л. П. Саблев // ФІП ФІП PSE. – 2006. – Т. 4, № 3–4. – С. 191–197.
20. Азотирование стали в плазме модифицированного вакуумно-дугового разряда / А. А. Андреев [и др.] // Технология машиностроения. – 2002. – № 5. – С. 27–30.
21. L.N. Tang, M.F. Yan Email Influence of Plasma Nitriding on the Microstructure, Wear, and Corrosion Properties of Quenched 30CrMnSiA Steel // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – V. 22, № 7. – P. 2121–2129.
22. Plasma Nitriding - especially in the Gear Industry / Andreas Gebeshuber Ralph Trigueros Rübigen GmbH & Co KG – Austria (<http://www.industrialheating.com.br/wp-content/uploads/artigos/SIR.pdf>).
23. S.S. Akhtar, A.F.M. Arif, and B.S. Yilbas. Influence of Multiple Nitriding on the Case Hardening of H13 Tool Steel: Experimental and Numerical Investigation, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011. – № 58. – P. 57–70.
24. Пахарев, А. В. Повышение показателей надежности ножей кулеров путем совершенствования технологии изготовления и восстановления: диссертация ... кандидата технических наук : 05.20.03. – Саратов, 2002. – 170 с.
25. Чижилова, Т. В. Перспективы повышения эксплуатационной надежности режущих инструментов в мясной промышленности / Т. В. Чижилова, Г. А. Мартынов – М.: АгроНИИТЭИММП, 1987. – 43 с.
26. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: пат. 10014 Україна, МПК 7 C23C 8/06 / Б. А. Ляшенко, А. В. Рутковский, В. І. Мирненко, О. В. Радько; Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.
27. Лахтин, Ю. М. Физические процессы при ионном азотировании / Ю. М. Лахтин, Ю. Н. Крымский // Защитные покрытия на металлах. – Киев, 1968. – Вып. 2. – С. 225–229.
28. Бутенко, О.И. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании / О. И. Бутенко, Я. М. Головчинер, С. А. Скотников // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. – М.: Машиностроение, 1972. – С. 122–128.
29. Некоз, О. И. Импульсно-плазмовое упрочнение ножей мясорезущих машин / О. И. Некоз, О. В. Колисниченко, Z. Zdislav Kondrat, A. В. Батраченко // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друку», 2010. – Вип. 54. – С. 172–180.
30. Lapanche, H. Nituration allassigul et ionitration // Metallurgie et la construction mecanique. –1963. – № 10. – P. 849-855. – № 11. – P. 837-953.
31. Y. Sun, X.Y. Li, and T. Bell. X-ray Diffraction Characterisation of Low Temperature Plasma Nitrided Austenitic Stainless Steels, J. Mater. Sci., 1999, 34. – P. 4793–4802.
32. Brinke, T. Plasma-Assisted Surface Treatment. Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials / T. Brinke, J. Crummenauer, R. Hans, W. Oppel // Sellier Druck GmbH, D-85354 Freising, 2006. – 71 p.
33. Zagonel, L. F. Alvarez. Influence of the Process Temperature on the Steel Microstructure and Hardening in Pulsed Plasma Nitriding / L. F. Zagonel, C. A. Figueroa, R. Droppa, Jr., F. Alvarez // Surf. Coat. Technol. – 2006. – № 201. – P. 452–457.
34. Kanetake, N. Application technology of plasma nitriding. // Int. semin. Plasma Heat Treat. Set. and Technol. Senlis. Paris, 1987. – P. 145–153.
- A. Basu, J. Dutta Majumdar, J. Alphonsa, S. Mukherjee, and I. Manna. Corrosion Resistance Improvement of High Carbon Low Alloy Steel by Plasma Nitriding, Mater. Lett., 2008, 62. – P. 3117–3120.
35. Сазонов, М. И. Теоретические и экспериментальные исследования процесса поверхностного плазменного упрочнения режущего инструмента / М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, В. В. Гарбачевский // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 4 : Машиностроение. – С. 28–31.

Материал поступил в редакцию 20.11.2018

VEREMEYCHIK A. I., SAZONOV M.I., HVISEVICH V. M., BTRAK V. V., ONYSKO S. R. Superficial plasma nitriding of grinders of wood waste

This article is devoted to studying of operability of installation for crushing of wood waste and development of the corresponding methods of increase in its reliability and durability. It is established that the resource of continuous work of installation is limited by service life of grinders. It is offered to apply superficial plasma nitriding by means of the compressed moving plasma arch to their hardening. Application of such high-concentrated source of heating allows to carry out superficial hardening of a product, and only its worn-out sites, excepting preliminary volume training of its core and keeping thereby plastic properties of material. Such way of heat treatment allows to increase resistance to wear and fatigue; to provide the high hardness and wear resistance of a surface; to reduce deformations of the strengthened details thanks to locality and short duration of interaction of plasma with the surface of metal. The plasmatron and plasma installation is created, superficial plasma nitriding of the grinders strengthened by volume training is carried out.

УДК 621.833:517.443

Омель Д. В., Драган А. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАЦЕПЛЕНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Введение. Зубчатые передачи в процессе работы возбуждают вибрацию. Основным источником вибрации являются динамические процессы, происходящие в зоне зацепления. Интенсивность вибрации зависит от состояния рабочих поверхностей зубьев, а также

Омель Дмитрий Владимирович, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

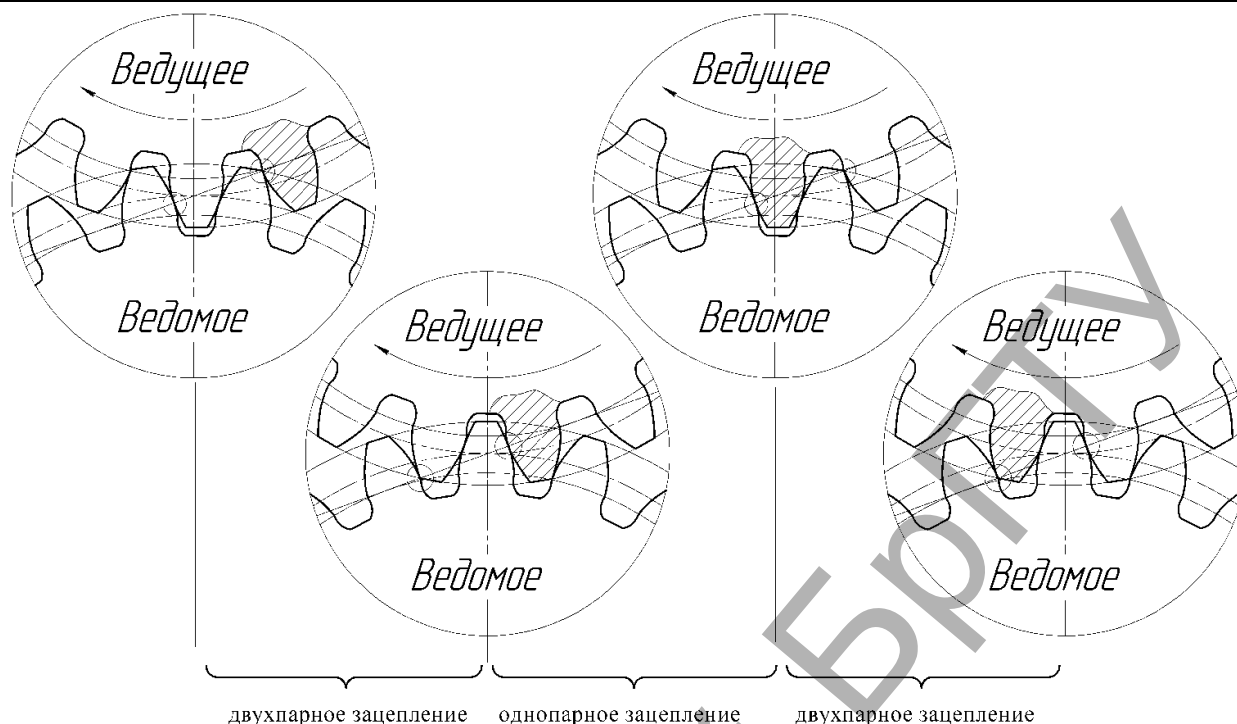


Рисунок 1 – Процесс прохождения зубом зоны зацепления

точности их изготовления и сборки. Кроме того, датчик фиксирует вибрации других источников зубчатого привода – валов, подшипников, охлаждающей жидкости.

Колебания, возбуждаемые в зоне зацепления зубчатой передачи, представляют собой последовательность импульсов характерной формы, следующих с частотой пересопряжения зубьев. Вследствие наличия погрешностей, а также появления и развития эксплуатационных повреждений зубьев, амплитуда и период следования таких импульсов имеют локальные или распределенные отклонения.

Всплеск колебательной энергии имеет сложную структуру, так как является результатом различных процессов, происходящих в зоне зацепления зубьев: удары при входе зубьев в зацепление, изменение динамической нагрузки и деформация зубьев вследствие изменения их жесткости от головки к ножке, скачкообразное изменение нагрузки вследствие чередования одно- и двухпарного зацепления, процессы трения рабочих поверхностей зубьев. Следует отметить, что возбуждение, вызываемое силами трения скольжения и качения, сопровождающими передачу движения в зацеплении, вызывает колебания с малой энергией, поэтому их рассмотрение имеет второстепенный характер.

Постановка задачи. Рассмотрим период прохождения зубом зоны зацепления (рисунок 1).

Для большинства зубчатых передач с коэффициентом перекрытия $1 < \epsilon_\alpha < 2$ этот период включает три интервала:

- 1) зуб входит в зацепление, зацепление двухпарное;
- 2) предыдущая пара зубьев выходит из зацепления, зацепление однопарное, вся нагрузка передается одним зубом;
- 3) последующая пара зубьев входит в зацепление, зацепление двухпарное.

На границах этих интервалов происходит скачкообразное изменение нагрузки, воспринимаемой зубом. В начале первого и третьего периодов происходит ударное взаимодействие зубьев. Причем участие в зацеплении в начале удара неударяющейся пары зубьев, а также упругость валов несколько ослабляют силу удара. Известно, что резкое изменение нагрузки на твердое тело приводит к возбуждению механических колебаний [1, 2]. Для того чтобы выяснить форму и другие характеристики таких колебаний, исследуем характер изменения воспринимаемой зубом нагрузки в период зацепления путем время-частотного анализа сигнала, измеренного путем тензометрирования.

Дискретное вейвлет-разложение. Время-частотный анализ позволяет оценить распределение общей колебательной энергии одновременно по частоте и времени и показать, когда и с какой частотой происходят всплески колебательной энергии. Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $s(t)$ задается путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле [3]:

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

где a – временной масштаб;

b – временная локализация;

$\psi_{a,b}(t)$ – анализирующий вейвлет.

Чтобы сократить избыточность коэффициентов $C_{a,b}$, полученных при непрерывном вейвлет-преобразовании, но сохранить возможность реконструкции исходного сигнала в результате обратного преобразования, значения временного масштаба a и временной локализации b дискретизируют через степень двойки:

$$a = 2^m, b = k \cdot 2^m, \quad (2)$$

где m и k – целые числа.

В этом случае плоскость ab превращается в соответствующую сетку mk , и выражение, определяющее семейство анализирующих вейвлетов, имеет вид:

$$\psi_{m,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi \left(\frac{t}{2^m} - k \right). \quad (3)$$

При дискретном преобразовании сигнал $s(t)$ представляет собой сумму скалярных произведений коэффициентов и анализирующих вейвлетов:

$$s(t) = \sum_{m,k} C_{m,k} \psi_{m,k}(t). \quad (4)$$

Количество дискретных значений m определяет уровень декомпозиции сигнала. Коэффициент 2^m в выражении (3) масштабирует вейвлет по частоте. Частоту просмотра f_t анализирующего вейвлета на заданном уровне декомпозиции m при дискретном разложении сигнала можно приближенно вычислить по формуле:

$$f_m = \frac{f_c \cdot f_d}{2^m}, \text{ Гц}, \quad (5)$$

где f_c – центральная частота материнского вейвлета;
 f_d – частота дискретизации сигнала.

В силу определенных особенностей вычисления коэффициентов при прямом преобразовании и при необходимости реконструкции сигнала используют ортогональные вейвлеты в паре со связанными с ними масштабирующими функциями $\varphi(t)$, которые по своей сути тоже являются вейвлетами, но с немного отличными свойствами. Если вейвлеты рассматривать как аналоги полосовых высокочастотных фильтров при выделении локальных особенностей в сигнале, то масштабирующие функции вейвлетов представляют собой аналоги низкочастотных фильтров, которыми из сигнала выделяются составляющие, не прошедшие вейвлетную фильтрацию.

При такой интерпретации обратного преобразования вместо выражения (4) используется следующее:

$$s(t) = \sum_k CA_k \phi_k(t) + \sum_{m,k} CD_{m,k} \psi_{m,k}(t), \quad (6)$$

где CA_k – коэффициенты аппроксимации;
 $CD_{m,k}$ – коэффициенты детализации.

Частотные образы функций $\psi(t)$ и $\varphi(t)$ имеют различную центральную частоту f_c , что позволяет их условно считать частотными фильтрами при разложении сигнала. На первом уровне разложения (декомпозиции) некоего сигнала $s(t)$, имеющего определенное частотное наполнение, отделяются высокочастотные детализирующие составляющие d_1 и остаются его низкочастотные аппроксимирующие составляющие a_1 . На втором уровне составляющие a_1 сигнала снова разделяются на высокочастотную d_2 и низкочастотную a_2 составляющие. И так продолжается до заданного уровня декомпозиции m .

Сигнал с уровнем декомпозиции $m=7$ можно записать в виде набора компонентов:

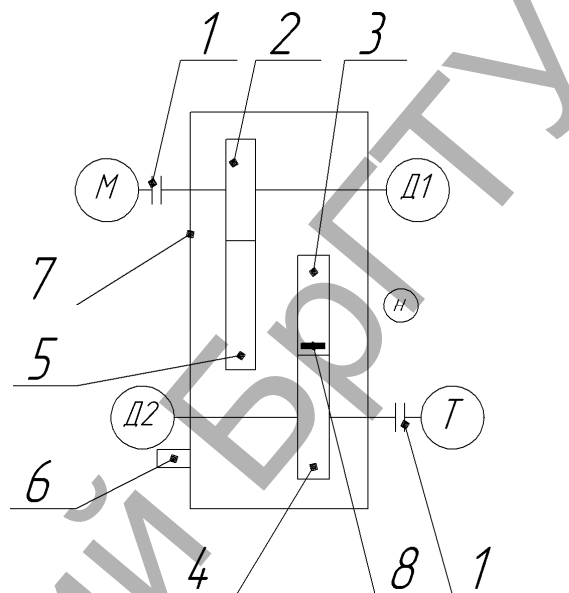
$$s = a_7 + d_7 + d_6 + \dots + d_1. \quad (7)$$

Выбор уровня декомпозиции m основывается на значениях частот или их диапазонов, которые представляют диагностическую значимость при исследовании процессов. Получив набор из аппроксимирующих и детализирующих вейвлетных коэффициентов, можно их модифицировать с целью изменения спектрального состава реконструированного сигнала.

Объект экспериментальных работ. Для проведения пробных измерений нагружения зуба зубчатого колеса работающей зубчатой передачи произведен выбор объектов из числа реальных многовалных при-

водов парка станочного оборудования учебно-производственных мастерских кафедры «Машиноведение» БрГТУ. В результате для проведения испытаний подготовлен следующий объект:

- трехвалный двухступенчатый редуктор с зубчатыми колесами с модулем 2 мм и числом зубьев 47/54 и 37/72, конструкция которого позволяет производить переустановку колес, обеспечивать изменение частоты вращения на ведущем валу в диапазоне от 20 до 1500 мин⁻¹ и нагружающего момента от 0 до 250 Нм (рисунок 2).

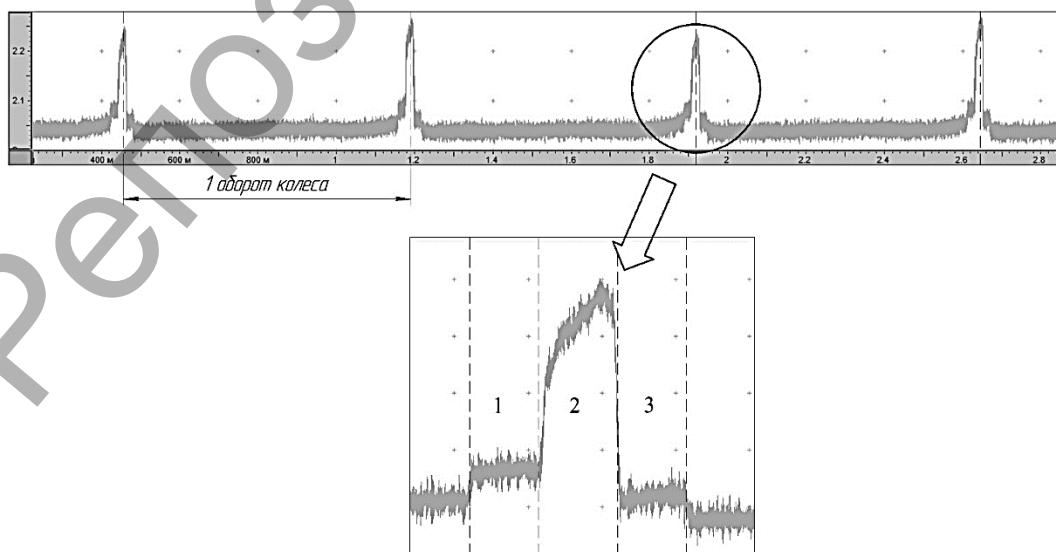


1 – компенсирующая муфта; 2, 3, 4, 5 – зубчатые колеса с $Z=47, 37, 72, 54$ соответственно; 6 – место установки акселерометра; 7 – корпус испытательной коробки; 8 – место установки тензометрического датчика; М – двигатель (балансирная машина 1DS 1036), Т – тормоз порошокый ПТ-250М1; Д1 и Д2 – фотоэлектрические преобразователи угловых перемещений ЛИР – 158Б.000ПС1; Н – токосъемник.

Рисунок 2 – Упрощенная схема испытательного стенда

В настоящей статье рассматривается сигнал, полученный с тензодатчика, установленного на зубчатом колесе $Z=37$.

Вейвлет-разложение сигнала изменения нагрузки. Сигнал, измеренный тензодатчиком, наглядно демонстрирует изменение нагрузки на зуб в периоды нахождения в зацеплении одной или двух пар зубьев (рисунок 3).



1, 3 – двухпарное зацепление, 2 – однопарное зацепление

Рисунок 3 – Характер изменения нагрузки на зуб при тензометрировании: 1, 3 – двухпарное зацепление, 2 – однопарное зацепление

На интервале «2» (рисунок 3) видно изменение напряжения в связи с изменением жесткости зуба по высоте, так как точка контакта перемещается от ножки, более широкой части зуба, к головке. Также стоит отметить наличие высокочастотных колебаний, которые можно связать помехами в измерительных каналах.

В последнее десятилетие с развитием вычислительной техники и программного обеспечения широкое распространение получило вейвлет-преобразование сигналов, которое имеет ряд преимуществ в сравнении с классическим преобразованием Фурье, позволяет рассматривать вибрационный процесс во временной и частотной областях одновременно, углубляет и значительно расширяет диагностические возможности.

Чтобы рассмотреть частотные компоненты сигнала, представленного на рисунке 3, выполним дискретное разложение данного сигнала вейвлетом Добеши 7-го порядка (db7) с уровнем декомпозиции $m=7$. Центральная частота данного вейвлета $f_c=0,6923$ Гц, частота дискретизации сигнала определяется техническими характеристиками измерительной аппаратуры и равна $f_s=46875$ Гц.

На рисунке 4а представлен результат разложения, детализирующие коэффициенты уровней $d_1 \dots d_4$ не показаны, так как по сути отражают шумовую составляющую сигнала и не представляют интерес в данном исследовании. На рисунке 4б представлен рабочий период зуба в увеличении, на котором можно наблюдать описанные выше интервалы одно- и двухпарного зацепления.

На границах интервалов (рисунок 4б) наблюдаются всплески колебательной энергии, связанные с изменением нагрузки. Причем различное направление изменения нагрузки, возрастание или снижение, приводит к одинаковым всплескам, насколько это можно рассмотреть, не прибегая к дополнительным исследованиям. Наибольший всплеск происходит на границе интервалов «2» и «3». В этот момент следующая пара зубьев входит в зацепление, чаще всего с ударом. Причем зона «3» одного зуба будет накладываться на зону

«1» следующего зуба. Таким образом, будет возбуждаться последовательность импульсов с частотой следования в два раза больше частоты пересопряжения зубьев, что непременно находит свое отражение на спектре вибросигнала в виде гармоники $2f_z$ даже исправной зубчатой передачи, а также незначительной модуляции регистрируемого вибросигнала.

Всплески колебательной энергии проявляются на уровнях декомпозиции $m=5$ и выше, что, согласно выражению (5), позволяет относительно точно определить в частотной интерпретации верхнюю границу спектра порождаемого импульса $f_{max}=1014$ Гц

Закключение. Представленная методика исследования процесса нагружения зуба при прохождении им зоны зацепления и с использованием технологии дискретного кратномасштабного вейвлет-разложения позволила выявить не один, а четыре всплеска колебательной энергии неударного характера. Что в свою очередь дополняет теорию возбуждения вибрации зубчатыми передачами, способно объяснить появления на спектре гармоник кратных частоте пересопряжения зубьев, а также появление незначительных модуляций на спектрах вибросигналов исправных зубчатых передач. Технология вейвлет-разложения сигнала позволила с высокой точностью определить частотный диапазон возникающих колебательных импульсов, что согласуется с теорией механических колебаний.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бидерман, В. Л. Теория механических колебаний : учебник для вузов. – М. : Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Гольдин, А. С. Вибрация роторных машин. – М. : Машиностроение, 1999. – 344 с.
3. Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – 4-е изд., доп. и перераб. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 628 с.

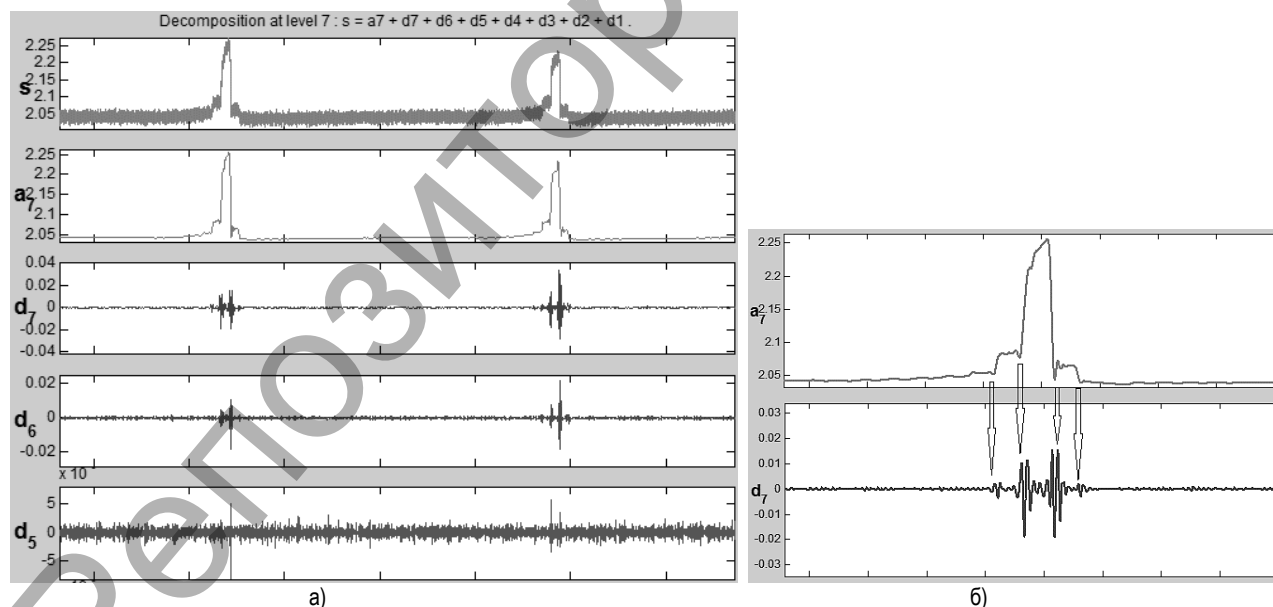


Рисунок 4 – Дискретное вейвлет-разложение (db7, level 7)

Материал поступил в редакцию 19.11.2018

OMES D.V., DRAGAN A.V. Research of cogwheels gearing dynamic processes using wavelet transform technology

With the help of wavelet technology the occurrence of oscillatory pulses is proved when changing the pair of meshing and abrupt changes in the load acting on the tooth. Method for approximate determination of the frequency range of oscillations arising from this is demonstrated. The method bases on the frequency interpretation of the detailing wavelet coefficients.