

УДК 62.7:519.2

И.М. Коржов, О.Ю. Кропачек

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

## РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР СИСТЕМОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВИБРОСИГНАЛОВ СРЕДСТВАМИ LABVIEW

В статье рассмотрена компьютеризированная реализация процедуры альтернативной диагностики состояния сложных промышленных вибрационных объектов. Представлена реализация получения тестовых V- и W-статистик, отражающих энергетическую составляющую сигнала и скорость изменения этой составляющей соответственно. Разработаны и исследованы алгоритмы получения коэффициента  $R_{\xi\eta}$  взаимной спектральной нестационарности как критерия диагностики сложных промышленных вибрационных объектов.

**Ключевые слова:** вибросигнал, диагностика промышленных объектов, тестовая статистика, вычислительная процедура, LabView.

### Введение

**Постановка проблемы.** Незаразрушающий контроль и безразборная диагностика является наиболее перспективными направлениями при построении современных систем контроля и управления. Алгоритмы, которые реализуют указанные технологии, основаны на обработке измерительной информации от датчиков, которые установлены на важные узлы сложных промышленных объектов.

Одними из наиболее распространенных сигналов, которые используют при безразборной диагностике, являются измерительные вибрационные сигналы [1, 2].

Вибрационные сигналы всегда содержат существенную случайную высокочастотную составляющую, поэтому оценка характеристик указанной составляющей является важным моментом при обработке измерительных сигналов. Традиционно в подобных случаях используют спектральное преобразование таких высокочастотных сигналов, а в последнее время вейвлет-преобразование, имеющее ряд преимуществ перед другими спектральными преобразованиями такими, как преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье [3, 4].

В статье приведена реализация алгоритмов альтернативной функциональной диагностики средствами LabView для построения систем контроля, диагностики, идентификации бортовой (стендовой) информационно-измерительной системы, оценивающей состояние топливной системы дизелей [5].

**Цель статьи.** Реализация методов многофакторного дисперсионного анализа для вычислительных процедур системного информационного преобразования спектрально нестационарных вибросигналов в задаче альтернативной функциональной диагностики дизельных двигателей большой мощности.

### Исследование первичных измерительных стохастических нестационарных вибросигналов

На рис. 1 представлены исходные вибросигналы пьезоэлектрического акселерометра АП-18, установленного на трубку топливного насоса высокого давления дизельного двигателя Д80 тепловозов ТГМ4 для двух состояний топливной системы: а – рабочего (в нормальном состоянии  $S_0$ ) и б – с неисправностью (с нарушением состояния  $S_1$ ) [6].

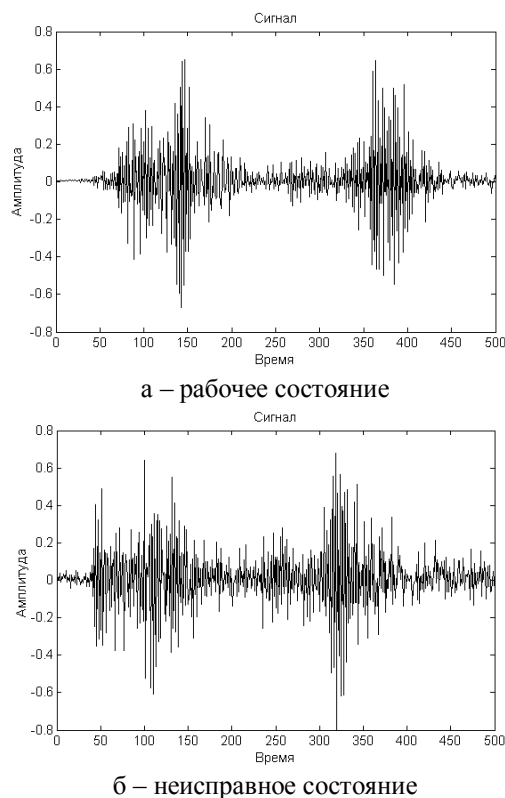


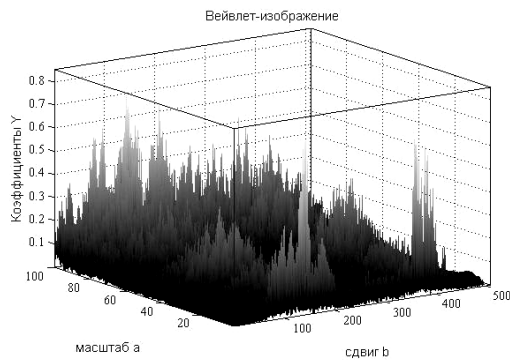
Рис. 1. Вибросигналы различных состояний топливной системы дизельных двигателей

Спектральное разложение этих сигналов реализовано на основе вейвлет-преобразования [7]:

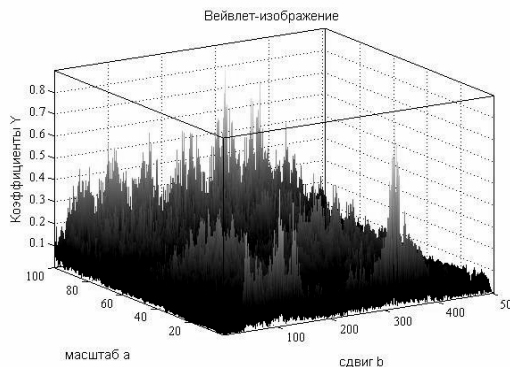
$$W_{g_n}(a_1, b_q)Z = a_1 / \sqrt{C_{g_n} |a_1|} \times \sum_{k=1}^N z_k \left[ g_{n-1}(t_{k-1} - b_q) / a_1 - g_{n-1}(t_k - b_q) / a_1 \right], \quad (1)$$

где  $W_{g_n}(\bullet)Z$  – вейвлет-коэффициент, соответствующий величинам масштаба  $a_1$  и сдвига  $b_q$  при вейвлет-преобразовании процесса  $Z(t)$ ,  $z_k = x_k$  (если  $Z(t) = X(t)$ ),  $z_k = y_k$  (если  $Z(t) = Y(t)$ ),  $g_{n-1}(t)$  – гауссовский материнский вейвлет ( $n-1$ ) порядка,  $C_{g_n}$  – нормирующий множитель,  $z_k$  – отсчеты (реализации) процесса  $Z(t)$ ,  $k = \overline{1, N}$ .

Непрерывные вейвлет-преобразования этих сигналов, осуществленные в соответствии с математической моделью (1), представлены на рис. 2. Вариант а соответствует, б – с функциональным нарушением  $S_1$  в работе топливной системы.



а – рабочее состояние  $S_0$



б – функциональное нарушение  $S_1$

Рис. 2. Вейвлет-изображения соответствующих состояний топливной системы

Выражение (1) позволяет сформировать двумерное, в пространстве масштаба  $a$  и сдвига  $b$ , множество коэффициентов  $W_{sl} = W_{g_k}(a_s, b_l)x$ , где  $s = \overline{1, S}$ ,  $l = \overline{1, L}$ . Используя сечения такого двумерного множества отдельно по  $a$  и отдельно по  $b$ ,

получают два набора одномерных последовательностей  $W_{sl}$  при условиях, соответственно,  $a_s = \text{const}$ ,  $s = \overline{1, S}$ ,  $b = \overline{b_1, b_L}$  и  $b_l = \text{const}$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $a = \overline{a_1, a_S}$ .

Эти последовательности коэффициентов  $\{W_{sl}\}_1^L, \dots, \{W_{sl}\}_1^L$  и  $\{W_{sl}\}_1^S, \dots, \{W_{sl}\}_1^S$  и служат вектором входных сигналов диагностической системы [8].

### Моделирование вычислительных процедур получения тестовой V-статистики

Автоматическое определение мощности исходного вибросигнала  $X(t_i)$  (рис. 1) осуществляется на основе тестовой V-статистики:

$$V = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^2 / \sigma_0^2 - 1) / \sqrt{0.5K_{\varepsilon(0)} + 1}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i = \overset{\circ}{x}(t_i)$  – центрированное значение вибросигнала  $X(t_i)$ ,  $\sigma_0^2$  – дисперсия исходного вибросигнала для состояния  $S_0$ ,  $K_{\varepsilon(0)}$  – кумулянтный коэффициент эксцесса исходного вибросигнала  $X(t)$ , если состояние объекта вибродиагностики  $S \in S_0$ .

Компьютерная реализация этой статистики средствами LabView выполнена в виде виртуального прибора (ВП), пиктограмма которого представлена на рис. 3, блок-диаграмма на рис. 4.

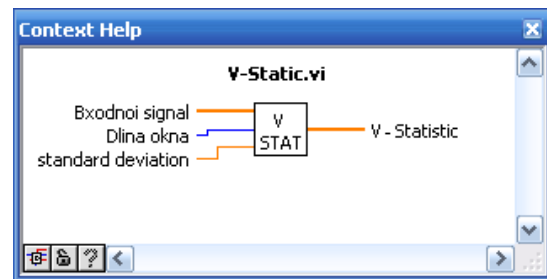


Рис. 3. Пиктограмма ВП V-статистики

ВП V-статистика имеет три входных переменных (рис. 3):

- 1) входной сигнал  $\varepsilon_i$ , представленный одномерным массивом переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита);
- 2) длина окна  $n$  (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, рис. 5);
- 3) дисперсия исходного вибросигнала  $\sigma_0^2$  (переменная типа double, числа с плавающей запятой, 64 бита).

Выходной сигнал ВП – это вычисленные значения V-статистики в виде одномерного массива переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита).

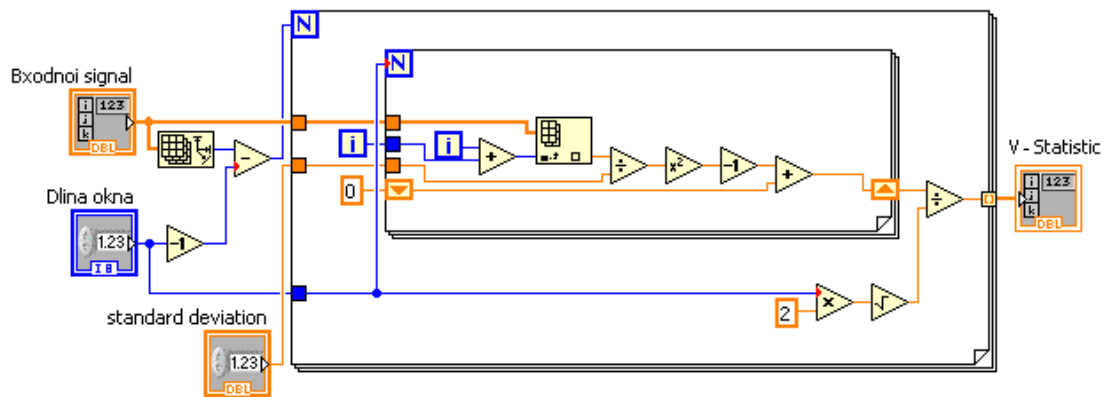


Рис. 4. Блок-диаграмма ВП V-статистики

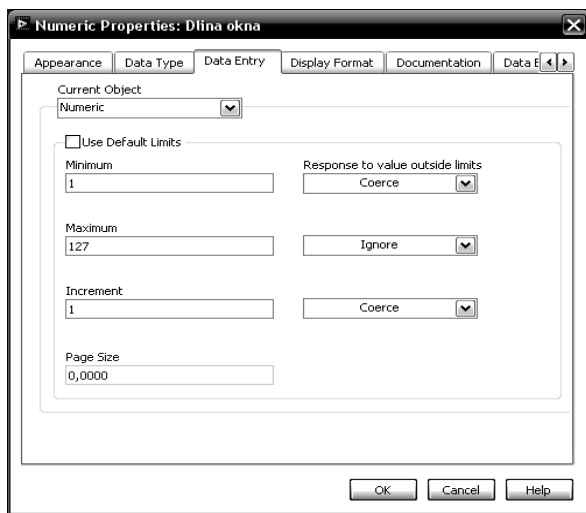
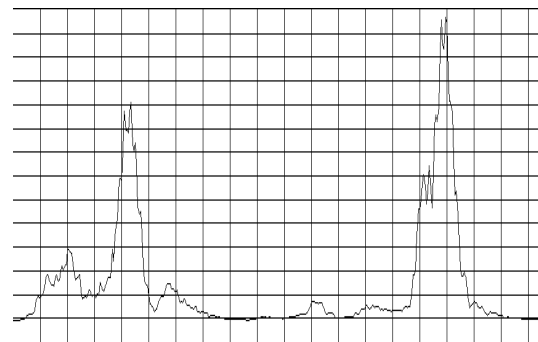


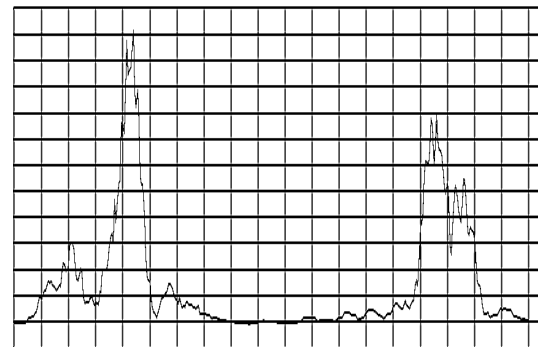
Рис. 5. Ограничения возможных значений длины окна n

Для реализации формулы (2) использовано два цикла типа For Loop, один из которых (внутренний) вложен в другой (внешний). Вложенный цикл реализует разложение одномерного массива входного сигнала на конкретные значения  $\epsilon_i$  (которые находятся в окне в данный момент) с последующим вычислением квадрата отношения значения  $\epsilon_i$  с дисперсией исходного вибросигнала для состояния  $S_0$  и вычитанием из него единицы. Вложенный цикл повторяется n-раз (определяется длиной окна) с накоплением суммы вычисляемых разниц. После выдачи вложенным циклом значения суммы вычисленных разниц, во внешнем цикле вычисляется отношение выданного значения с квадратным корнем удвоенной длиной окна n, для получения значения V-статистики для актуального расположения окна. Внешний цикл повторяется до тех пор пока окно не достигнет конца сигнала (количество итераций на единицу больше разницы длины сигнала и длины окна n), первая итерация внешнего цикла соответствует расположению окна в начале сигнала и охватывает n первых значений  $\epsilon_i$ , а последняя – n последних значений  $\epsilon_i$ , т.е. выходная V-статистика будет иметь количество значений на единицу больше разницы длины сигнала и длины окна n.

Результаты применения ВП V-статистики для вибросигналов, соответствующих рабочему (а) и неисправному состоянию (б) топливной системы дизельных двигателей приведены на рис. 6.



а – рабочее состояние



б – функциональное нарушение

Рис. 6. V-статистики для вибросигналов топливной системы дизельных двигателей

### Моделирование вычислительных процедур получения тестовой W-статистики

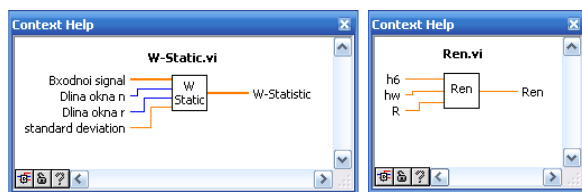
Статистика V позволяет получать информацию и о мгновенной скорости W изменения мощности вибросигнала

$$W = r^{-1} \left( 0.5K_{\mathcal{E}(0)} + 1 \right)^{-1/2} \cdot \left\{ \sum_{i=n+1}^{n+r} \left( \frac{\epsilon_i}{\sigma_0} \right)^2 - \sum_{i=1}^r \left( \frac{\epsilon_i}{\sigma_0} \right)^2 \right\},$$

усредненной для r отсчетов сдвига между двумя последовательными V-статистиками.

Реализация алгоритма W-преобразования средствами LabView представлена на рис. 7, а (пиктограмма) и рис. 8 (блок-диаграмма). ВП W-статистика имеет четыре входных переменных:

- 1) входной сигнал  $\epsilon_i$ , представленный одномерным массивом переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита);
- 2) длина окна  $n$  (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, рис. 5);
- 3) длина окна  $r$  (переменная типа byte, 8 бит, которая может принимать целочисленные значения от 1 до 127, аналогично рис. 5);
- 4) дисперсия исходного вибросигнала  $\sigma_0^2$  (переменная типа double, числа с плавающей запятой, 64 бита).



а – W-статистика      б – расчёт  $R_{\epsilon\eta}$   
Рис. 7. Пиктограммы ВП

Выходной сигнал ВП – это вычисленные значения W-статистики в виде одномерного массива переменных типа double (вещественные числа с плавающей запятой, 64 бита).

ВП W-статистика реализует вычисление согласно формуле (3), для этого использовано три цикла типа For Loop, два из которых (внутренние) вложены в другой (внешний). Вложенные циклы реализуют разложение одномерного массива входного сигнала на конкретные значения  $\epsilon_i$  (которые находятся в соответствующих окнах сдвинутые друг по отношению к другу на  $n$ ) с последующим вычислением квадрата отношения значения  $\epsilon_i$  с дисперсией исходного вибросигнала для состояния  $S_0$ . Вложенные циклы повторяются  $r$  раз (определяется длиной окна) с накоплением суммы соответствующих квадратов соотношений. После выдачи вложенными циклами значения сумм вычисленных квадратов соотношений, во внешнем цикле вычисляется отношение разницы выданных сумм с удвоенным квадратным корнем из длины окна  $r$ , для получения значения W-статистики для актуальных расположений окон. Внешний цикл повторяется до тех пор пока одно из окон не достигнет конца сигнала (количество итераций равно разнице длины

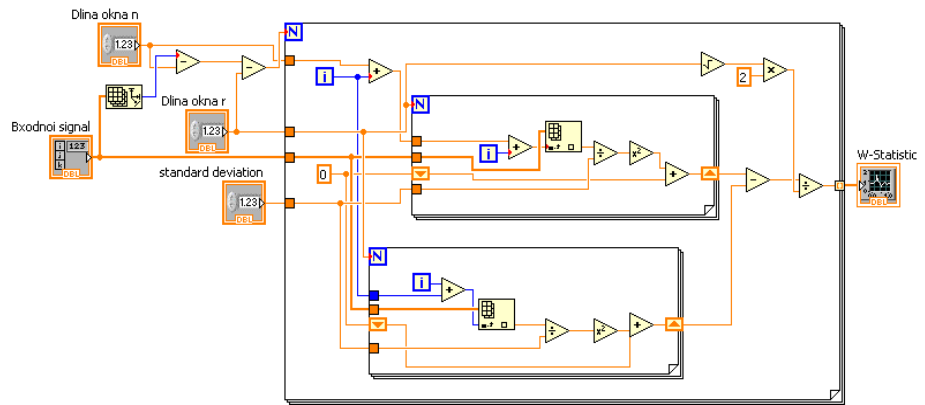
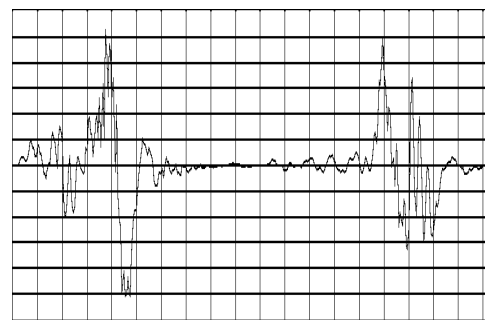


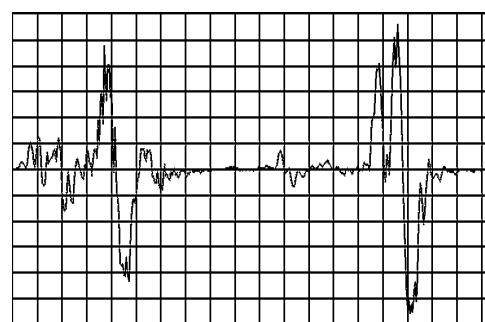
Рис. 8. Блок-диаграмма ВП W-статистики

сигнала и длин окон  $n$  и  $r$ ), первая итерация внешнего цикла соответствует расположению первого окна в начале сигнала и охватывает  $r$  первых значений  $\epsilon_i$ , а последняя итерация – расположению второго окна с охватом  $r$  последних значений  $\epsilon_i$ , т.е. выходная W-статистика будет иметь количество значений равное разнице длины сигнала и длин окон  $n$  и  $r$ .

Результаты применения ВП W-статистики для вибросигналов, соответствующих рабочему (а) и неисправному состоянию (б) топливной системы дизельных двигателей приведены на рис. 9.



а – рабочее состояние



б – функциональное нарушение

Рис. 9. W-статистики для вибросигналов топливной системы дизельных двигателей

### Вычисление коэффициента $R_{\epsilon\eta}$ взаимной спектральной нестационарности

Коэффициент  $R_{\epsilon\eta}$  взаимной спектральной нестационарности, полученный после вейвлет-преобразования [7], на основе выражения

$$R_{\xi\eta} = \frac{1 + (h_{\sigma} h_{\omega})^2 + (1 + h_{\omega}^2) R h_{\sigma}}{\sqrt{(1 + h_{\sigma}^2 + 2 R h_{\sigma}) (1 + h_{\omega}^2 h_{\sigma}^4 + 2 R h_{\omega}^2 h_{\sigma})}} \quad (4)$$

( $h_{\sigma}$  – отношение дисперсий спектров энергетической составляющей вибросигнала и дисперсий спектров изменения мощности вибросигнала,  $h_{\omega}$  – отношение частотных составляющих спектров энергетической составляющей вибросигнала и дисперсий спектров изменения мощности вибросигнала,  $R$  – парная линейная корреляция спектров, указанных составляющих вибросигнала) является основным параметром критериальной диагностической статистики.

Для получения  $R_{\xi\eta}$  (4) создан ВП, пиктограмма которого представлена на рис. 7, б, а блок-диаграмма – на рис. 10.

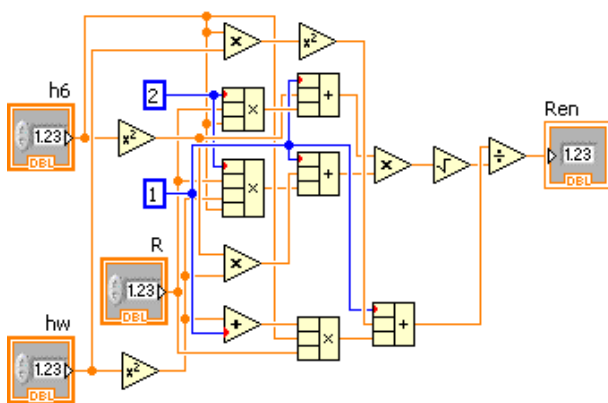


Рис. 10. Блок-диаграмма ВП для расчёта  $R_{\xi\eta}$

## Выводы

В статье представлена разработка алгоритмического и программного обеспечения информационно-измерительной системы функциональной альтернативной диагностики состояния топливной системы дизельных двигателей большой мощности. Реализованы процедуры получения тестовых  $V$ - и  $W$ -статистик, составляющих дисперсного преобразования

вибросигналов. Автоматизирована процедура нахождения коэффициента  $R_{\xi\eta}$  взаимной спектральной нестационарности как критерия диагностики сложных промышленных вибрационных объектов.

## Список литературы

1. Щапов П. Ф. Синтез двумерных диагностических параметров при ковариационном анализе трехмерных вейвлет-преобразований вибросигналов / П.Ф. Щапов, Р.П. Мигуценко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – №3. – С. 69 – 75.
2. Грень Я.В. Вимірювання та аналіз нестационарних вібрацій методами цифрової обробки сигналів: дис. канд. техн. наук: 05.11.01 / Я.В. Грень. – Львів, 1999. – 210 с.
3. Дремін І. М. Вейвлет-аналіз та його використання / І. М. Дремін, О. В. Іванов, В. А. Нечитайло // УФН. – 2001. – Т.171. – №5. – С. 465 – 501.
4. Jianjia Pan. Edge Detection Combining Wavelet Transform and Canny Operator Based on Fusion Rules / Pan Jianjia // International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Baoding. – 2009. – Pp. 324 – 328.
5. Щапов П. Ф. Синтез информационной модели процедуры альтернативной функциональной диагностики / П. Ф. Щапов, Р. П. Мигуценко // Приборы и методы измерений. – Минск. – 2014. – Вып. 2. – С. 94 – 100.
6. Мигуценко Р. П. Експериментальна перевірка моделі оптимізації простору діагностичних параметрів при вейвлет-перетвореннях вібросигналів дизельних агрегатів / Р. П. Мигуценко // Вісник Національного транспортного університету. – Київ. – 2013. – №28. – С. 343 – 350.
7. Шитов А. Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для моделирования и обработки экспериментальных данных: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / А. Б. Шитов. – Иваново, 2001. – 124 с.
8. Мигуценко Р.П. Структурно-алгоритмічна оптимізація систем вібродіагностики за критерієм мінімуму імовірності помилки / Р.П. Мигуценко // Метрологія і прилади. – 2014. – №1. – С. 168 – 171.

Надійшла до редколегії 30.10.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

## РЕАЛІЗАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕДУР СИСТЕМОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВІБРОСИГНАЛІВ ЗАСОБАМИ LABVIEW

І.М. Коржов, О.Ю. Кропачек

У статті розглянута комп'ютеризована реалізація процедури альтернативної діагностики стану складних промислових вібраційних об'єктів. Представлена реалізація отримання тестових  $V$ - і  $W$ -статистик, що відображають енергетичну складову сигналу і швидкість зміни цієї складової відповідно. Розроблено та досліджено алгоритми отримання коефіцієнта  $R_{\xi\eta}$  взаємної спектральної нестационарності як критерію діагностики складних промислових вібраційних об'єктів.

**Ключові слова:** вібросигнал, діагностика промислових об'єктів, тестова статистика, обчислювальна процедура, LabView.

## IMPLEMENTATION OF COMPUTING PROCEDURES OF SYSTEM INFORMATIONAL TRANSFORMATION OF NON-STATIONARY VIBRO SIGNALS WITH LABVIEW MEANS

I.M. Korzhov, O.Yu. Kropachok

The article considers the computerized implementation of the procedure for alternative diagnostics of complex industrial vibration objects. The implementation of obtaining test  $V$  and  $W$  statistics reflecting the energy component of the signal and the rate of change of this component, respectively, is presented. The algorithms for obtaining the coefficient  $R_{\xi\eta}$  of mutual spectral nonstationarity as a criterion for diagnosing complex industrial vibration objects have been developed and investigated.

**Keywords:** vibration signal, diagnostics of industrial objects, test statistics, computational procedure, LabView.