

УДК 519.254

Р.П. Мигущенко

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СРЕДНЕГО РИСКА

В статье рассмотрена задача определения оптимального количества информативных параметров, полученных на основе дисперсионного и ковариационного анализов результатов вейвлет-преобразования спектрально-нестационарных вибросигналов при диагностике состояния промышленных вибрационных объектов. В статье показано, что информативными параметрами при анализе вибрации для проведения контроля и диагностики могут быть дисперсии, которые зависят от сдвига, и критериальные F-статистики, которые зависят от масштаба, результатов вейвлет-преобразования информационных вибросигналов. Минимум вероятности ошибки диагностики определяется на основе оптимального количества информационных параметров, описывающих промышленный вибрационный объект, и по минимуму среднего риска

**Ключевые слова:** вибродиагностика, вейвлет-анализ, дисперсия, F-статистики, ошибки диагностики.

### Введение

**Постановка проблемы.** Для диагностики состояния топливной системы дизельных двигателей целесообразно использовать алгоритмы, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании вибросигналов, полученных из трубки топливного насоса высокого давления. Однако графические модели вейвлет-преобразованного сигнала для различных состояний объекта диагностики являются чрезмерными. Предлагается замена трехмерных вейвлет-изображений двумерными изображениями информативных параметров, что упростит алгоритм диагностирования и появится возможность автоматизации процесса контроля. В качестве информативных параметров используются двумерные статистики Фишера и проекционные значения дисперсий.

**Анализ последних достижений и литературы.** Используя измерительные вибросигналы, которые получены от первичных преобразователей, установленных на промышленных объектах, можно идентифицировать состояние этих объектов. Функциональная диагностика при этом основывается на применении соответствующего статистического аппарата к обработке вибросигналов. К таким, в первую очередь, относится спектральный анализ. В [1] для функциональной диагностики объектов рассмотрено использование сравнительно нового кратномасштабного анализа, основанного на вейвлет-преобразовании, который является приложением спектрального анализа.

В [2] приведены примеры оценки состояния объектов промышленности и медицины при применении вейвлет-анализа. Эти примеры свидетельствуют о высокой эффективности используемых методов при контроле и диагностике состояния различных объектов. В статье предложено повышение достоверности результатов вибродиагностики за

счет дополнения результатов вейвлет-анализа методами дисперсионного и ковариационного анализа, что может быть дальнейшим развитием теории функциональной диагностики.

**Цель статьи:** Определение возможностей теории оптимальных статистических решений в задаче поиска глобального минимума среднего риска при диагностике сложных промышленных вибрационных объектов.

### Определение информативных параметров при функциональной вибродиагностике промышленных объектов

На рис. 1 представлены типичные реализации сигналов, полученных от виброакселерометра АП18, установленного на трубку топливного насоса высокого давления дизельного двигателя Д80 при диагностике состояния топливной системы тепловозов ТГМ4 [3].

Сигнал  $x(t)$  на рис. 1, а соответствует рабочему состоянию форсунки дизельного двигателя, а на рис. 1, б неисправному. Для проведения альтернативной функциональной диагностики целесообразно временные реализации вибросигнала представить в частотном виде, когда диагностические признаки становятся более явными. Использование непрерывного вейвлет-преобразования позволяет преобразовать линейное изображение  $x(t)$  в трехмерное  $W_{g_k}(a, b)x = Y$  с координатами масштаба (частота) и сдвига (время) [4]:

$$W_{g_k}(a, b)x = \frac{a}{\sqrt{C_{g_k}|a|}} \sum_{i=1}^N x_i \left[ g_{k-1} \left( \frac{t_{i-1} - b}{a} \right) - g_{k-1} \left( \frac{t_i - b}{a} \right) \right] \quad (1)$$

где  $W_{gk}(a, b)x$  – вейвлет-коэффициенты, вычисленные с помощью гауссовского вейвлета  $k$ -го порядка;  $g_{k-1}(t)$  – гауссовский материнский вейвлет  $(k-1)$ -го порядка;  $C_{gk}$  – нормировочный множитель;  $x_i$  – отсчеты реализации в моменты времени  $t_i, i = \overline{1, N}$ .

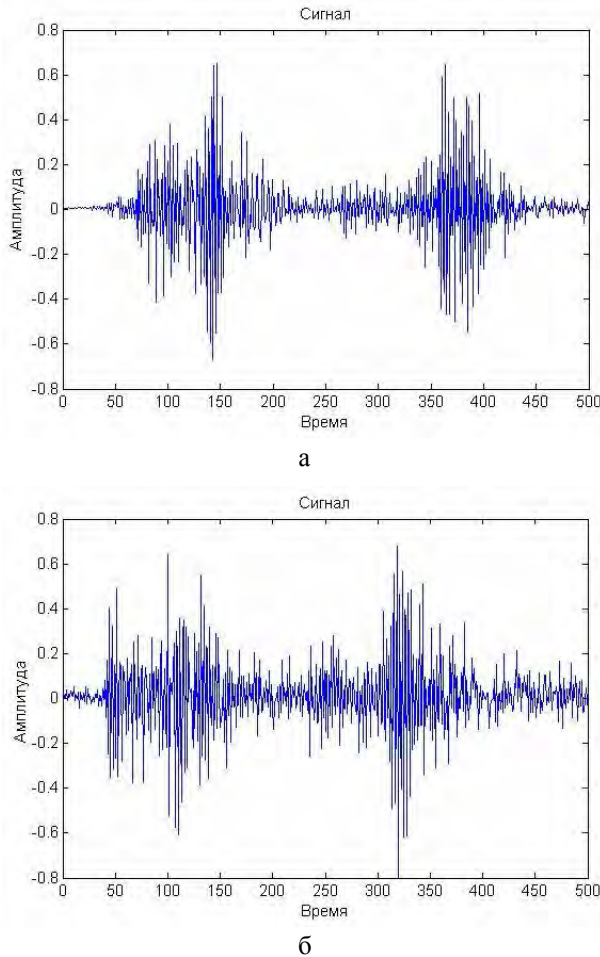


Рис. 1. Вибросигналы, соответствующие рабочему и неисправному состоянию узлов дизельных двигателей

Графическое изображение модели вейвлет-преобразованного сигнала представлено на рис. 2.

Используя сечения по масштабу  $a$  и сдвигу  $b$  вейвлет-изображения можно сформировать двумерные массивы  $\{W_{s1} \}_{j_1}^S, \{W_{s2} \}_{j_1}^S, \dots, \{W_{sl} \}_{j_1}^S$  и  $\{W_{11} \}_{j_1}^L, \{W_{21} \}_{j_1}^L, \dots, \{W_{sl} \}_{j_1}^L$ , в которых  $s = \overline{1, S}$  – срезы по масштабу и  $l = \overline{1, L}$  – срезы по сдвигу.

Подмножества коэффициентов  $\{W_{s1} \}_{j_1}^S, \{W_{s2} \}_{j_1}^S, \dots, \{W_{sl} \}_{j_1}^S$  и  $\{W_{11} \}_{j_1}^L, \{W_{21} \}_{j_1}^L, \dots, \{W_{sl} \}_{j_1}^L$  несут основную информацию о спектральных изменениях на интервале наблюдения  $(t_1, t_N)$ . Используя  $S$  подмножеств таких коэффициентов (для каждого из

фиксированных значений сдвига  $b_l, l = \overline{1, L}$ ), и  $L$  подмножеств таких коэффициентов (для каждого из фиксированных значений масштаба  $a_s, s = \overline{1, S}$ ), можно выделить два подмножества информативных параметров, реагирующих на изменения вейвлет-коэффициентов вдоль оси частот (масштаба) и оси времени (сдвига).

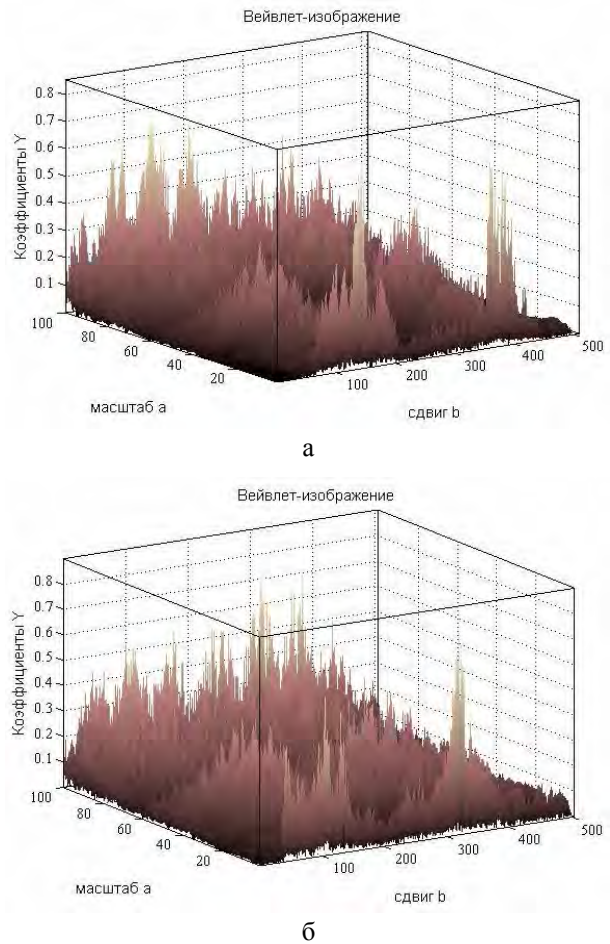


Рис. 2. Трехмерные модели вейвлет-изображений, соответствующие рабочему и неисправному узлам

Таковыми параметрами для сдвигов будут являться дисперсии  $D_{W_1}, D_{W_2}, \dots, D_{W_S}$  коэффициентов  $W_{s1}$ , вычисленных для каждого из масштабов  $a_1, \dots, a_S$  по подмножествам  $\{W_{11} \}_{j_1}^L, \dots, \{W_{s1} \}_{j_1}^L$ . Для масштабов информативными параметрами приняты  $F$ -статистики  $F_1, \dots, F_L$  подмножеств  $\{W_{s1} \}_{j_1}^S, \dots, \{W_{sL} \}_{j_1}^S$  с временем наблюдения  $t$ .

Дисперсии определяются исходя из выражения [5]:

$$D_{W_s} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_{sl}^2 - \left( \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L W_{sl} \right)^2, s = \overline{1, S},$$

$F$ -статистики, исходя из выражения [5]:

$$F_l = \frac{F_l^2}{(1 - F_l^2)}(S - 2), \quad l = \overline{1, L}.$$

Если  $F_j^{(0)}$  ( $D_{Wj}^{(0)}$ ) и  $F_j^{(1)}$  ( $D_{Wj}^{(1)}$ ) информативные F-статистики (дисперсии), характеризующие, соответственно состояния  $S_0$  (рабочий) и  $S_1$  (неисправный) объекта диагностики, то статистическое расстояние между этими состояниями будет определяться выражением [6]:

$$d_F = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^K \frac{(F_j^{*(0)} - F_j^{*(1)})^2}{(F_j^{(1)} + F_j^{(0)})^2} \quad (2)$$

или

$$d_{DW} = \frac{(n-1)^2}{2n} \sum_{j=1}^K \frac{(D_{Wj}^{*(0)} - D_{Wj}^{*(1)})^2}{(D_j^{(1)} + D_j^{(0)})^2}, \quad (3)$$

где  $K$  – количество степеней свободы;  $n$  – количество точек отсчета, что позволяет провести диагностику состояния объекта контроля.

### Реализация алгоритма оптимизации

На основе выражений (2) и (3) реально провести диагностику состояния узлов вибрационного объекта. Однако для минимизации вероятности ошибки диагностирования автором были выполнены оптимизационные процедуры на основе алгоритма:

1. Выполняется последовательное формирование, с нарастанием размерности от меньшего к большему, пространства информативных составляющих векторов  $F_1$  и  $D_{Ws}$  путем арифметического суммирования рассчитанных параметров  $d$ :

$$d_{\Sigma i} = \sum_{i=1}^K d_i.$$

2. Минимальная вероятность ошибки альтернативной диагностики определяется по параметру  $x_{\text{опт}}$  исходя из оптимального состояния вероятностей ошибки первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода при решении трансцендентного уравнения:

$$\frac{x^{\frac{K-1}{2}} \cdot e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{L}{2}} \cdot \Gamma\left(\frac{K}{2}\right)} = [4\pi(K + 2\delta)]^{\frac{1}{2}} \cdot e^{-\frac{(x-K-\delta)^2}{4(K+2\delta)}}, \quad (4)$$

где  $\delta = d_{\Sigma} - K$ .

Графическое представление (4) показано на рис. 3.

3. Оптимальное значение вероятности ошибки первого рода  $\alpha$  определяется исходя из равенства:

$$x_{\text{опт}} = \chi_{K,\alpha}^2 = \chi_{\text{опт}}^2,$$

где  $\chi_{K,\alpha}^2$  –  $(\alpha \cdot 100)\%$ -ная точка  $\chi^2$ -распределения с  $K$  степенями свободы.

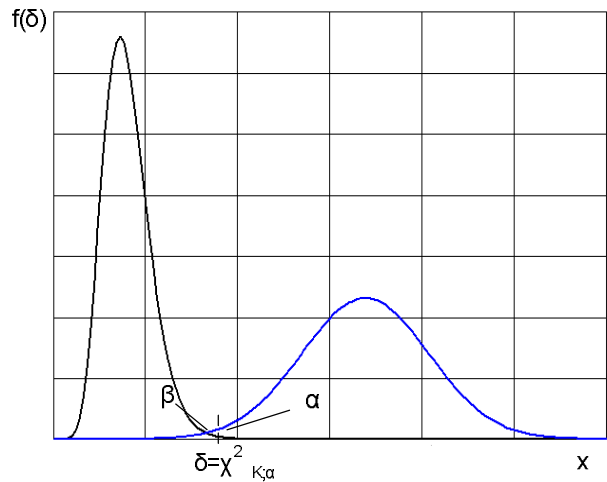


Рис. 3. Графическое представление трансцендентного уравнения

4. Значение вероятности ошибки второго рода  $\beta$ , рассчитывается через интеграл вероятности:

$$\begin{cases} \beta = \Phi(z), & \text{при } z > 0; \\ \beta = 1 - \Phi(z), & \text{при } z < 0, \end{cases}$$

где аргумент интеграла вероятности рассчитывается как

$$z = \frac{\delta - m}{\sigma},$$

где  $m = d_{\Sigma}$ ;

$$\sigma = \sqrt{2(K + 2\delta)};$$

$\Phi(z)$  – интеграл вероятности.

5. Минимум среднего риска определяется из:

$$R = \frac{\alpha + \beta}{2},$$

а достоверность диагностики:

$$P_d = 1 - \frac{\alpha + \beta}{2}.$$

6. Оптимальное значение достоверности диагностики  $P_d$  соответствует минимальному значению среднего риска  $R$ .

В табл. 1 приведены результаты расчетов, которые касаются выполнения алгоритма оптимизации систем вибродиагностики по критерию минимума среднего риска.

Согласно табл. 1 максимальная достоверность диагностики определена в  $P_d = 0.9996$  при размерности  $K = 16$ .

По данным табл. 1 видно, что в качестве информативных параметров используются и составляющие вектора  $F_1$ , и составляющие вектора  $D_{Ws}$ . При этом значимость вектора  $D_{Ws}$  больше значимости вектора  $F_1$  при  $n = 400$  и продолжает увеличиваться, согласно (3), при увеличении времени наблюдения (увеличения числа  $n$ ).

Результаты оптимизации систем вибродиагностики по критерию минимума среднего риска

№	$d_F, d_{DW}$	$d$	$d_{\Sigma} = m$	$K$	$x_{\text{опт}}$	$\alpha$	$\delta$	$\sigma$	$z$	$\Phi(z)$	$\beta$	$P_d$
1	dD 10	19,11	19,11	1			18,108	8,6274	-2,215	0,9764		
2	dD 9	18,78	37,89	2	10,522	0,0052	35,892	12,148	-2,253	0,9782	0,0218	0,9865
3	dD 11	17,64	55,53	3			52,528	14,701	-3,777	0,999		
4	dD 8	14,7	70,22	4	19,928	0,0005	66,224	16,52	-3,045	0,9955	0,0045	0,9975
5	dD 3	10,73	80,95	5			75,951	17,714	-4,57	0,9998		
6	dD 12	10,59	91,54	6	27,089	0,0001	85,543	18,819	-3,425	0,9979	0,0021	0,9989
7	dD 13	9,675	101,2	7			94,218	19,77	-5,12	0,9999		
8	dD 7	6,694	107,9	8	33,186	6E-05	99,912	20,387	-3,665	0,9987	0,0013	0,9993
9	dD 2	5,08	113	9			103,99	20,832	-5,424	1		
10	dF 5	4,677	117,7	10	37,865	4E-05	107,67	21,229	-3,759	0,9989	0,0011	0,9994
11	dF 9	4,246	121,9	11			110,92	21,579	-5,65	1		
12	dD 14	3,985	125,9	12	42,155	3E-05	113,9	21,9	-3,824	0,999	0,001	0,9995
13	dD 4	3,489	129,4	13			116,39	22,171	-5,836	1		
14	dF 7	3,369	132,8	14	46,095	3E-05	118,76	22,428	-3,864	0,9991	0,0009	0,9995
15	dD 18	2,725	135,5	15			120,48	22,626	-5,988	1		
16	dF 14	2,565	138	16	49,644	3E-05	122,05	22,808	-3,876	0,9991	0,0009	0,9996
17	dD 6	2,376	140,4	17			123,42	22,972	-6,113	1		
18	dF 15	2	142,4	18	52,942	3E-05	124,42	23,102	-3,873	0,9991	0,0009	0,9996
19	dD 19	1,52	143,9	19			124,94	23,19	-6,207	1		
20	dF 13	1,477	145,4	20	55,885	3E-05	125,42	23,274	-3,847	0,9991	0,0009	0,9995
21	dF 2	1,441	146,9	21			125,86	23,355	-6,288	1		
22	dF 10	1,428	148,3	22	58,754	3E-05	126,29	23,434	-3,821	0,999	0,001	0,9995
23	dF 11	0,955	149,2	23			126,25	23,473	-6,358	1		
24	dD 24	0,801	150	24	61,323	4E-05	126,05	23,499	-3,776	0,9989	0,0011	0,9995
25	dD 20	0,591	150,6	25			125,64	23,506	-6,408	1		
26	dD 21	0,448	151,1	26	63,68	5E-05	125,09	23,502	-3,719	0,9988	0,0012	0,9994
27	dF 8	0,433	151,5	27			124,52	23,496	-6,449	1		
28	dF 1	0,403	151,9	28	65,947	7E-05	123,92	23,488	-3,66	0,9987	0,0013	0,9993
29	dD 17	0,273	152,2	29			123,19	23,469	-6,485	1		
30	dD 15	0,219	152,4	30	68,089	9E-05	122,41	23,445	-3,597	0,9985	0,0015	0,9992
31	dF 4	0,063	152,5	31			121,48	23,407	-6,514	1		
32	dF 3	0,054	152,5	32	70,101	0,0001	120,53	23,369	-3,527	0,9983	0,0017	0,9991
33	dF 12	1,287	153,8	33			120,82	23,436	-6,563	1		
34	dD 5	0,079	153,9	34	72,391	0,0001	119,9	23,4	-3,483	0,9981	0,0019	0,999

По результатам табл. 1 были получены графические представления поведения вероятностей ошибок первого  $\alpha$  и второго рода  $\beta$ , а также среднего риска  $R$  от размерности пространства информативных признаков  $K$  (рис. 4) и графическое представление достоверности диагностики  $P_d$  от размерности  $K$  (рис. 5).

### Выводы

В данной статье показано, что использование критерия минимума среднего риска позволяет не

только максимизировать достоверность вибродиагностики, но и выбрать статистически значимые значения параметров  $a$  и  $b$  в модели вейвлет-преобразования (1).

Также показана эффективность использования  $F$ -статистик вейвлет-коэффициентов когда используется шкала частот (масштаба) и дисперсии когда используют шкалу времени (сдвига) для идентификации смены диагностируемых состояний по вейвлет-изображению.

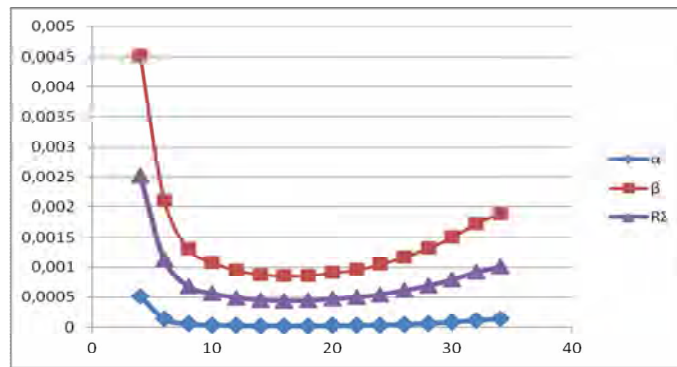


Рис. 4. Зависимость среднего риска от размерности пространства информативных параметров

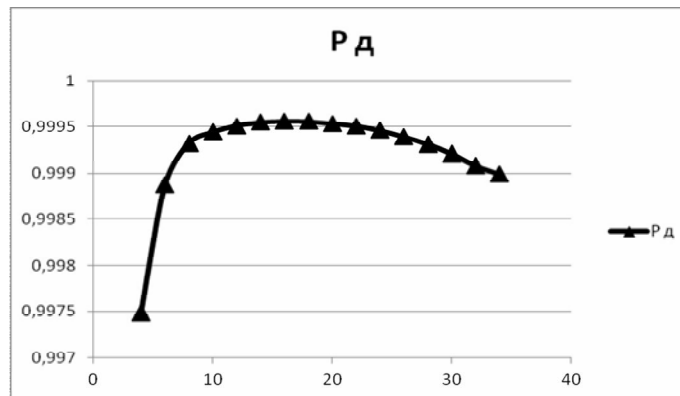


Рис. 5. Зависимость достоверности диагностики от размерности пространства информативных параметров

### Список литературы

1. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // УФН. – 2001. – Т.171. – №5. – С. 465-501.
2. Квстний Р.Н. Метод виділення контурів на основі вейвлет-перетворення з використанням двовимірних фільтрів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – № 3. – С.26-34.
3. Валуїська О.Ю. Обработка вибросигналов с целью определения параметров для экспресс-диагностики топливной аппаратуры дизельных агрегатов // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Автоматика и приборостроение. –Х., 2002. – Вып. 9. Т. 7. – С. 31-34.
4. Шитов А.Б. Разработка численных методов и программ, связанных с применением вейвлет-анализа для

моделирования и обработки экспериментальных данных: Дисс. канд. техн. наук: 05.13.18.– Иваново, 2001.– 124 с.

5. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

6. Zakhzhay V.B. Statistics of quality / V.B. Zakhzhay, A.Y. Chorny. – К.: 2005. – 576 p.

Поступила в редколлегию 5.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.И. Кондрашов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ СЕРЕДЬОГО РИЗИКУ

Р.П. Мигушенко

В статті розглянута задача визначення оптимальної кількості інформативних параметрів, отриманих на основі дисперсійного та коваріаційного аналізів результатів вейвлет-перетворення спектрально-нестационарних вибросигналів при діагностиці стану промислових вібраційних об'єктів. В статті показано, що інформативними параметрами при аналізі вібрації для проведення контролю та діагностики можуть бути дисперсії, які залежать від зсуву, і критеріальні F-статистики, які залежать від масштабу, результатів вейвлет-перетворення інформаційних вибросигналів.

**Ключові слова:** вібродіагностика, вейвлет-аналіз, дисперсія, F-статистики, помилки діагностики.

### EXPERIMENTAL STUDIES IN OPTIMIZATION CRITERION SYSTEMS VIBRATION MONITORING MINIMUM AVERAGE RISK

R.P. Mygushchenko

The article considers the problem of determining the optimal number of informative parameters derived from analyzes of variance and covariance results wavelet transform spectral transient vibration signals in the diagnosis of the state of industrial vibrating objects. The paper shows that the analysis of informative parameters for vibration control and diagnostics can be dispersion that depend on shear criterial and F- statistics, which depend on the scale, the results of wavelet vibrosignals information.

**Keywords:** vibration monitoring, wavelet analysis, variance, F-statistics, error diagnostics.