

ВЕЙВЛЕТ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**В. В. Грабко, С. М. Левицький, А. А. Бартецький**

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: levitskiy@vntu.edu.ua, bartetskiy@meta.ua

Запропоновано математичну модель системи діагностування гальмівних кіл перетворювачів частоти для регульованих асинхронних електроприводів технологічних установок із великим часом гальмування. В основу системи діагностування гальмівного кола перетворювача частоти покладено використання вейвлет-аналізу вхідних сигналів стану гальмівного кола. За результатами аналізу отримуються вейвлет-коефіцієнти поточного стану вхідних параметрів, які в подальшому використовуються для кореляційного аналізу з коефіцієнтами типових станів. Діагностичний висновок стосовно поточного стану формується за висновком за максимальним коефіцієнтом кореляції до типового стану. Такий підхід дозволяє визначити ступінь наближення поточного стану гальмівних кіл перетворювачів частоти до аварійного навіть за умови, що повна ідентифікація поточного стану до типового не проведена, а також своєчасно попередити як вихід з ладу окремого електропривода, так і аварійну зупинку технологічного процесу в цілому.

Ключові слова: вейвлет-діагностування, перетворювач частоти, гальмування.**ВЕЙВЛЕТ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ****В. В. Грабко, С. М. Левицкий, А. А. Бартецкий**

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail levitskiy@vntu.edu.ua, bartetskiy@meta.ua

Предложена математическая модель системы диагностирования тормозных цепей преобразователей частоты для регулируемых асинхронных электроприводов технологических установок с большим временем торможения. В основу системы диагностирования тормозной цепи преобразователя частоты положено использование вейвлет-анализа входных сигналов состояния тормозной цепи. По результатам анализа рассчитываются вейвлет-коэффициенты текущего состояния входных параметров, используемые в дальнейшем для корреляционного анализа с коэффициентами типичных состояний. Диагностический вывод относительно текущего состояния формируется по максимальному коэффициенту корреляции к типичному состоянию. Такой подход позволяет определять степень приближения текущего состояния к аварийному даже при условии, что полная идентификация текущего состояния к типичному не выполнена, а также своевременно предупредить как выход из строя отдельного электропривода, так и аварийную остановку технологического процесса в целом.

Ключевые слова: вейвлет-диагностирование, преобразователь частоты, торможение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Підвищення якості продукції та енергетичної ефективності виробництва в цілому веде за собою впровадження до виробництва енергоефективних технологій. Вони передбачають використання інтелектуальних систем і комплектацію приводів механізмів частотно-керованими асинхронними двигунами, які є більш надійними та ефективнішими порівняно з електроприводами постійного струму.

Залежно від вимог технологічного процесу частотні електроприводи комплектуються гальмівними колами, які призначені для розсіювання енергії гальмування, що накопичилась внаслідок роботи електродвигуна з механізмом із великим моментом інерції. Несправність гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів може призвести до порушення технології виробництва і браку продукції, а в гіршому випадку – до нещасних випадків на виробництві при роботі людини з механізмами, які не змогли здійснити аварійне гальмування через несправності гальмівних кіл.

Тому для забезпечення надійного та безпечного функціонування частотно-керованого асинхронного електропривода необхідно проводити он-лайн контроль поточного технічного стану гальмівних кіл і прогнозування аварійних режимів. Існуючі методики діагностування, побудовані на апаратних засобах

і програмних можливостях мікропроцесорних систем, дозволяють технічно реалізувати задачі діагностики несправностей всіх елементів електропривода за наявності адекватної методики синтезу алгоритмів діагностування [1]. Однак існує проблема вдосконалення систем діагностування таких гальмівних кіл із прогнозуванням пошкодження та відмов їх ключових елементів.

Мета роботи – вейвлет-діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відомий спосіб діагностування перетворювача частоти, що пропонується виробниками перетворювачів частоти [2], передбачає діагностування безпосередньо при подачі напруги на агрегат, причому діагностичний висновок виводиться у вигляді повідомлення для кожного транзистора на наявність короткого замикання, відкритого чи закритого стану вихідних транзисторних каскадів. Таку функцію підтримують перетворювачі більшості брендів. Недоліком такої влаштованої опції діагностування є відсутність можливості спрогнозувати і запобігти несправності окремих елементів, у тому числі гальмівних кіл, під час роботи. Метод діагностування вихідних каскадів частотного електропривода, що розглядається в роботі [3], базується на оцінюванні відповідності

струму силового кола до зусилля в електромеханічній системі під час гальмування. Однак взято до уваги варіант, коли розсіювання енергії гальмування здійснюється на самих модулях та електродвигуні, що доцільно лише для приводів з малими значеннями потужності, тривалості гальмування та невеликим моментом інерції. В роботі [4] обґрунтовано необхідність врахування впливу температури на роботу елементів перетворювача при його діагностуванні, однак відсутня єдина діагностична модель та спосіб для її реалізації. В [5] розроблено узагальнений підхід до діагностування напівпровідникових перетворювачів із застосуванням вейвлет-аналізу, що дозволяє збільшити обсяг інформації про сигнали, які аналізуються, але відсутні рішення щодо діагностування гальмівних кіл електроприводів.

Силова частина гальмівного кола складається з гальмівного резистора R0 та ключового елемента VS0, яким у більшості випадків виступає IGBT модуль (рис. 1).

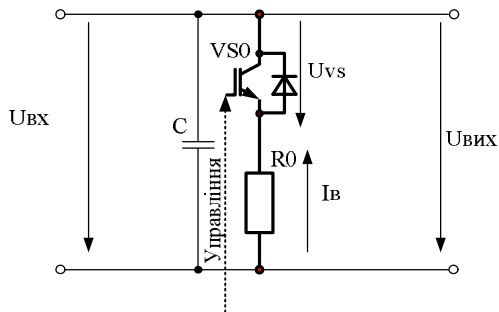


Рисунок 1 – Ланка постійного струму перетворювача частоти із гальмівним колом

Для вибору параметрів вимірювання в гальмівному колі і формування діагностичної функції потрібно враховувати наступне.

Перенапруга ΔU_C на конденсаторі фільтра в режимі гальмування свідчить про несправність гальмівного кола в цілому [6].

Несправність гальмівного резистора R0 характеризує температура нагріву гальмівного резистора t_r , що обумовлена кількістю розсіюваної енергії під час гальмування. Якщо цей параметр менший за одних і тих же умов експлуатації, то це свідчить про несправність гальмівного резистора або початок його руйнування. Відхилення струму через гальмівне коло I_b при однакових умовах роботи буде свідчити про пошкодження силового модуля або гальмівного резистора.

Відшарування виводів кристала транзистора, призводить до стрибкоподібного зростання напруги насичення і температури кристалу. Це пояснюється тим, що руйнування спайного з'єднання силового чипа призводить до збільшення температурного опору, в результаті зростає температура кристалу t_{vs} , а також напруга насичення. Такі несправності характеризують руйнування модуля, втрату керованості, і як наслідок нездатність пропускати електричний струм через гальмівне коло [7].

Для синтезу математичної моделі системи діагностування гальмівних кіл скористаємось математи-

чним апаратом вейвлет-аналізу [8]. Розклад вхідного сигналу за допомогою вейвлет-перетворення Добеші зі зворотним відновленням сигналу з використанням перших L вейвлет-коефіцієнтів дозволяє добре описувати вихідний сигнал вейвлетами. При цьому досягається висока швидкість обчислень та можливість встановлювати проміжний стан об'єктів, що характеризуються дискретними станами (в нормі, не в нормі), і провадити їх багаторівневий контроль.

Відповідно до зазначених тверджень потрібно скласти таблицю станів гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів (табл. 1), в якій число «1» відповідає попаданню параметру в зону допуску; «0» – виходу за межі зони допуску відповідної діагностичної ознаки.

Таблиця 1 – Стани гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів

Стани	Діагностичні ознаки гальмівного кола				
	ΔU_C	U_{vs}	I_b	t_r	t_{vs}
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Q0	1	1	1	1	1
Q1	1	0	1	1	0
Q2	0	1	0	1	1
Q3	0	0	1	1	1
Q4	0	0	0	1	1

де Q0 – справний стан; Q1 – справний стан, з перегрівом силового модуля; Q2 – несправний гальмівний резистор; Q3 – критичний стан; Q4 – несправний стан.

Для розрахунків і моделювання сигналів використовуємо ППП Mathcad. Ядро системи Mathcad містить дві наступні функції вейвлет-перетворення [9]:

wave(x) – вектор прямого вейвлет-перетворення;
 iwave(w) – вектор зворотного вейвлет-перетворення.

Вектор даних x і вектор вейвлет-спектра повинні мати рівно $N = 2^{n_0}$ елементів, де n_0 – ціле число.

Отже зобразимо графічно таблицю станів гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів.

Кількість елементів вектора даних і вейвлет-спектра буде:

$$N = 2^{n_0}, \quad (1)$$

де $n_0 = 9$,

$$N = 2^9 = 512.$$

Крок дискретизації буде задаватися виразом:

$$i = 0, 1 \dots N - 1, \quad (2)$$

Сигнали у ППП Mathcad задамо за допомогою програмних модулів, які знаходяться у набірній панелі Programming. Для прикладу розглянемо формульний вираз (3):

$$S2_i = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq i \leq \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{if } \frac{N}{5} \leq i \leq 2 \cdot \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{if } 2 \cdot \frac{N}{5} \leq i \leq 3 \cdot \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3)$$

де $S2_i$ – сигнал стану гальмівного кола, If – у ППП Mathcad умовний оператор (оператор розгалуження); умова повинна стояти після if , а оператор, який виконується, якщо виконано задана умова, – перед if .

Otherwise – в ППП Mathcad позначає оператор, який повинен бути виконаний, якщо умова оператора if не виконується.

Вирази для задання сигнали решти станів наведено далі – вирази (4):

$$S1_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq i \leq \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{if } \frac{N}{5} \leq i \leq 2 \cdot \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{if } 2 \cdot \frac{N}{5} \leq i \leq 4 \cdot \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad S3_i = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq i \leq 2 \cdot \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{if } 2 \cdot \frac{N}{5} \leq i \leq 4 \cdot \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$S4_i = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq i \leq 3 \cdot \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad SD_i = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq i \leq \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{if } \frac{N}{5} \leq i \leq 2 \cdot \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{if } 2 \cdot \frac{N}{5} \leq i \leq 3 \cdot \frac{N}{5}; \\ 1 & \text{if } 3 \cdot \frac{N}{5} \leq i \leq 4 \cdot \frac{N}{5}; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

У результаті отримуємо зображення таблиці станів гальмівного кола (рис. 2).

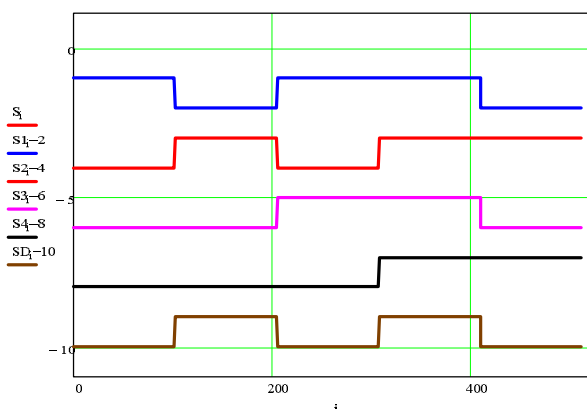


Рисунок 2 – Зображення таблиці станів гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного двигуна (SD – стан гальмівного кола, що діагностується)

Для отримання зображення вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола перетворювача частотно-

керованого асинхронного двигуна використовуємо пряме вейвлет-перетворення Добеші db4 (або DB4):

$$\begin{aligned} W1 &= \text{wave}(S1), \\ W2 &= \text{wave}(S2), \\ W3 &= \text{wave}(S3), \\ W4 &= \text{wave}(S4), \\ WD &= \text{wave}(SD). \end{aligned} \quad (5)$$

Зображення вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола наведені на рис. 3.

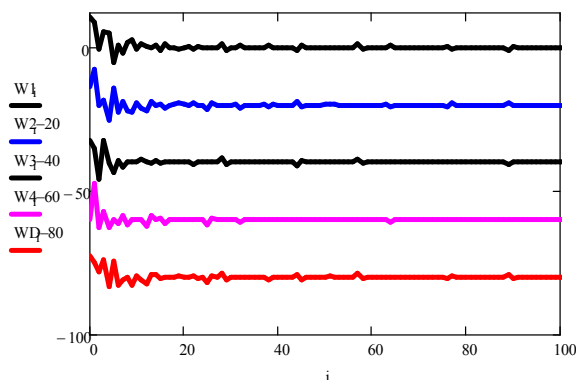
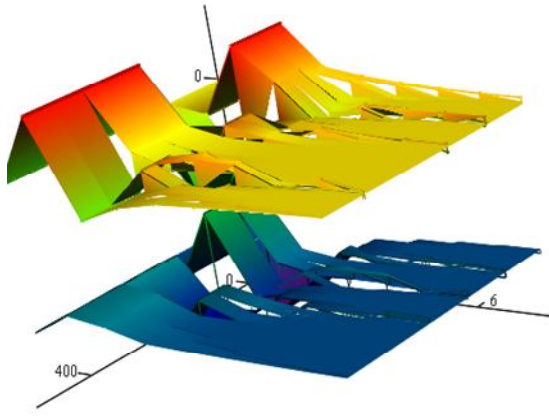


Рисунок 3 – Зображення вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного двигуна (SD – стан гальмівного кола, що діагностується)

Розрахунки для побудови спектра сигналів наведені у формулах (6) і (7), а весь спектр зображено на рис. 4 і 5:

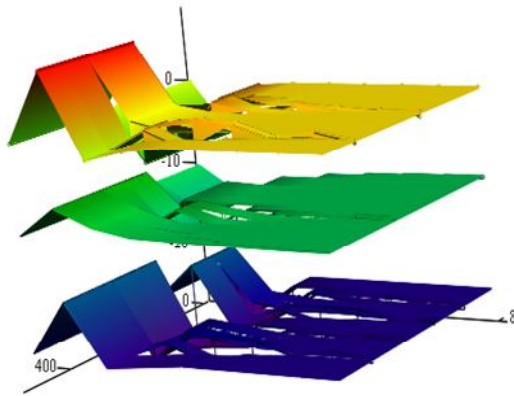
$$N_{levels} = \frac{\ln(N)}{\ln(2)} - 1 = 8 \quad k = 1..N_{levels}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} coeffs(level) &= \text{submatrix}(W1, 2^{level}, 2^{level+1} - 1, 0, 0); \\ C1_{i,k} &= coeffs(k) \left[\begin{matrix} i \\ \left\lfloor \frac{N}{2^k} \right\rfloor \end{matrix} \right], \\ coeffs(level) &= \text{submatrix}(W2, 2^{level}, 2^{level+1} - 1, 0, 0); \\ C2_{i,k} &= coeffs(k) \left[\begin{matrix} i \\ \left\lfloor \frac{N}{2^k} \right\rfloor \end{matrix} \right], \\ coeffs(level) &= \text{submatrix}(W3, 2^{level}, 2^{level+1} - 1, 0, 0); \\ C3_{i,k} &= coeffs(k) \left[\begin{matrix} i \\ \left\lfloor \frac{N}{2^k} \right\rfloor \end{matrix} \right], \\ coeffs(level) &= \text{submatrix}(W4, 2^{level}, 2^{level+1} - 1, 0, 0); \\ C4_{i,k} &= coeffs(k) \left[\begin{matrix} i \\ \left\lfloor \frac{N}{2^k} \right\rfloor \end{matrix} \right], \\ coeffs(level) &= \text{submatrix}(WD, 2^{level}, 2^{level+1} - 1, 0, 0); \\ CD_{i,k} &= coeffs(k) \left[\begin{matrix} i \\ \left\lfloor \frac{N}{2^k} \right\rfloor \end{matrix} \right] \end{aligned} \quad (7)$$



C1, C2- 12

Рисунок 4 – Спектр сигналів вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного двигуна для C1 та C2



C3, C4- 10, CD- 23

Рисунок 5 – Спектр сигналів вейвлет-коефіцієнтів станів гальмівного кола перетворювача частотно-керованого асинхронного двигуна для C3, C4 та CD

Діагностичний висновок отримується як стан з максимальним коефіцієнтом кореляції, де коефіцієнт кореляції «r» обчислюється за формулою

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(W_x - \frac{W_x}{N} \right) \cdot \left(W_y - \frac{W_y}{N} \right) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \left[\left(W_x - \frac{W_x}{N} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \left(W_y - \frac{W_y}{N} \right)^2 \right]}} \quad (8)$$

де W_x, W_y – числові значення величин, між якими встановлюється кореляційний зв'язок.

Результати кореляційного аналізу вейвлет-коефіцієнтів поточного та типових станів подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Стани гальмівних кіл перетворювачів частоти

Параметр	Приклад
Стан ПЧ, що діагностується	0;1;0;1;0
Діагнози	Q1, r = 0,0125; Q2, r = 0,786 Q3, r = 0,297; Q4, r = 0,583

ВИСНОВКИ. Запропоновано математичну систему діагностування гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів, яка шляхом використання вейвлет-діагностування дозволяє визначити ступінь наближення поточного стану гальмівних кіл перетворювачів частотно-керованих асинхронних електроприводів до аварійного.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алгоритмы технической диагностики регулируемых асинхронных электроприводов / О.В. Крюков, В.В. Марков // Электротехника. – 2002. – № 4. – С. 37–46.
2. Altivar 71. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей. Руководство по программированию [Электронный ресурс], Schneider Electric, Telemecanique. – Режим доступа: <http://xn--80aqahnfuib9b.xn--p1ai/atv312.html>.
3. Pat. EP 1752351 A1 EU, B 60 T 13/74 Electric brake and electric brake control apparatus / Hitachi Ltd (Japan). – № 20070035178; application 09.08.2006.
4. Смирнов А.О., Ланграф С.В., Казано В.С., Бекшишев Р.Ф. Исследование статических режимов работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода в условиях низких температур // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4. – С. 61–63.
5. Хижняк Діагностика напівпровідникових перетворювачів із застосуванням вейвлет- функцій твірного аргументу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Тетяна Андріївна Хижняк / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". – К., 2008. – 20 с.
6. Левицький С.М., Бартецький А.А. Математична модель системи діагностування гальмівних кіл частотних електроприводів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 4. – С. 79–83.
7. Колпаков А. Методы оценки надёжности силовых модулей IGBT SEMIKRON в предельных режимах // Силовая электроника. – 2004. – № 1. – С. 40–45.
8. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов: учебное пособие. – СПб.: Издательство ООО «МОДУС+», 1999. – 152 с.
9. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

WAVELET DIAGNOSING OF BRAKING CIRCUITRY OF FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES

V. Grabko, S. Levitskiy, A. Bartetskiy

Vinnitsia national technical university

vul. Khmelnytske shose, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine. E-mail levitskiy@vntu.edu.ua, bartetskiy@meta.ua

A mathematical model of the diagnosing system of frequency converters brake circuits for controlled induction motors of processing units with a high braking time is presented. The basis of the diagnosing system of a brake circuit of the frequency converter is a use of wavelet analysis of input position of the brake circuit. According to the analysis it is calculated the wavelet coefficients of the input parameters current state, which is used in the future for correlation analysis with coefficients of typical conditions. Diagnostic conclusion about the current state is formed by the maximum correlation coefficient to a typical state. This approach allows you to define the degree of approximation of the current state to emergency state, even assuming that the full identification of the current status to a typical is failed, as well as to warn the failure of a single electric drive, and an emergency stop of the process in general.

Key words: wavelet diagnosis, frequency converter, braking.

REFERENCES

1. Kryukov, O.V. (2002), "Algorithms of technical diagnostics of controlled asynchronous electric drives", *Electrotechnika*, no. 4, pp. 37–46.
2. Altivar 71 (2005), "Variable speed drives for asynchronous engines", Schneider Electric, Telemecanique, available at: <http://xn--80aqahnfuib9b.xn--plai/atv312.html> (accessed December 15, 2014).
3. Pat. EP 1752351 A1 EU, B 60 T 13/74 Electric brake and electric brake control apparatus / Hitachi ltd (Japan), no. 20070035178; application 09.08.2006; publ. 14.02.2007.
4. Smirnov, A.O., Langraf, S.V., Kazano, V.S., Bekishev, R.F. (2009), "Investigation of static modes of frequency-controlled induction motor drive at low temperatures", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, no. 4, pp. 61–63.
5. Khyzhnyak, T. (2008) "Diagnostics of semiconductor transformers using the wavelet function of michniy argument", Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.), 05.09.12, Kremenchuk National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Inst, Kyiv, Ukraine.
6. Levytskyi, S.M., Bartetsky, A.A. (2013) "Mathematical model of diagnosing brake circuits of frequency electric drives", *Transaction of Vinnitsa Polytechnic*, no. 4, pp. 79–83.
7. Andriy Kolpakov, (2004) "Methods for assessing the reliability of power modules IGBT SEMIKRON in limiting modes", *Power Electronics*, no. 1, pp. 40–45.
8. Novikov, L.V. (1999) *Osnovy veyvlet-analiza signalov* [Fundamentals of wavelet analysis signals], Modus+, St. Petersburg, Russia.
9. Yakovlev, A.N. (2003). *Vvedenie v veyvlepreobrazovaniya* [Introduction to wavelet transform], Publishing House of the State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Стаття надійшла 16.01.2015.