

УДК 681.518.5

*I. M. КОРЖОВ***АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИИ КОГЕРЕНТНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ  
ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ**

В статті проведено аналіз ймовірнісних властивостей частотно-часової моделі когерентності, аналіз впливу локальних властивостей базисної функції вейлет-перетворення на параметри моделі автокогерентності, дисперсійний аналіз частотної та часової моделей когерентності, розширено простір параметрів настанціонарності (для вирішення задачі першого етапу синтезу інформаційно-вимірювальної системи контролю та діагностування динамічних об'єктів – створення багатовимірної системи інформативних параметрів контролю динамічних властивостей об'єкту в умовах апіорної невизначеності математичних моделей нестационарності). В статті визначені умови вибору числа масштабів та зсувів при оцінці коефіцієнтів автокогерентності для задачі контролю порушень стаціонарності вимірювального сигналу, отримані умови калібрування показника автокогерентності, що відповідають відсутності порушення стаціонарності, розроблено ймовірнісна модель показника автокогерентності, що враховує мінімальне значення масштабу спектрального вейлет-перетворення, показана можливість дисперсійного розкладання базового показника автокогерентності на парні незалежні складові які дозволяють отримати незалежну інформацію про порушення стаціонарності з урахуванням функціональних та випадкових змін спектру. За результатами дослідження отримала розвиток теорія автокогерентності спектрально нестационарних вимірювальних сигналів. Визначені умови вибору числа масштабів та зсувів при оцінці коефіцієнтів автокогерентності для задачі контролю порушень стаціонарності вимірювального сигналу. Дослідження виконані для вирішення науково-практичної проблеми недосконалості та обмеженості теоретичного обґрунтування при створенні комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних пристроїв контролю та діагностування динамічних об'єктів, локально і глобально нестационарних за своїми спектральними властивостями.

**Ключові слова:** нестационарність, когерентність, вейлет-аналіз, контроль, діагностування, моделювання.

*I. M. КОРЖОВ***АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИЙ КОГЕРЕНТНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ  
СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ**

В статье проведен анализ вероятностных свойств частотно-временной модели когерентности, анализ влияния локальных свойств базовой функции вейлет-преобразования на параметры модели автокогерентности, дисперсионный анализ частотной и временной моделей когерентности, расширено пространство параметров настанционарности (для решения задачи первого этапа синтеза информационно-измерительной системы контроля и диагностирования динамических объектов – создание многомерной системы информативных параметров контроля динамических свойств объекта в условиях априорной неопределенности математических моделей нестационарности). В статье определены условия выбора числа масштабов и оползней при оценке коэффициентов автокогерентности для задачи контроля нарушений стаціонарности измерительного сигнала, полученные условия калибровки показателя автокогерентности, соответствующие отсутствию нарушения стаціонарности, разработана вероятностная модель показателя автокогерентности, учитывающая минимальное значение масштаба спектрального вейлет-преобразования, показана возможность дисперсионной разложения базового показателя автокогерентности на парные независимые составляющие, которые позволяют получить независимую информацию о нарушениях стаціонарности с учетом функциональных и случайных изменений спектра. По результатам исследования получила развитие теория автокогерентности спектрально нестационарных измерительных сигналов. Определены условия выбора числа масштабов и сдвигов при оценке коэффициентов автокогерентности для задачи контроля нарушений стаціонарности измерительного сигнала. Исследования выполнены для решения научно-практической проблемы несовершенства и ограниченности теоретического обоснования при создании компьютеризированных информационно-измерительных устройств контроля и диагностирования динамических объектов, локально и глобально нестационарных по своим спектральным свойствам.

**Ключевые слова:** нестационарность, когерентность, вейлет-анализ, контроль, диагностирование, моделирование

*I. M. KORZHOV***ANALYSIS OF MODELS OF COHERENCE OF SPECTRAL NON-STATIONALITY OF RANDOM  
SIGNALS**

The article analyzes the probabilistic properties of the frequency-time model of coherence, analyzes the influence of local properties of the basis function of the wavelet transform on the parameters of the autocoherece model, the dispersion analysis of the frequency and time models of coherence, expanded the space of parameters of the stationary (for solving the problem of the first stage of the synthesis of information-measuring control system and the diagnostics of dynamic objects - the creation of a multidimensional system of informative control parameters of dynamic inherent Tay subject under a priori uncertainty of mathematical models of non-stationary). The conditions of the choice of the number of scales and landslides in the estimation of the coefficients of auto-coherence for the task of monitoring the disturbances of the measuring signal stationary are obtained, the conditions of calibration of the auto-coherence index corresponding to the absence of stationary violation are determined, the probabilistic model of the auto-coherence index taking into account the minimum value of the scale of the spectral wavelet transform is shown the possibility of dispersion expansion of the basic index of auto-coherence on the paired independent components of which allow to obtain independent information on stationary violation, taking into account functional and random changes of the spectrum. According to the results of the study, the theory of autocorrelation of spectral non-stationary measurement signals was developed. The conditions of the choice of the number of scales and landslides are determined in the estimation of the coefficients of auto-coherence for the task of monitoring the disturbances of the stationary signal of the measuring signal. The research is carried out to solve the scientific and practical problem of imperfection and limitations of theoretical substantiation in the creation of computerized information measuring devices for monitoring and diagnosing dynamic objects locally and globally unsteady in their spectral properties.

**Keywords:** nonstationarity, coherence, wavelet analysis, control, diagnosis, modeling

© И. М. Коржов, 2018

**Вступ.** Проблема підвищення ефективності інформаційно-вимірювальних технологій контролю зміни властивостей промислового устаткування і агрегатів за стохастичними (випадковими) вимірювальними сигналами виникла на початку 60-х років 20-го століття [1, 2]. На сьогоднішній день це напрям математичної статистики і теорії випадкових процесів, який інтенсивно розвивається і об'єднує задачі аналізу нестационарних дискретизованих сигналів при контролі динамічних систем [2].

Вирішення проблеми залежить від вибору адекватних імовірнісних моделей інформаційного перетворення для двох етапів синтезу інформаційно-вимірювальної системи контролю і діагностування [3]:

1) побудова багатовимірної системи інформативних параметрів контролю динамічних властивостей об'єкту в умовах апріорної невизначеності моделей нестационарності;

2) розробка оптимальних процедур перетворення параметрично представленої первинної вимірювальної інформації у вторинні логічні рішення.

Також важливо частиною практичного вирішення зазначених проблем є реалізація отриманих алгоритмів з використанням відповідних середовищ, наприклад LabView [4].

У [2] для першого етапу синтезу інформаційно-вимірювальної системи контролю та діагностування запропонована модель когерентності (параметр  $\rho_W$ ):

$$\rho_W = \frac{1 + \frac{D_2}{D_1} \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \rho \left[ 1 + \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}}{\left[ \left( 1 + 2\rho \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} + \left( 1 + 2\rho \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} + \frac{D_2}{D_1} \right)^2 \right)^{-1/2} \right]} \quad (1)$$

де  $D_1$  та  $D_2$  – дисперсії вейвлетів  $W_{\xi}^2(a, b|\omega_1)$  та  $W_{\eta}^2(a, b|\omega_2)$  відповідно;

$\omega_1$  та  $\omega_2$  – межі частотного інтервалу, причому  $\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega$ ;

$a$  – масштаб при вейвлет-перетворенні;

$b$  – зсув при вейвлет-перетворенні;

$\rho$  – нормований коефіцієнт лінійної кореляції між не осередненими (на інтервалі  $\Delta\omega$ ) квадратично перетвореними вейвлетами  $W_{\xi}^2(a, b|\omega_1)$  та  $W_{\eta}^2(a, b|\omega_2)$ .

При синтезі параметру  $\rho_W$  використовувалась сигнали  $\xi(t)$  та  $\eta(t)$ , що визначаються початковим сигналом  $X(t)$  та лінійними перетвореннями:

$$\begin{cases} \xi(t) = X(t); \\ \eta(t) = \frac{\partial}{\partial t} \{X(t)\}. \end{cases} \quad (2)$$

**Мета статті** полягає в аналізі ймовірнісних властивостей і впливу локальних властивостей базисної функції вейлет-перетворення та дисперсійному аналізі запропонованої у [2] моделі когерентності (для першого етапу синтезу інформаційно-вимірювальної системи контролю та діагностування динамічних об'єктів).

**Аналіз ймовірнісних властивостей частотно-часової моделі когерентності.** Параметр  $\rho_W$  (1) є функцією трьох змінних:

- відношення дисперсій  $\lambda_D$ ,

- відношення частот  $\lambda_{\omega}$ ,

- кореляції  $\rho$  між спектральними складовими

квадратично перетворених вейвлет-спектрів процесів  $\xi(t)$  та  $\eta(t)$ :

$$\rho_W = \frac{1 + \lambda_D \lambda_{\omega}^2 + \rho (1 + \lambda_{\omega}^2) \sqrt{\lambda_D}}{\left[ (1 + 2\rho \sqrt{\lambda_D} + \lambda_D) (1 + 2\rho \lambda_{\omega}^2 \sqrt{\lambda_D} + \lambda_D \lambda_{\omega}^4) \right]^{-1/2}} \quad (3)$$

З останнього виразу видно, що при  $\rho = 0$  (відсутність нестационарності)

$$\rho_W^{(0)} \xrightarrow{\lambda_{\omega} \rightarrow 1} 1. \quad (4)$$

Умова  $\lambda_{\omega} \rightarrow 1$  відповідає випадку

$$\Delta\omega \rightarrow 0, \quad (5)$$

що можливо лише при необмеженому збільшенні числа масштабів в межах незмінно постійного діапазону частот.

Якщо умова (5) не виконується, то стану  $\Theta_0$  – «процес  $X(t)$  є стаціонарним», відповідає величина  $\rho_W$ :

$$0 < \rho_W^{(0)} < 1. \quad (6)$$

Конкретне, калібрувальне (для стану  $\Theta_0$ ), значення  $\rho_W^{(0)}$  може бути знайдено для відомих величин  $\lambda_D$  та  $\lambda_{\omega}$ .

Якщо дисперсії  $D_1$  і  $D_2$  остаточних змін спектрів процесів  $\xi(t)$  і  $\eta(t)$  однакові, тобто якщо  $\lambda_D = 1$ , то при  $\rho = 0$  буде:

$$\rho_W^{(0)} = \frac{1 + \lambda_{\omega}^2}{\sqrt{2(1 + \lambda_{\omega}^4)}}. \quad (7)$$

З останнього виразу видно, що калібрувальне значення  $\rho_W^{(0)}$  може бути представлене у вигляді:

$$\rho_W^{(0)} = \sqrt{\frac{\frac{1}{\lambda_{\omega}^4} + \frac{2}{\lambda_{\omega}^2} + 1}{\frac{2}{\lambda_{\omega}^4} + 2}}, \quad (8)$$

а вплив відношення частот  $\lambda_{\omega}$  визначає мінімальне можливе значення для  $\rho_W^{(0)}$  як  $2^{-1/2}$ , коли  $\lambda_{\omega} \rightarrow \infty$ :

$$\rho_W^{(0)} \xrightarrow{\lambda_{\omega} \rightarrow \infty} 2^{-1/2}. \quad (9)$$

Якщо  $\lambda_{\omega} \rightarrow 1$ , то  $\rho_W^{(0)} \rightarrow 1$ . Таким чином:

$$\rho_W^{(0)} \in (2^{-1/2}, 1). \quad (10)$$

Ліва границя інтервалу (10) відповідає області низьких частот (великих масштабів), а права – область високих частот (малих масштабів). Це вказує на необхідність калібрування параметра  $\rho_W$ , для задач контролю, стосовно до частотних особливостей спектру початкового процесу  $X(t)$ .

Математична модель (3) функціонального зв'язку між нормованими кореляціями  $\rho$  та  $\rho_W$ , що характеризує, відповідно, міжгармонійну та міжспектральну кореляції, дозволяє досліджувати ефекти нелінійності впливу параметрів  $\lambda_D$  та  $\lambda_\omega$  на цей зв'язок. На рис. 1 представлені тривимірні залежності між  $\rho$  і  $\rho_W$  для двох варіантів впливу частотно-часових параметрів  $\lambda_D$  і  $\lambda_\omega$ :

- $\lambda_\omega = \text{var}$ ;  $\lambda_D = 2 = \text{const}$ ,
- $\lambda_D = \text{var}$ ;  $\lambda_\omega = 2 = \text{const}$ .

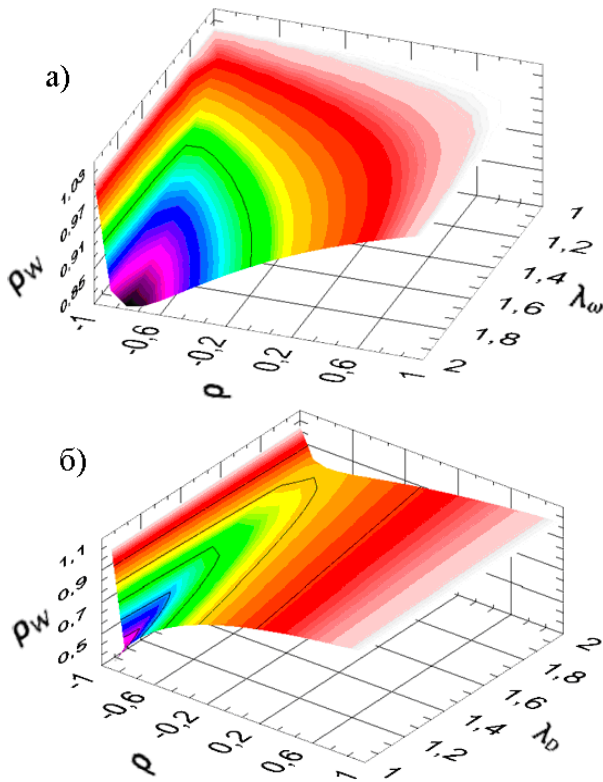


Рис. 1. Графічні моделі впливу  $\rho$  та  $\rho_W$  для варіантів: а)  $\lambda_\omega \in [1; 2]$ ,  $\lambda_D = 2$ ; б)  $\lambda_D \in [1; 2]$ ,  $\lambda_\omega = 2$

Аналіз графічних моделей рис. 1 а), б) вказує на суттєвий вплив випадкової (шумової) складової коефіцієнтів спектрального вейвлет-перетворення на величину вимірюваного параметру контролю нестационарності  $\rho_W$ .

Це вказує, також, на необхідність частотно-часового розділення вейвлет-спектру на дві, інформаційно значущі складові:

- функціональну (характеризує математичне сподівання вейвлет-коефіцієнтів),
- випадкову (характеризує дисперсію вейвлет-коефіцієнтів).

Слід відзначити, що для будь-яких фіксованих значень  $\lambda_D$  та  $\lambda_\omega$  зв'язок між  $\rho$  та  $\rho_W$  завжди нелінійний (рис. 2).

Залежність  $\rho = F(\rho_W)$  може інтерпретуватися як градувальна, яка дозволяє визначити значення  $\rho_W$ , що відповідає варіанту  $\rho = 0$  (відсутність ефектів спектральної нестационарності).

**Аналіз впливу локальних властивостей базисної функції вейвлет-перетворення на параметри моделі автокогерентності.** Локальні властивостей базису [5–9]

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (11)$$

моделі вейвлет-перетворення в частотній і часовій областях строго визначають величину параметру  $\lambda_\omega$  моделі автокогерентності (3). Це пов'язано з тим, що частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  повної моделі автокогерентності (1) відповідають границям (нижній і, відповідно, верхній) частотного інтервалу  $\Delta\omega$ :

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{\omega_0}{a_m} - \frac{\Delta\omega}{a_m}, \\ \omega_2 = \frac{\omega_0}{a_m} + \frac{\Delta\omega}{a_m}. \end{cases} \quad (12)$$

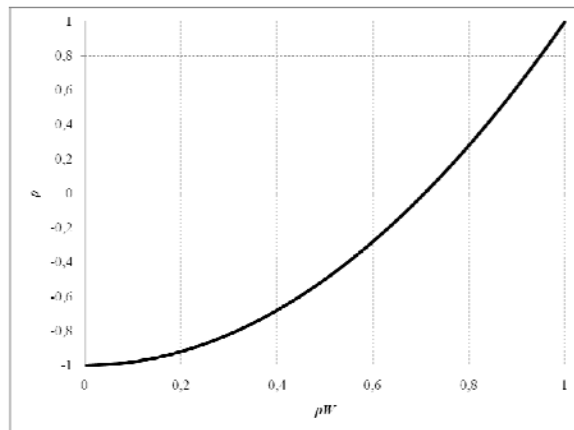


Рис. 2. Типова залежність між  $\rho$  та  $\rho_W$  (для випадку  $\lambda_D \rightarrow 1$ ,  $\lambda_\omega \rightarrow 1$ )

Якщо відношення центральної частоти  $\omega_0/a_m$ , для  $m$ -ного масштабу до ширини частотного вікна  $\Delta\omega$  незмінне (а ця умова виконується при будь-яких значеннях масштабу  $a$ ), то модель вейвлет-перетворення еквівалентна фільтру з постійною добротністю. Тоді площа частотно-часового вікна вейвлет-аналізу буде постійна і рівною значенню  $4 \cdot \Delta t \Delta \omega$  [8, 9].

При дискретизації масштабу  $a$  частотна вісь розбивається на піддіапазони (частотні полоси), для яких, отримаємо:

$$\lambda_\omega = \frac{a_0^{-m+2} \cdot \Delta\omega}{a_0^{-m+1} \cdot \Delta\omega} = a_0. \quad (13)$$

Фактично,  $\lambda_\omega = a_0 = \text{const}$  та задається величиною мінімального значення масштабу  $a_0$  [10, 11]. При постійності дисперсії шумової складової вейвлет-коефіцієнтів  $W(a_i, b_j)$ , де  $i$  – номер масштабу  $a$ ,  $j$  – номер зсуву  $b$ , будемо мати початкову умову  $\lambda_D = 1$ .

Якщо, тепер, забезпечити умову  $\lambda_\omega = a_0$ , то ймовірнісна модель (3) приймає вигляд

$$\rho_W = (1 + a_0^2) \sqrt{\frac{1 + \rho}{2(1 + 2\rho \cdot a_0^2 + a_0^4)}}. \quad (14)$$

Умова стаціонарності ( $\rho = 0$ ) початкового процесу  $X(t)$  дозволяє, тепер, визначити значення  $\rho_W$ , як функцію тільки початкового мінімального масштабу  $a_0$ :

$$\rho_W|_{\rho=0} = \frac{1 + a_0^2}{\sqrt{2(1 + a_0^4)}}. \quad (15)$$

В таблиці 1 представлені розраховані по рівнянню (15) контрольні значення вимірюваного параметру  $\rho_W$ , що відповідають строгій стаціонарності контрольованого сигналу  $X(t)$ .

Таблиця 1 – Контрольні значення  $\rho_W|_{\rho=0}$  для масштабів  $a_0$

$a_0$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	5,0	10,0
$\rho_W _{\rho=0}$	0,9841	0,9512	0,9159	0,8842	0,8575	0,7348	0,7141

**Дисперсійний аналіз частотної та часової моделей когерентності. Розширений простір параметрів настаціонарності.** Моделі когерентності (система (12) з [2]) побудовані в припущенні, що вейвлет-спектри основного  $X(t)$  і лінійно трансформованого (операцією диференціювання) процесу  $Z(t)$  утворюють двовимірну систему випадкових величин  $(X, Z)$ . Введемо позначення для двовимірної реалізації таких вейвлет-спектрів:

$$\begin{cases} \delta_{ij} = W_\xi^2(a_i, b_j); \\ \varphi_{ij} = W_\eta^2(a_i, b_j), \end{cases} \quad (16)$$

де  $i = \overline{1, M}$ ,

$j = \overline{1, L}$ .

Позначимо середні значення з урахуванням використання процесів  $\xi(t)$  або  $\eta(t)$ :

$$\begin{cases} \bar{\delta}_j = \overline{W_\xi^2(b_j)}; \\ \bar{\delta}_i = \overline{W_\xi^2(a_i)}; \\ \bar{\varphi}_j = \overline{W_\eta^2(b_j)}; \\ \bar{\varphi}_i = \overline{W_\eta^2(a_i)}. \end{cases} \quad (17)$$

Позначимо, також загальні середні  $\bar{\delta}$  і  $\bar{\varphi}$  спектрів, відповідно,  $\delta_{ij}$  та  $\varphi_{ij}$ .

Якщо  $Q$  – це загальна сума добутку відхилення спектрів  $\delta_{ij}$  та  $\varphi_{ij}$  від загальних середніх  $\bar{\delta}$  і  $\bar{\varphi}$

$$Q = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L (\delta_{ij} - \bar{\delta})(\varphi_{ij} - \bar{\varphi}), \quad (18)$$

то цю суму можна розкласти на дві  $Q_1$  та  $Q_2$ , з урахування, відповідно, кореляції за математичним сподіванням і кореляції за шумовою складовою спектрів:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (19)$$

Складові  $Q_1$  та  $Q_2$  є членами дисперсійного розкладання загальної суми  $Q$  [12], що використовується при синтезі загальної моделі (1):

$$\rho_W = \frac{1}{[\bullet]} Q, \quad (20)$$

де  $[\bullet]$  – знаменник виразу (1).

Чисельник цього виразу – коваріація між спектрами  $\delta_{ij}$  та  $\varphi_{ij}$  (змішані ненормовані центральні моменти 2-го порядку).

Дисперсійне розкладання (19) може бути представленим в одному з двох варіантів:

а) частотно-часовому  $Q = Q_1^{(a)} + Q_2^{(b)}$ , (21)

б) часо-частотному  $Q = Q_1^{(b)} + Q_2^{(a)}$ . (22)

Складові частотного розкладу мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} Q_1^{(a)} = L \sum_{i=1}^M (\bar{\delta}_i - \bar{\delta})(\varphi_i - \bar{\varphi}); \\ Q_2^{(b)} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)(\varphi_{ij} - \bar{\varphi}_i); \\ Q_1^{(b)} = M \sum_{j=1}^L (\bar{\delta}_j - \bar{\delta})(\varphi_j - \bar{\varphi}); \\ Q_2^{(a)} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^L (\delta_{ij} - \bar{\delta}_j)(\varphi_{ij} - \bar{\varphi}_j). \end{cases} \quad (23)$$

Використовуючи вираз (23), можливо отримати чотири ненормованих кореляційних параметрів нестаціонарності, які дозволяють контролювати спектральну нестаціонарність початкового процесу  $X(t)$  за двома варіантами (21) та (22) частотного та часового представлення:

а) частотно-часовий контроль нестационарності

$$\begin{cases} \overline{Q}_1^{(a)} = Q_1^{(a)} \cdot (M-1)^{-1}; \\ \overline{Q}_2^{(b)} = Q_2^{(b)} \cdot (N-M)^{-1}, \end{cases} \quad (24)$$

б) часо-частотний контроль нестационарності

$$\begin{cases} \overline{Q}_1^{(b)} = Q_1^{(b)} \cdot (L-1)^{-1}; \\ \overline{Q}_2^{(a)} = Q_2^{(a)} \cdot (N-L)^{-1}. \end{cases} \quad (25)$$

**Висновки.** 1. Отримала розвиток теорія автокогерентності спектрально нестационарних вимірювальних сигналів. Визначені умови вибору числа масштабів та зсувів при оцінці коефіцієнтів автокогерентності  $\rho_W$  для задачі контролю порушень стаціонарності вимірювального сигналу.

2. Отримані умови калібрування показника автокогерентності  $\rho_W$  (вирази (7)–(10)), що відповідають відсутності порушення стаціонарності.

3. Розроблена імовірнісна модель (14) показника автокогерентності  $\rho_W$ , що враховує мінімальне значення  $a_0$  (масштабу) спектрального вейвлет-перетворення.

4. Показана можливість дисперсійного розкладання базового показника автокогерентності  $\rho_W$  на парні незалежні складові (24), (25), які дозволяють отримати незалежну інформацію про порушення стаціонарності з урахуванням функціональних та випадкових змін спектру.

#### Список літератури

1. Басвиль М., Вилски А. [и др.] *Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем* / ред. Басвиль М., Вилски А. Москва: Мир, 1989. 278 с.
2. Щапов П. Ф., Мигущенко Р. П., Крощак О. Ю., Корзов І. М. Дослідження кореляційних моделей спектральної нестационарності випадкових сигналів. *Метрологія та прилади. Науково-виробничий журнал*. Харків, 2018. № 5 (73). С. 11–14.
3. Щапов П. Ф., Аврунин О. Г. *Повышение достоверности контроля и диагностики объектов в условиях неопределённости. монография*. Харьков: ХНАДУ, 2011. 191 с.
4. Korzhov I. M., Kropachok O. Yu. Реалізація обчислювальних процедур системного інформаційного перетворення нестационарних вібро сигналів засобами labview. *Системи управління, навігації та зв'язку. Зб. наук. пр.* Полтава: ПНТУ, 2017. Т. 6 (46). С. 76–80.
5. Letelier J., Weber P. Spike sorting based on discrete wavelet transform coefficients. *Neurosci. Methods*. 2000. vol. 101. pp. 93–106.
6. Addison P. S. *The illustrated wavelet transform handbook: applications in science, engineering, medicine and finance*. Bristol; Philadelphia: IOP Publishing, 2002. 368 p.
7. Kim K., Kim S A wavelet-based method for action potential detection from extracellular neural signal recording with low signal-to-noise ratio. *IEEE Trans on Biomed. Eng.* 2003. vol. 50, no 8. pp. 999–1011.
8. Добеши І. *Десять лекцій по вейвлетам*. Іжевск: НИЦ регулярная и хаотическая динамика, 2001. 464 с.
9. Дьяконов В. П. *Вейвлеты. От теории к практике*. Москва: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

10. Валуцкая О. Ю. Обработка вибросигналов с целью определения параметров для экспресс-диагностики топливной аппаратуры дизельных агрегатов. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Сер.: Автоматика и приборостроение*. Харьков: НТУ«ХПИ». 2002. Т. 7. Вып. 9. С. 31–34.
11. Балицкий Ф. А., Барков А. В., Баркова Н. А., Васильева Р. В. [и др.] *Неразрушающий контроль: вибродиагностика. Справочник в 7 томах* / под ред. Клюева В. В. Москва: Машиностроение. Т. 7. 2005. 829 с.
12. Джонсон Н., Люн Ф. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента* / под ред. Лецького Е.К. Москва: Мир, 1981. 520 с.

#### References (transliterated)

1. Basvil' M, Vilski A, [et al.] *Obnaruzhenie izmenenija svojstv signalov i dinamicheskikh system* [Detection of changes in signal properties and dynamic systems]. Moscow, Mir Publ., 1989. 278 p.
2. Shchapov P. F., Mygushhenko R. P., Kropachek O. Ju., Korzhov I. M. Doslidzhennja koreljacijnyh modelej spektral'noi' nestacionarnosti vypadkovykh sygnaliv [Doslidzhennja koreljacijnyh modelej spektral'noi' nestacionarnosti vypadkovykh sygnaliv]. *Metrologija ta prylyady. Naukovo-vyrobnychyj zhurnal*. Kharkiv, 2018, no 5 (73), pp. 11–14.
3. Shchapov P. F., Avrunin O. G. *Povyshenie dostovernosti kontrolja i diagnostiki obektov v uslovijah neopredel'jonosti: monografija* [Improving the reliability of monitoring and diagnostics of objects in conditions of uncertainty: monograph]. Kharkov, HNADU Publ., 2011. 191 p.
4. Korzhov I. M., Kropachok O. Yu. Realizacija obchisljuval'nih procedur sistemnogo informacijnogo peretvorenija nestacionarnih vibrosignaliv zasobami labview [Implementation of computational procedures for system information transformation of nonstationary vibration signals by means of labview]. *Sistemi upravlinnja, navigacij i ta zv'jazku. sb. nauk. pr.* Poltava, PNTU Publ., 2017. Т. 6 (46). pp. 76–80.
5. Letelier J., Weber P. Spike sorting based on discrete wavelet transform coefficients. *Neurosci. Methods*. 2000, vol. 101, pp. 93–106.
6. Addison P. S. *The illustrated wavelet transform handbook: applications in science, engineering, medicine and finance*. Bristol; Philadelphia, IOP Publ., 2002. 368 p.
7. Kim K., Kim S A wavelet-based method for action potential detection from extracellular neural signal recording with low signal-to-noise ratio. *IEEE Trans on Biomed. Eng.* 2003. vol. 50, no 8, pp 999–1011.
8. Dobeshi I. *Desjat' lekcij po vejvletam* [Ten Wavelet Lectures]. Izhevsk, NIC reguljarnaja i haoticheskaja dinamika Publ., 2001. 464 p.
9. D'jakonov V. P. *Vejvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, SOLON-R Publ., 2002. 448 p.
10. Valujskaja O. Ju. Obrabotka vibrosignalov s cel'ju opredelenija parametrov dlja jekspress-diagnosticski toplivnoj apparatury dizel'nyh agregatov [Processing of vibration signals in order to determine parameters for express diagnostics of the fuel equipment of diesel units]. *Visnyk Nats. tekhn. un-ta «KhPI»: sb. nauk. pr. Ser.: Avtomatika i priborostroenie* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Series: Automation and Instrumentation]. Kharkov, 2002, Т. 7, Vyp. 9, pp. 31–34.
11. Balickij F. A., Barkov A. V., Barkova N. A., Vasil'eva R. V., [et al.] *Nerazrushajushhij kontrol': vibrodagnostika. Spravochnik v 7 tomah* [Non-destructive testing: vibrodiagnostics. Handbook in 7 volumes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. Т. 7. 829 p.
12. Dzhonson N., Lion F. *Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke: Metody planirovanija jeksperimenta* [Statistics and Experiment Planning in Engineering and Science: Experiment Planning Methods]. Moscow, Mir Publ., 1981. 520 p.

Надійшла (received) 26.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Коржов Ігор Михайлович (Коржов Игорь Михайлович, Korzhov Ihor Mykhailovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Інформаційно-вимірювальних технологій і систем»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2315-2683>; e-mail: korgiov\_igor@mail.ru.