

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВИБРОАНАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2018 г. К.Т. Кошеков^{1,*}, Ю.Н. Кликушин², А.А. Савостин¹, Н.Н. Софьина³, Н.В. Астапенко¹,
А.А. Кашевкин¹, Б.В. Кошекова¹

¹Северо-Казахстанский государственный университет имени М. Козыбаева
150000 Петропавловск, ул. Абая, 18

²Омский государственный технический университет
644050 Омск, просп. Мира, 11

³Научно-производственное предприятие «РОС»
614000 Пермь, ул. Пермская, 70, оф. 408

*E-mail: kkoshekov@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2017

Описана технология модернизации виброанализаторов путем дополнительного подключения интеллектуального блока анализа временных характеристик измерительного сигнала. В его структуру входят база данных, включающая экспертные оценки, и база знаний, построенная на основе метода идентификационных измерений свойств регулярности/хаотичности характеристик вибросигналов по технологии шкал. Разработан компьютерный прибор для проведения исследований применимости предлагаемых технологий. Представлены результаты вибродиагностики станка-качалки с помощью компьютерного прибора.

Ключевые слова: виброанализаторы, виброметры, идентификационные измерения, интеллектуальные приборы.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение вибраций — это распространенный процесс, позволяющий оценивать состояния механизмов и машин, диагностировать дефекты оборудования. Широкое распространение измерения и анализ вибрационных характеристик нашли при проведении научных исследований в нефтегазовой отрасли и энергетике [1].

Для измерения вибрационных характеристик существуют виброметры, измеряющие только интегральное значение вибрации, виброанализаторы, предназначенные для измерения скорректированных уровней виброускорения, виброскорости октавных, третьоктавных и узкополосных спектров сигналов различных преобразователей, а также для регистрации форм сигналов и их анализа во временной области.

Анализ дает возможность найти как параметры, так и функциональные зависимости входного сигнала, представленного функцией времени. В первом случае — это параметрический анализ, при котором реализуются алгоритмы вычисления параметров массива мгновенных значений входного сигнала, например, максимальное, минимальное, среднее, среднее выпрямленное, среднее квадратическое значения на заданных интервалах. Второе направление — это функциональный анализ, позволяющий получать на основе массива мгновенных значений входного сигнала различные функциональные зависимости, например, корреляционные и спектральные функции сигналов. Одними из лидеров по разработке и внедрению виброанализаторов являются НПО «РОС» (г. Пермь) [2] и ООО «Электронные технологии и метрологические системы» (г. Москва) [3].

В настоящее время в виброметрии существуют различные технологии цифровой обработки сложных сигналов, позволяющие проводить их углубленный анализ и требующие построения систем диагностики и мониторинга по структуре искусственного интеллекта. Примерами таких технологий являются вейвлетное преобразование [4], нейросетевые методы [5] и т.д. Особый интерес представляет временной анализ сложных сигналов, содержащих стационарные и нестационарные составляющие, с целью оценки свойств регулярности/хаотичности этих сигналов. При этом возникает важная прикладная задача — установление логических связей между типами дефектов и значениями оценок степени регулярности/хаотичности.

Для решения указанной задачи авторы предлагают использовать теорию идентификационных измерений сигналов (ТИИС) [6]. ТИИС — это комплекс интеллектуальных технологий (методов и инструментов) идентификации, распознавания и цифровой обработки формы и вариабельности сигналов в структуре глобальных эталонов. Комбинированное применение методов ТИИС и встраивание интеллектуальных инструментов в существующие системы для решения задач распознава-

ния и идентификации сигналов позволило повысить эффективность диагностики и точность оценки состояния топливных элементов [7], гидроагрегатов [8], нефтегазового оборудования [9].

Очевидно, если к существующим функциональным возможностям виброанализаторов дополнительно применить анализ временных характеристик входных сигналов, то можно существенно повысить эффективность этих приборов.

Цель статьи — исследовать возможность применения научно-теоретических положений теории идентификационных измерений сигналов для анализа временных характеристик вибраций, разработать несложный и эффективный метод обработки временных характеристик, предложить новую структуру виброанализаторов.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Содержанием ТИИС являются измерения форм распределений мгновенных значений и вариативности, а также временных интервалов сигнала и его характеристик с обработкой идентификационных параметров в структуре глобальных эталонов с помощью идентификационной шкалы (ИШ). На рис. 1 представлена структура ИШ, включающая элементы, характерные для современных систем искусственного интеллекта.

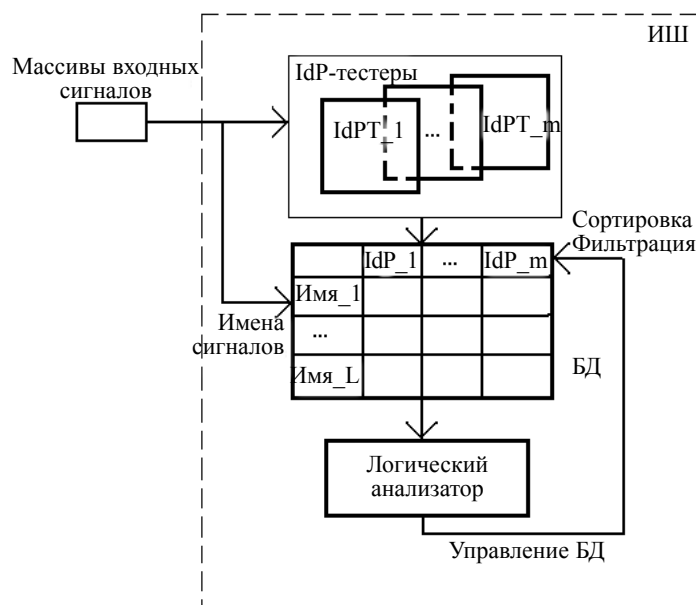


Рис. 1. Структурная схема идентификационной шкалы.

Идентификационные IdP-тестеры — компьютерные инструменты преобразования массивов характеристик входных сигналов в идентификационные параметры (IdP-параметры), в качестве которых могут выступать количественные значения и лингвистические характеристики, свойства которых подчиняются принципам масштабной инвариантности, эквивалентности и согласованной упорядоченности. Встроенная база данных (БД) содержит информацию об IdP-параметрах, сортированные имена форм и вариативности эталонов. В качестве эталонов могут выступать также IdP-параметры — результаты преобразования сигналов определенных состояний объекта или названия сигналов с известными в теории информационно-измерительной техники законами распределений. Интеллектуальная мощность шкалы и разрешающая способность распознавания входных сигналов зависят от количества используемых эталонов.

Работа логического анализатора (ЛА) построена на выдаче экспертных оценок (количественных и качественных) или рекомендаций по результатам идентификационных измерений характеристик входного сигнала, применения методов и алгоритмов сортировки и фильтрации эталонов, сравнения идентификационных параметров сигналов с эталонными значениями, по управлению измерительным процессом. Экспертные оценки формируются специалистом в предметной области.

Особенностью ИШ является возможность измерения формы и вариабельности не только временной, но и других характеристик (спектральной, корреляционной, вейвлетной) сигнала.

2. МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТИИС

В зависимости от конкретной формулировки задачи диагностики и мониторинга методики использования ТИИС могут быть разными.

В результате проведенных исследований был предложен метод обработки временных характеристик входного сигнала вибраций, базирующийся на технологиях оценки отклонений идентификационных параметров характеристик.

Алгоритмически метод реализуется следующими шагами.

Шаг 1. Ввод временной характеристики входного сигнала $X(t)$, формирование для заданной выборки N массива распределений мгновенных значений $X(t) \Rightarrow [X_1, \dots, X_N]$.

Шаг 2. Создание трех шкал:

1) основной (измерительной) (M -Scale) — мгновенные выборочные значения сигнала $X(t)$;

2) прямой (D -Scale) — ранжированные по возрастанию мгновенные значения сигнала $X(t)$;

3) обратной (R -Scale) — ранжированные по убыванию мгновенные значения сигнала $X(t)$.

Вторая и третья шкалы являются упорядоченными, постоянными для данной выборки. Отклонение между ними задает диапазон, в пределах которого располагается измерительная шкала.

В табл. 1 представлен пример составления шкал.

Таблица 1

Пример составления шкал

D -Scale	M -Scale	R -Scale
$y = \text{Sort } X \uparrow$	$x(t)$	$z = \text{Sort } x \downarrow$
-3,01	-2,555	-1,89
-2,975	-2,03	-2,03
-2,905	-2,765	-2,1
-2,835	-2,31	-2,31
-2,765	-2,345	-2,345
-2,73	-2,905	-2,485
-2,555	-3,01	-2,555
-2,485	-2,73	-2,73
-2,345	-1,89	-2,765
-2,31	-2,835	-2,835
-2,1	-2,975	-2,905
-2,03	-2,485	-2,975
-1,89	-2,1	-3,01

Процесс идентификационного измерения состоит в сканировании входного сигнала по фазе путем кольцевого регистрового сдвига значений измерительной (M -Scale) шкалы на один шаг: первое значение переходит на вторую позицию, а на первую — последнее значение выборки и т.д. При этом только M -Scale меняет свое положение относительно других шкал в соответствии с регистровым кольцевым сдвигом.

Шаг 3. Отклонения измерительной шкалы относительно D -Scale и R -Scale при сканировании входного сигнала по фазе определяются по выражениям:

$$D = \sum_{i=1}^N |d_i| = \sum_{i=1}^N |y_i - x_i|; \quad (1)$$

$$R = \sum_{i=1}^N |r_i| = \sum_{i=1}^N |z_i - x_i|. \quad (2)$$

В результате сканирования получаются две траектории движения измерительной шкалы и, соответственно, фазовый портрет (характеристика) сигнала.

Шаг 4. Определяются относительные расстояния траекторий (D) и (R). Поскольку D -Scale и R -Scale являются упорядоченными (регулярными) и противоположно направленными, а M -Scale всегда располагается между ними, то возникает возможность количественной оценки свойств регулярности/хаотичности сигналов.

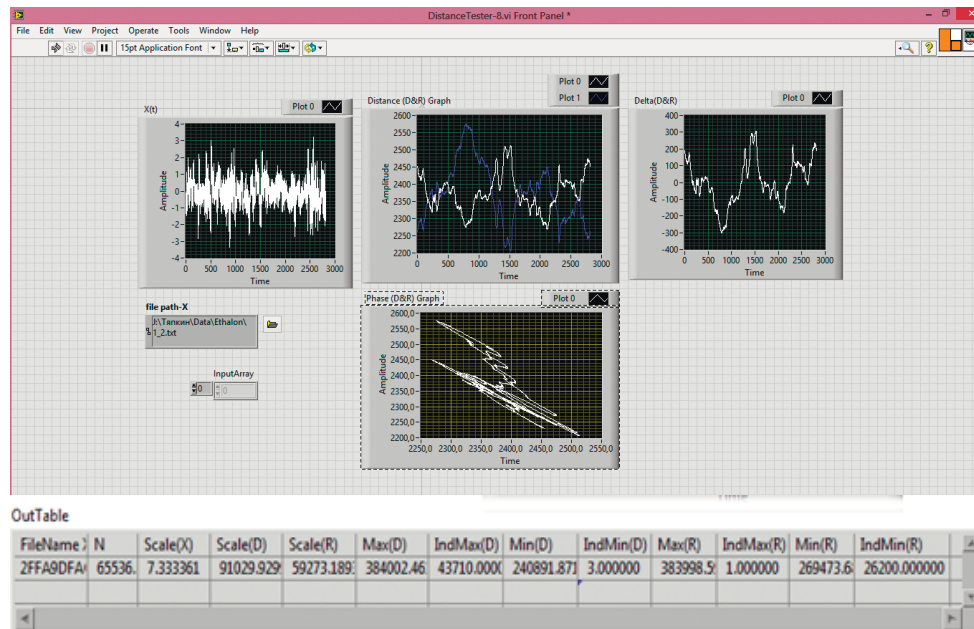


Рис. 2. Лицевая панель компьютерного прибора для измерений временных характеристик.

Для исследования предложенного метода в среде LabVIEW был разработан компьютерный прибор обработки временных характеристик сложных сигналов вибраций. В верхней части лицевой панели инструмента (рис. 2) располагаются индикаторы (мониторы) отображения характеристик для анализа и выдачи заключений экспертам:

- вид входного сигнала — временной характеристики диагностического сигнала;
- изменения идентификационных параметров D (линия белого цвета) и R (линия синего цвета) отклонения измерительных шкал от границ при сканировании входного сигнала по фазе;
- разность между идентификационными параметрами D и R ;
- фазовый портрет ([10] формируется как объединение разностей значений шкал $\Phi\P = \cup(d_i, r_i)$, определяемых по формулам (1) и (2).

Также на панели расположены элементы управления экспериментальными исследованиями: указатель места для ввода файла в прибор (file path X), устройство ввода объема выборки (Progress), переключатель вывода результатов эксперимента в виде отдельного табличного файла (Excel).

В результате проведенных исследований с применением реальных диагностических сигналов были определены идентификационные параметры, достаточные для описания состояния объекта диагностики. На панели компьютерного прибора результаты идентификационных измерений представлены в нижней части в виде таблицы (File Name — Имя файла):

- 1) N — объем выборки сигнала;
- 2) $Scale(X)$ — размер сигнала;
- 3) $Scale(D)$ — размер левой границы (D);
- 4) $Scale(R)$ — размер правой границы (R);
- 5) $Max(D)$ — максимальное отклонение траектории (D);
- 6) $IndMax(D)$ — координата максимального отклонения траектории (D);
- 7) $Min(D)$ — минимальное отклонение траектории (D);
- 8) $IndMin(D)$ — координата минимального отклонения траектории (D);
- 9) $Max(R)$ — максимальное отклонение траектории (R);
- 10) $IndMax(R)$ — координата максимального отклонения траектории (R);

- 11) $\text{Min}(R)$ — минимальное отклонение траектории (R);
 12) $\text{IndMin}(R)$ — координата минимального отклонения траектории (R).

3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВИБРОАНАЛИЗАТОРА С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ БЛОКОМ

Предложен виброанализатор, проводящий не только традиционный параметрический и функциональный анализы, но и цифровую обработку временных характеристик измерительных сигналов. Структурная схема виброанализатора с интеллектуальным блоком обработки временных характеристик (БОВХ) измерительных сигналов представлена на рис. 3.

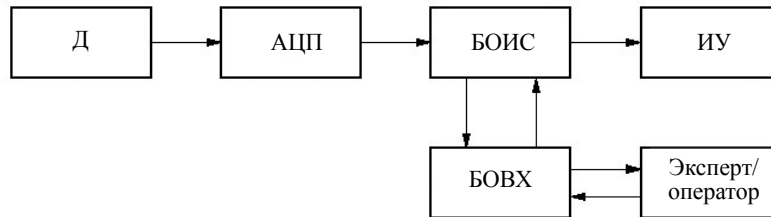


Рис. 3. Структурная схема виброанализатора с интеллектуальным блоком обработки временных характеристик.

На нем также указаны блоки, характерные для существующих виброанализаторов: Д — датчик вибраций; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БОИС — блок обработки измерительных сигналов; ИУ — индикаторное устройство.

Структурная схема БОВХ, раскрывающая принцип работы, представлена на рис. 4. Интеллектуальный блок БОВХ функционирует в двух режимах («Вывод ЛХ» и «Запись ЛХ») и включает в себя базу данных (БД) и базу знаний (БЗ). Эксперт/оператор — специалист в области неразрушающего контроля и диагностики, участвующий в измерительных процессах и формировании лингвистических оценок и заключений, записываемых в БД.

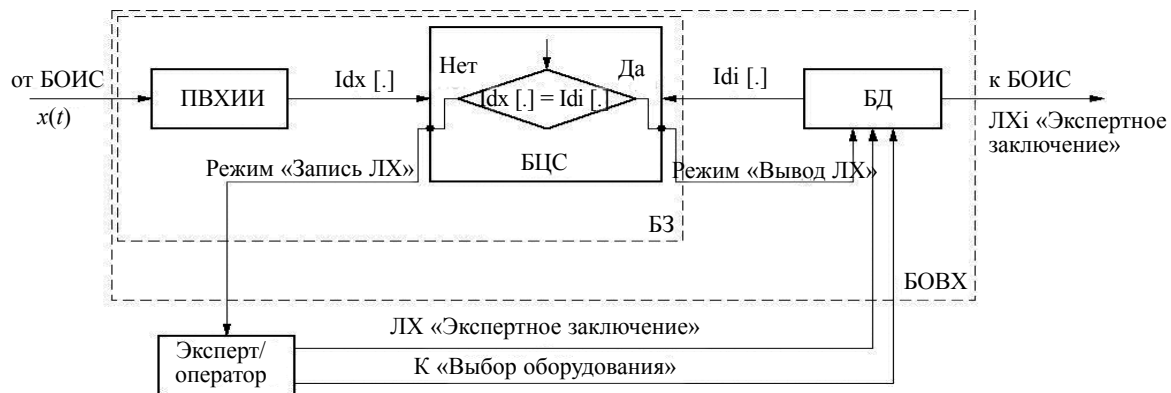


Рис. 4. Структурная схема БОВХ.

БД имеет структуру, включающую количественные значения идентификационных параметров $\text{Idi}[.]$ временных характеристик измерительного сигнала и соответствующие лингвистические экспертные оценки и заключения (i — номер строки БД) (табл. 2).

Таблица 2

Форма БД

Идентификационные параметры, $\text{Idi}[.]$				Экспертные оценки и заключения	
$\text{Scale}(X)$	$\text{Scale}(D)$	...	$\text{IndMin}(R)$	<Обозначение и название дефекта>	<Рекомендации по устранению>

Для каждого объекта диагностики БД индивидуальная, поэтому перед проведением измерительного эксперимента оператор формирует команду «Выбор оборудования».

В соответствии с разработанной методикой в БЗ с выхода БОИС сформированная временная характеристика исследуемого сигнала $X(t)$ вводится в преобразователь для идентификационных измерений (ПВХИИ), на выходе из него формируется массив параметров идентификационных измерений $Idx[.]$.

В блоке БЦС проводится циклическое сравнение соответствующих идентификационных параметров исследуемого сигнала с записанными в БД для каждого дефектного состояния. В случае равенства $Idx[.] = Idi[.]$ БОВХ переходит в режим «Вывод ЛХ» и выводятся лингвистические экспертные оценки и заключения. В противном случае осуществляется переход в режим «Запись ЛХ» и при участии эксперта для $Idx[.]$ формируются лингвистические характеристики с записью в БД.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований относительно применения предлагаемых технологий реализованный БОВХ был встроен в малогабаритный виброметр «Корсар» компании НПП «РОС» (г. Пермь). В настоящее время (благодаря малым габаритам и простоте использования) данный прибор используется для **вибродиагностики** насосов различных марок, компрессоров, турбоагрегатов, вентиляторов, газодувок, дымососов, фундаментов, трансформаторов и т.д. Зарегистрированные замеры вибрации можно хранить в памяти виброметра или передавать по интерфейсам USB и RS-232 в компьютер, которые впоследствии обрабатываются с помощью разработанного прибора идентификационных измерений.

Экспериментальные исследования были проведены совместно с НПП «РОС» на функционирующих в технологическом процессе станках-качалках. Данное оборудование предназначено для передачи поступательного движения глубинному штанговому насосу, расположенному на дне нефтяной скважины. Для повышения эффективности работы оборудование должно обладать уникальной кинематической схемой, а главное — необходимо своевременно проводить диагностику в режиме функционирования с заменой комплектующих и компонентов.

В настоящее время диагностика станков-качалок проводится по анализу спектральных частотных характеристик вибродиагностических сигналов и ваттметрграмм (динамических изменений потребляемой мощности). В табл. 3 представлены экспертные оценки дефектных состояний при вибродиагностическом контроле с помощью виброметра «Корсар».

Таблица 3

Экспертные оценки дефектных состояний станков-качалок

Состояние	Обозначение дефекта	Название дефекта
Вибродиагностика		
C(1)	СКД.ДП.1.0	Дефект подшипника первого электродвигателя
	СКД.ДП.20	Дефект подшипника второго электродвигателя
C(2)	СКД.ОК.3.0	Ослабление крепления агрегата к раме
	СКД.ОК.4.0	Ослабление крепления рамы к фундаменту
	СКД.ОК.1	Ослабление крепления в точке 1 электродвигателя
	СКД.ОК.2.0	Ослабление крепления в точке 2 электродвигателя

Для станка-качалки в настоящее время известно 6 дефектов [2], однако существующим анализом по частотным характеристикам выделяются только дефектные состояния C(1) и C(2) — группы дефектов с похожими признаками. Следовательно, если при анализе идентифицировать название конкретного дефекта, вносящего наибольший вклад в общий уровень вибрации, то точность вибродиагностики существенно повысится.

В результате проведенных исследований было установлено:

1) в среднем с 95-процентной вероятностью распознаются все 6 дефектов станков-качалок по вибродиагностическим сигналам, следовательно, возможна модернизация виброанализаторов путем применения элементов ТИИС для анализа временных характеристик;

2) измерение свойств регулярности/хаотичности вибросигналов удобно проводить с помощью технологии трех шкал: двух неподвижных, задающих диапазон измерений (D -Scale, R -Scale), и третьей измерительной M -Scale, определяющей в процессе сканирования отклонение перемещения по фазе и ее положение относительно D -Scale и R -Scale;

- 3) степень регулярности/хаотичности определяется по относительному расстоянию между измерительной *M-Scale* и двумя другими шкалами (*D-Scale* и *R-Scale*);
- 4) смещение измерительной шкалы от центра в ту или иную сторону указывает на наличие некоторой регулярности (упорядоченности) в сигнале, поскольку *D-Scale* и *R-Scale* являются упорядоченными по возрастанию и убыванию значений отсчетов анализируемого сигнала соответственно;
- 5) наличие некоторой регулярности (упорядоченности) в сигнале указывает с определенной вероятностью на присутствие признаков наличия дефектов в объекте диагностирования;
- 6) соответствие между результатами идентификационных измерений степени регулярности/хаотичности и типами возможных дефектов устанавливается путем логического анализа с привлечением знаний экспертов данной предметной области, следовательно, данная процедура индивидуальна для каждого анализируемого объекта;
- 7) интеллектуальный блок БОВХ полностью реализуем с применением современных микроконтроллеров (например, STM32), он легко встраивается в современные виброанализаторы, также обеспечивая дистанционную диагностику и мониторинг, диспетчеризацию объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что научно-теоретические положения теории идентификационных измерений полностью применимы для анализа временных характеристик сложных сигналов вибраций, обеспечивая достаточно эффективную оценку состояния динамического оборудования.

Методика идентификационного измерения свойств регулярности/хаотичности с помощью технологии трех шкал позволяет адекватно идентифицировать и распознавать сложные по форме временные характеристики вибросигналов.

Предложенный виброанализатор с интеллектуальным блоком обработки временных характеристик вибросигналов имеет ряд преимуществ, поскольку дополнительно может представлять экспертные оценки состояния оборудования.

Направление дальнейших исследований сконцентрировано на наращивании базы данных виброанализаторов, использующих идентификационные измерения не только для станка-качалки, но и другого промышленного оборудования.

Работа выполнена в рамках научного гранта № 274 Министерства образования и науки Республики Казахстан и в порядке творческого сотрудничества Северо-Казахстанского государственного университета, Омского государственного технического университета и НПП «РОС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akhtar Hussain, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi, Fouad Brikci. An expert system for acoustic diagnosis of power circuit breakers and on-load tap changers // Expert Systems with Applications. V. 42. Issue 24. 30 December 2015. P. 9426—9433.
2. <http://www.ros-diagnostics.ru>
3. <https://zetlab.com>
4. Satish Mohanty, Karunesh Kumar Gupta, Kota Solomon Raju. Multi-channel vibro-acoustic fault analysis of ball bearing using wavelet based multi-scale principal component analysis / IEEE Twenty First National Conference on Communications (NCC). 2015. 27 Feb.—1 March 2015. Mumbai, India. P. 37—40.
5. Subhransu Sekhar Dash, M. Arun Bhaskar, Bijaya Ketan Panigrahi, Swagatam Das. Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems // Proceeding of ICAIECES. Springer. 2015. P. 1360.
6. Кликушин Ю.Н., Кошеков К.Т. Методы и средства идентификационных измерений сигналов. Петропавловск: Изд-во СКГУ им. М. Козыбаева, 2007. 186 с.
7. Koshekov K.T., Klikushin Yu. N., Kobenko V.Yu., Evdokimov Yu. K., Demyanenko A.V. Fuel Cell Diagnostics Using Identification Measurement Theory // J. of Fuel Cell Science and Technology 11(5), 051003. Paper No: FC-14-1027.
8. Klikushin Yu. N., Koshekov K. T., Kobenko V. Yu., Trunin E. S. An algorithm for evaluating the state of a generating unit based on the identification measurements of vibrosignals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. Issue 7. P. 413—418.
9. Koshekov K.T., Klikushin Yu.N., Kobenko V.Yu., Sofina N.N., Savostin A.A., Kashevkin A.A. Testing a Pump Unit by Identification Measurements of Vibration Signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2016. V. 52. No. 5. P. 280—286.
10. Кликушин Ю.Н., Кобенко В.Ю. Идентификационный способ измерения параметров сигнала // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 229—234.