УДК 621.313.13:519.677

ВЫЯВЛЕНИЕ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ

В.И. Полищук, А.А. Хамухин

Томский политехнический университет
E-mail: polischkvi@tpu.ru

Актуальность работы *обусловлена отсутствием апробированных методов функциональной диагностики виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора, а возникновение такого повреждения у крупных генераторов приводит к большому экономическому ущербу.*

Цель работы: *поиск диагностического признака возникновения виткового замыкания на основе вейвлет-анализа ЭДС на выходе датчика магнитного поля, установленного в торцевой зоне генератора.*

Методы исследования: *на основе непрерывного вейвлет-преобразования произведен анализ экспериментальных данных для получения масштабно-временного спектра, который позволяет выявлять локальные неоднородности анализируемого сигнала.*

Результаты: *Реализован алгоритм в виде компьютерной программы. Алгоритм протестирован по трем входным сигналам от датчика магнитного рассеяния, установленного в торцевой зоне синхронного генератора. Выявлен признак наличия витковых замыканий на основе использования отклонения спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного потока рассеяния. Представлены результаты обработки экспериментальных данных на основе предложенного алгоритма, позволяющие выявлять витковые замыкания обмотки ротора.*

Ключевые слова:
Ротор синхронного генератора, магнитный поток рассеяния, витковые замыкания ротора, интегральный вейвлет-спектр, дисперсия вейвлет-коэффициентов.

Введение

Синхронный генератор (СГ) представляет собой сложную электромеханическую систему, а возникновение такого повреждения как витковое замыкание (ВЗ) в обмотке ротора у крупных СГ приводит к большому экономическому ущербу. В то же время вывить такое замыкание крайне сложно. Защиты от ВЗ в роторе пока еще не разработаны, а диагностируется такое повреждение в подавляющем большинстве случаев только во время капитального ремонта на полностью разобранной машине. Это связано с тем, что в месте ВЗ отсутствует ток короткого замыкания в классическом его понимании. Нет электрической дуги и значительного изменения падения напряжения. Вследствие синхронной скорости вращения ротора ток в замкнутом витке возникает в виде кратковременных импульсов во время качаний ротора либо в переходных режимах работы. Крайне важно на основе информации со штатных измерительных средств выбрать диагностические параметры, значения которых однозначно связаны с техническим состоянием межвитковой изоляции.

Одним из путей решения задачи по построению функциональной диагностики ВЗ обмотки ротора СГ является разработка методов анализа симметрии магнитного поля в торцевой зоне машины на основе датчиков магнитного поля [1, 2]. Однако спектральный анализ, используемый в [1, 2], показал недостаточную чувствительность к данному виду повреждения. Цель работы – исследовать возможность использования непрерывного вейвлет-преобразования при поиске диагностического признака возникновения виткового замыкания в обмотке ротора СГ на основе анализа ЭДС с выхода датчика магнитного поля, установленного в торцевой зоне генератора.

Постановка задачи: на основе экспериментальных данных, полученных с датчика магнитного поля рассеяния, необходимо выявить диагностический признак ВЗ в обмотке ротора СГ с применением интегрального вейвлет-спектра и дисперсии вейвлет-коэффициентов.

Экспериментальная установка

Состав экспериментальной установки представлен на рис. 1. Установка состоит из генератора ГАБ-4-Т/230 – *1*, приводимого во вращение асинхронным двигателем – *2*, питаемым преобразователем частоты (Altivar 71) – *3*. В СГ на подшипниковом щите установлен индукционный датчик, сигнал с которого через коннектор ввода (CB-68LP) – *4* и плату ввода/вывода (NI PCI 6024E, 12 разрядов, максимальная частота дискретизации 20 МГц) подается в промышленный компьютер – *5* с монитором – *6*. Для создания замыкания с обмотки ротора выведены через дополнительные контактные кольца отпайки – *3* (4, 10 и 20 % витков полюса). Генератор нагружался асинхронным двигателем, на валу которого установлена машина постоянного тока для создания тормозного момента.

Метод исследования

Для анализа магнитных потоков рассеяния необходимо получить частотно-временной спектр сигнала с датчика магнитного потока, установленного в торцевой зоне СГ, и выделить из него величину искажения вносимого витковым замыканием. В настоящее время эффективным инструментом получения частотно-временного спектра сигнала является непрерывное вейвлет-преобразование (НВП). Непрерывное вейвлет-преобразование используется для получения масштабно-временного спектра, который позволяет выявлять локальные неоднородности анализируемого сигнала [3].

Среди различных модификаций вейвлет-преобразования (дискретное, диадное, пакетное ВП и т. д.) непрерывное ВП является самым вычислительно ёмким. Однако для анализа сигналов применяют именно НВП, поскольку оно предоставляет больше информации, чем другие методы вейвлет-преобразования. Так, известно применение НВП для обнаружения шумов подводных лодок противника [4], для выявления предпомпажного состояния (срыва) авиационных двигателей [5], для определения работоспособности породоразрушающего инструмента при бурении скважин [6], для распознавания речи в сильно зашумлённом сигнале [7] и др.

При цифровой обработке сигналов реализация непрерывного вейвлет-преобразования в строгом виде невозможна, поэтому следует рассматривать дискретизированное непрерывное вейвлет-преобразование.

Алгоритм может быть реализован параллельно и итерационно. Его основная отличительная особенность заключается в разделении процесса вейвлет-преобразования на 2 этапа: подготовительный и основной [8–12].

На подготовительном выбирают: шаг оцифровки анализируемых данных Δt, количество и значения масштабов по времени (J и a_j), вид функции Ψ (материнский вейвлет), ограничение на максимальное количество отсчетов анализируемого сигнала (n). На этом же этапе по формуле (1) вычисляют и сохраняют базисные коэффициенты $P_{i,j,k}$, которые потребуются для реализации второго этапа вычисления НВП:

$$P_{i,j,k} = \left\{ \frac{\Delta t}{\sqrt{a_j}} \Psi \left[\frac{(i-k)\Delta t}{a_j} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $\Psi\left[\frac{(i-k)\Delta t}{a_j}\right]$ – некоторая функция с определенными свойствами, полученная из материнского вейвлета; i, j, k – индексы по времени t, по масштабу a, по сдвигу по времени b.

На втором (основном) этапе по формулам (2) и (3) вычисляют текущие значения НВП для момента времени ($i\Delta t$).

$$W^0(a_j, b_k) = 0, \quad (2)$$

$$W^{i+1}(a_j, b_k) = W^i(a_j, b_k) + S(i\Delta t) \cdot P_{i,j,k}, \quad (3)$$

где $S(i\Delta t)$ – оцифрованный с равномерным шагом анализируемый сигнал $S(t)$.

При поступлении следующего отсчета анализируемых данных в момент времени $(i+1)\Delta t$ к уже рассчитанному массиву значений НВП добавляют только один слой значений, рассчитываемых по формуле (3). При этом используют подготовленный на первом этапе массив коэффициентов $P_{i,j,k}$. Таким образом, реализуется итерационный процесс уточнения НВП, что позволяет уменьшить количество вычислений и сократить время расчета.

В [12] показано, что алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования, представленный выражениями (1–3), сходится к известному непрерывному вейвлет-преобразованию анализируемого сигнала $S(t)$:

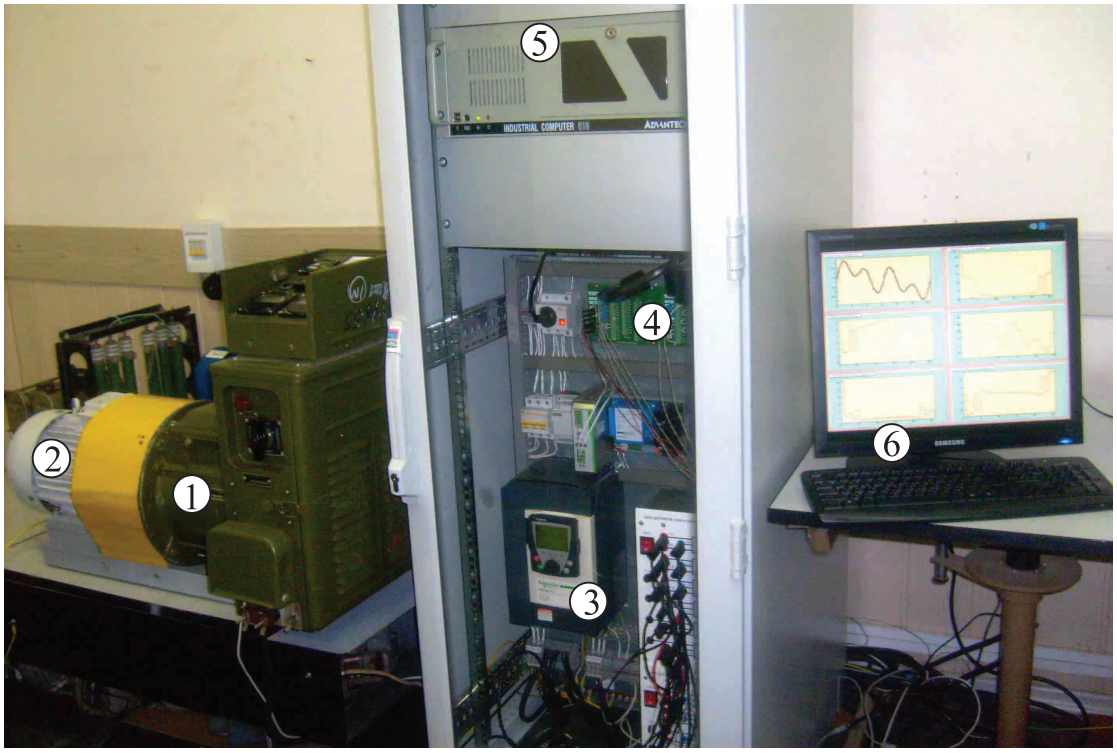


Рис. 1. *Экспериментальная установка: 1 – синхронный генератор; 2 – асинхронный двигатель; 3 – преобразователь частоты; 4 – коннектор ввода; 5 – промышленный компьютер; 6 – монитор*

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \cdot \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Для более удобного и надежного обнаружения локальных неоднородностей анализируемого сигнала кроме непрерывного вейвлет преобразования может понадобиться вычисление некоторых функций от НВП.

Алгоритм выявления витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе анализа локальных неоднородностей магнитных потоков рассеяния может быть представлен в следующем виде.

1. Измерение анализируемого сигнала $S(t)$ (рассеяния магнитного потока на торце синхронного генератора) и передача его в аналогово-цифровой преобразователь.
2. Аналогово-цифровое преобразование и получение дискретизированного сигнала $S(i\Delta t)$ с шагом дискретизации Δt, который должен удовлетворять требованию теоремы Котельникова–Найквиста:

$$f_d = \frac{1}{\Delta t} \geq 2 f_{\max},$$

где f_d – частота дискретизации входного сигнала, $f_{\max}$ – максимальная частота, которой ограничен спектр полезной составляющей входного сигнала.
3. Непрерывное вейвлет-преобразование оцифрованного входного сигнала $S(i\Delta t)$ и получение значений НВП $W(a_j,b_k)$, состоящее из двух этапов: подготовительного и основного. Подготовительный этап можно выполнить только один

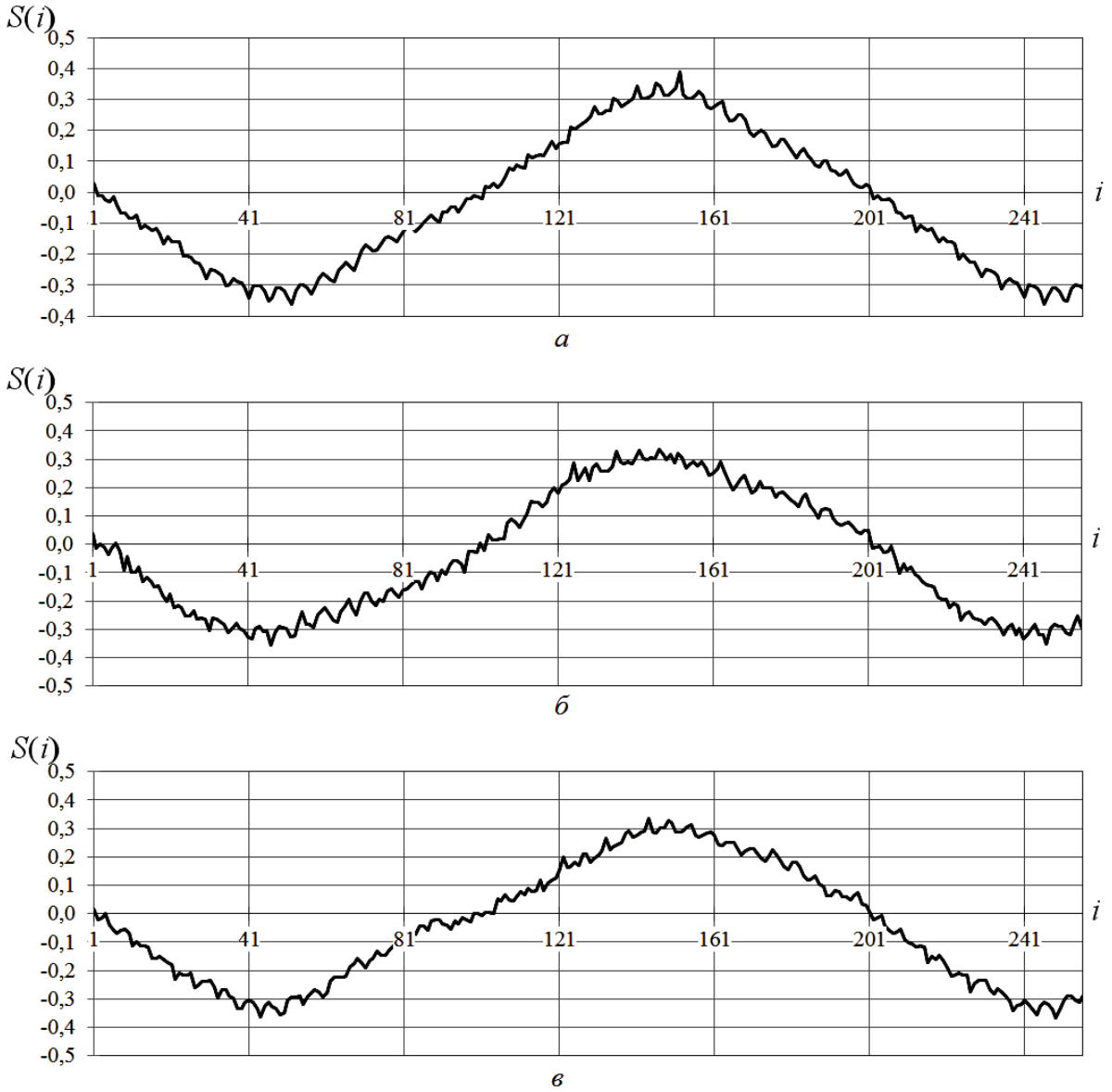


Рис. 2. *Анализируемый сигнал: а) генератор на холостом ходу без повреждений; с короткозамкнутыми витками обмотки; б) 4; в) 20 %*

раз для одного исследуемого генератора, а затем периодически повторять только второй этап, который требует существенно меньше вычислений.

4. Вычисление интегрального вейвлет-спектра (ИВС) по полученному НВП:

$$\bar{W}(a_j) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}[W(a_j, b_k)]^2 \equiv W(j).$$

5. Определение по ИВС правильности выбора масштабов a_j либо их коррекция и возврат на п. 3.
6. Вычисление распределения дисперсии вейвлет-коэффициентов по анализируемому промежутку времени:

$$\bar{W}(b_k) = \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\left[W(a_j, b_k) - \frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}W(a_j, b_k)\right] \equiv W(k).$$

7. Выявление по распределению дисперсии вейвлет-коэффициентов неоднородных участков и анализ вейвлет-коэффициентов по всем масштабам на отклонение от синусоиды.

Результаты исследования

Алгоритм, описанный выше, был реализован в виде компьютерной программы. Для тестирования алгоритма были выбраны три входных сигнала от датчика магнитного рассеяния, установленного в торцевой зоне синхронного генератора: без повреждений обмотки, с 4 % короткозамкнутых витков и 20 % короткозамкнутых витков. Было выбрано количество отсчетов входного сигнала, подлежащего анализу, N=256 (на разных участках измерения по времени), количество масштабов M=16, шаг Δt=0,0001 с. Опыты были проведены с нагруженным синхронным генератором и на холостом ходу.

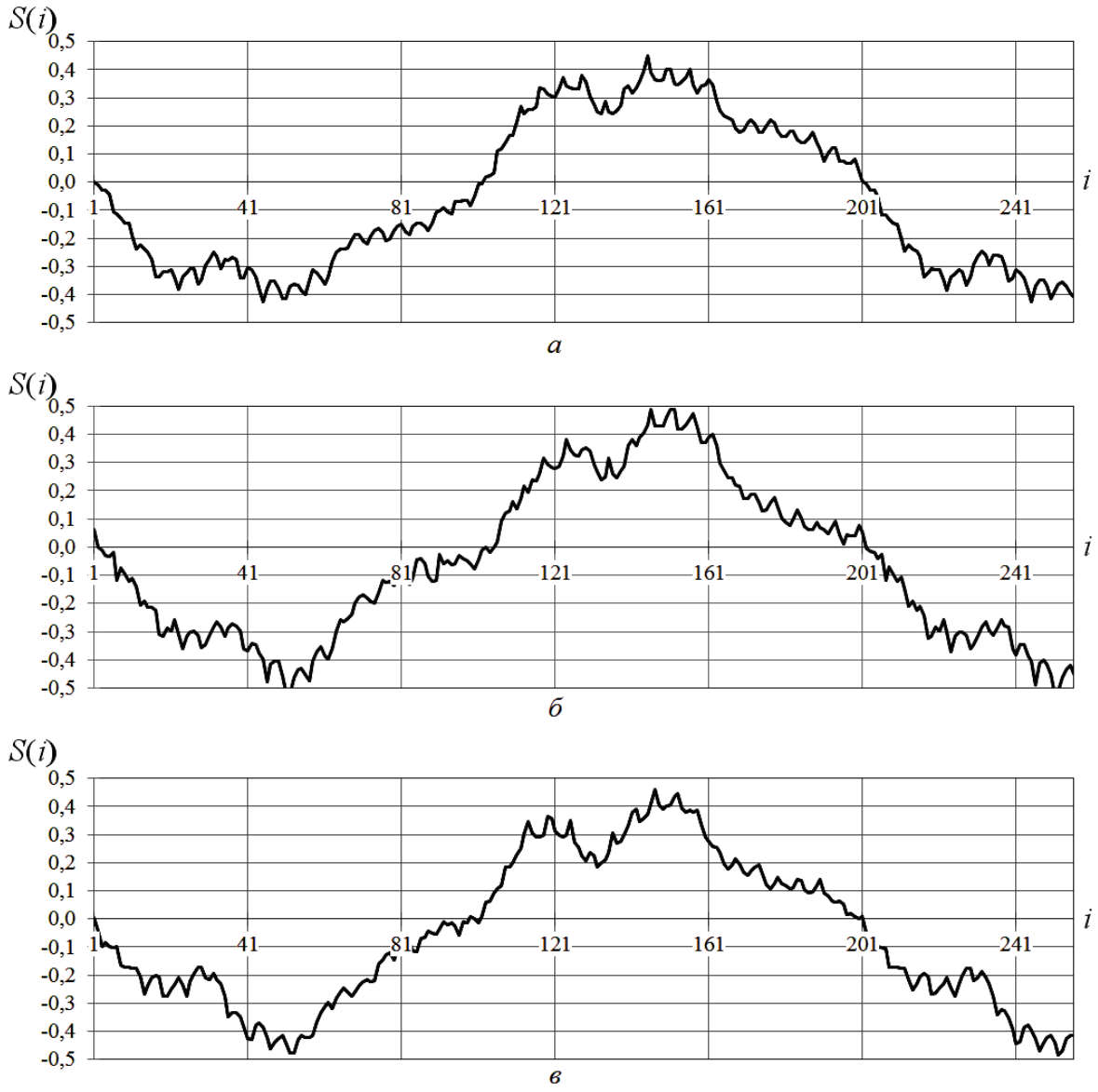


Рис. 3. *Анализируемый сигнал: а) нагруженный генератор без повреждений; с короткозамкнутыми витками обмотки; б) 4; в) 20 %*

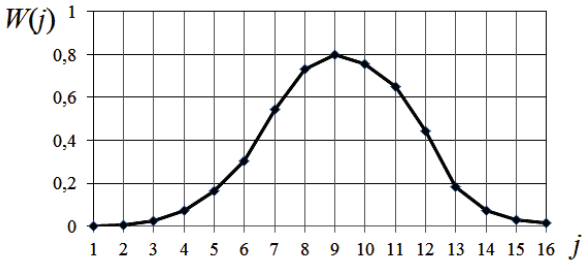


Рис. 4. *Расчетный интегральный вейвлет-спектр анализируемых сигналов для генератора на холостом ходу без повреждений*

В качестве материнского вейвлета использовалась функция, известная под названием «мексиканская шляпа» (*MHAT*), которая является второй производной функции Гаусса и описывается уравнением:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}}\left[e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2}\right)\right],$$

где $x=(t-b)/a$; σ – параметр, позволяющий изменять масштаб вейвлета в соответствии с видом входного сигнала. Этот вейвлет имеет узкий энергетический спектр, а нулевой и первый моменты этого вейвлета равны 0.

Вид анализируемых входных сигналов представлен на рис. 2 (холостой ход) и рис. 3 (нагруженные синхронные генераторы).

Вид расчетного интегрального вейвлет-спектра для анализируемых сигналов показан на рис. 4 (для генератора на холостом ходу). Для нагруженного генератора и для генераторов с короткозамкнутыми витками обмотки 4 и 20 % ИВС выглядел аналогично.

По форме интегрального вейвлет-спектра, представленного на рис. 4, можно сделать вывод, что масштабы выбраны правильно и их коррекция не требуется. Распределение ИВС по масштабам имеет четко выраженный максимум на 9-м масштабе, соответствующий основной гармонике анализируемого сигнала. Также видно, что масштабы 1, 2 и 15, 16 почти не дают вклада в ИВС и дальнейшее уменьшение или увеличение масштабов не даст дополнительной информации.

Расчетные распределения дисперсии вейвлет-коэффициентов представлены на рис. 5.

Из рисунка видно, что нагруженный генератор даже без витковых замыканий уже имеет асимметричное распределение дисперсии вейвлет-коэффициентов. Поэтому отклонение от симметрии за счет витковых замыканий следует выявлять для генератора на холостом ходу. Масштаб 9 соответствует основной гармонике основного сигнала и отклонения от синусоиды не имеет. Масштабы 8 и 7 близки к основному. Заметные отклонения от синусоиды обнаружены для вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба (рис. 6).

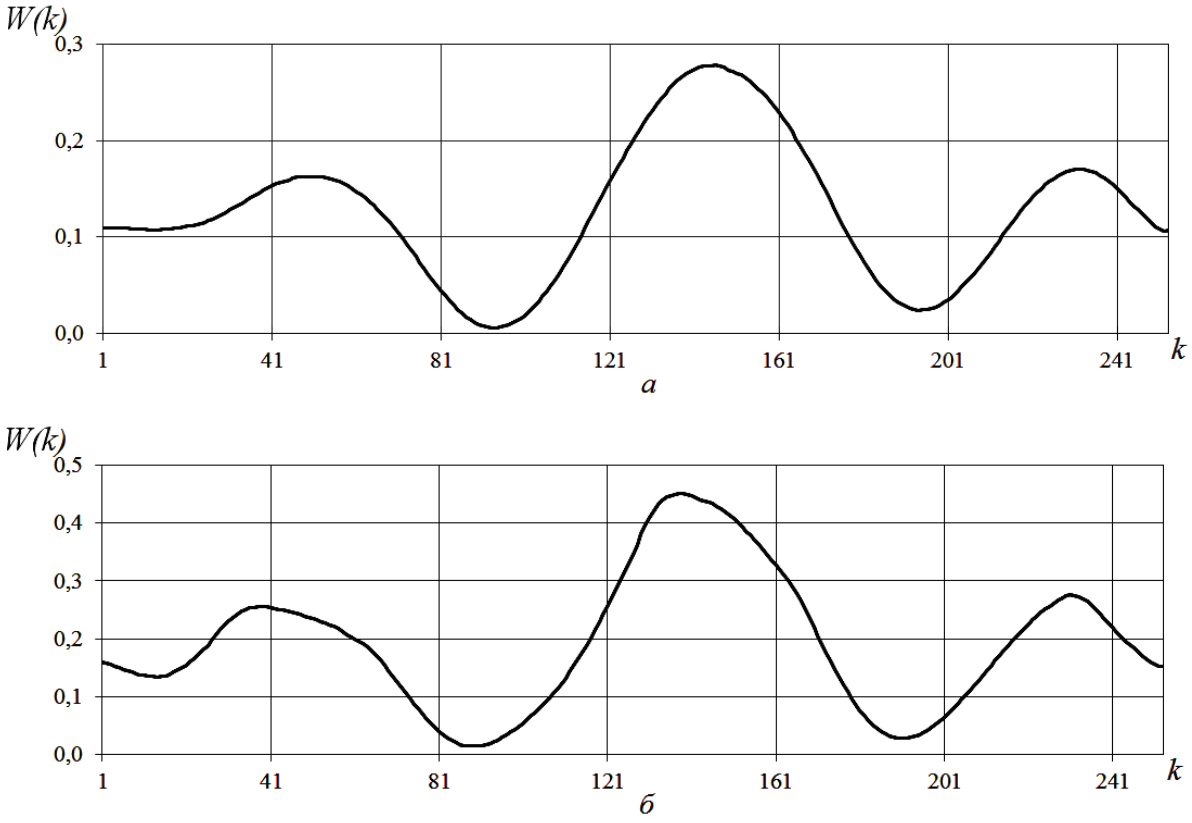


Рис. 5. *Распределение дисперсии вейвлет-коэффициентов: а) генератор на холостом ходу без повреждений; б) нагруженный генератор без повреждений*

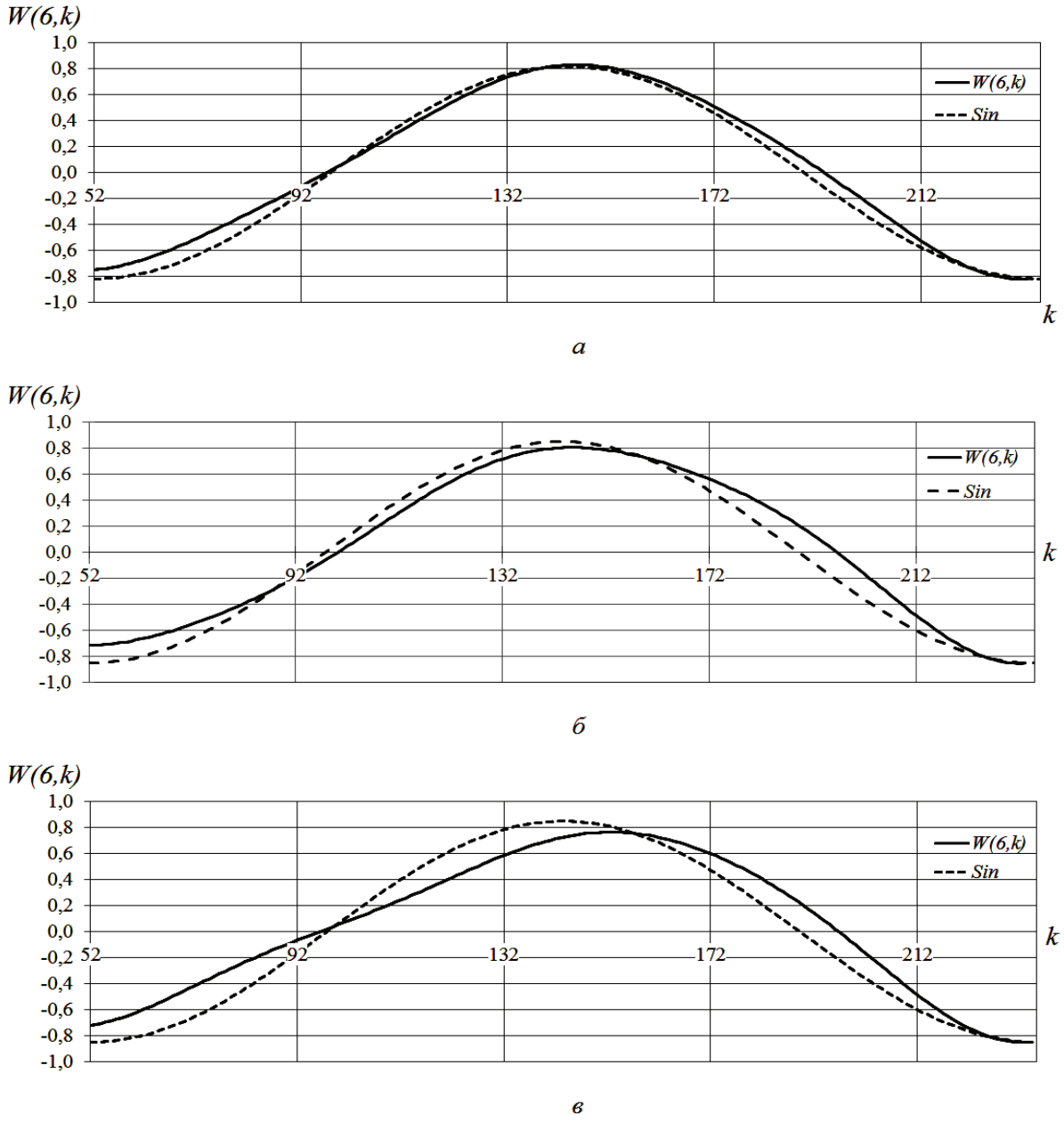


Рис. 6. *Отклонение вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба от синусоиды: а) генератор на холостом ходу без повреждений; б) с замыканием 4 % витков обмотки ротора; в) с замыканием 20 % витков обмотки ротора*

В количественном выражении относительная сумма модулей отклонения вейвлет-коэффициентов 6-го масштаба от синусоиды составила 11, 16 и 25 % соответственно для генераторов: без повреждений, с 4 и 20 % короткозамкнутых витков. По этим данным вполне реально выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на холостом ходу на основе предложенного алгоритма.

На нагруженном генераторе такую закономерность обнаружить не удалось, поскольку влияние магнитного поля статора искажает симметричность магнитного поля ротора. Однако для нагруженного генератора были выявлены другие закономерности изменения вейвлет-коэффициентов при появлении витковых замыканий ротора. Эти закономерности нашли свое отражение в спектрограммах НВП, некоторые из которых представлены на рис. 7.

Спектрограмма изображает линии равного уровня, образованные от поверхности функции $W(a,b)$. Левая нижняя четверть спектрограмм нагруженного генератора без повреждений явно отличается от этой же части спектрограмм для нагруженного генератора с короткозамкнутыми витками обмотки. Это отличие также может быть использовано для выявления витковых замыканий обмотки ротора нагруженного синхронного генератора на основе предложенного алгоритма.

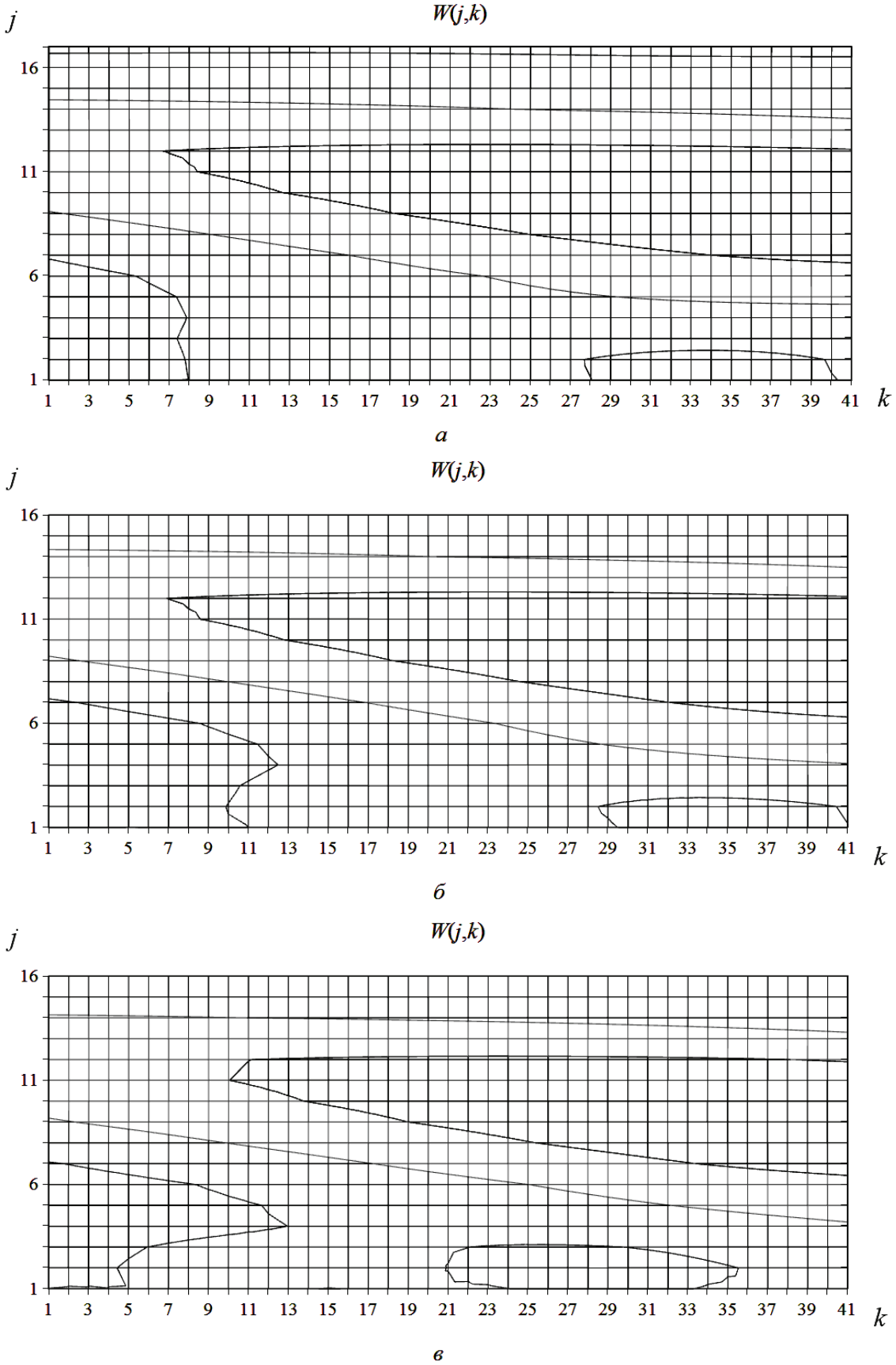


Рис. 7. *Спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования анализируемого сигнала: а) нагруженный генератор без повреждений; б) с замыканием 4 % витков обмотки ротора; в) с замыканием 20 % витков обмотки ротора*

Выводы

1. Разработан алгоритм применения непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного поля, расположенного в торцевой зоне синхронного генератора, с целью обнаружения витковых замыканий ротора.
2. Выявлен признак наличия витковых замыканий на основе использования отклонения спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования сигнала с датчика магнитного потока рассеяния от первоначальной, полученной для генератора без повреждений.
3. Установлено, что дополнительно для синхронного генератора на холостом ходу следует в качестве признака наличия витковых замыканий использовать отклонение от синусоиды вейвлет-коэффициентов масштабов, близких к масштабу основной гармоники.

Работа выполнена в рамках исполнения Госзадания «Наука» ГК № 7.2826.2011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Устройство защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. 22450 (KZ). № 2008/1073.1, заявл. 29.09.2008; опубл. 15.04.2010, Бюл. № 5. – 4 с.
2. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 57–61.
3. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2003. – 104 с.
4. Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра: пат. 2367970 РФ. МПК G 01 S 3/80 (2006.01). № 2007145474/28; заявл. 28.11.2007; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26. – 27 с.
5. Способ диагностики работы двигателя: пат. 2154813 РФ, МПК G01M15/00. № 99105603/06; заявл. 19.03.1999; опубл. 20.08.2000, Бюл. № 23. – 7 с.
6. Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента: пат. 2188939 РФ, МПК7 E 21 B 44/06, E 21 B 45/00. № 2001113974/03; заявл. 25.05.2001; опубл. 10.09.2002, Бюл. № 25. – 6 с.
7. Xueying Zhang, Zhefeng Zhao, Gaofeng Zhao. A Speech Endpoint Detection Method Based on Wavelet Coefficient Variance and Sub-Band Amplitude Variance // Innovative Computing, Information and Control, 2006 (ICICIC '06): First International Conference. – Beijing, Aug. 30 – Sept. 1 2006. – V. 3. – P. 83–86.
8. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 РФ, МПК G 06 F 17/14. № 2010127068/08; заявл. 01.07.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35. – 9 с.
9. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
10. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 149–153.
11. Хамухин А.А. О параллельном вычислении непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра // Техническая акустика. Электрон. журн. 2012. № 5. URL: http://ejta.org/ru/khamukhin1 (дата обращения: 20.06.2013).
12. Хамухин А.А. Итерационный алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 3. – С. 9–13.

Поступила 21.10.2013 г.

UDC 621.313.13:519.677

THE IMPACT OF TURN–TO–TURN SHORT CIRCUITS OF SYNCHRONOUS GENERATOR ROTOR WINDING BASED ON WAVELET ANALYSIS OF LEAKAGE FLUX

V.I. Polishchuk, A.A. Khamukhin

Tomsk Polytechnic University

The relevance of the work *is conditioned by the lack of proven methods of functional diagnostics of turn-to-turn short circuits in synchronous generator windings, but an occurrence of this damage in high power generators causes large economic losses.*
The main aim of the study *is to determine the diagnostic criterion of turn-to-turn short circuit occurrence based on the wavelet analysis of EMF at a magnetic field sensor output in the area of the generator end plate.*
The methods used in the study: *The analysis of the experimental data meant for obtaining the scale-time spectrum which allows detecting local nonuniformities of an analyzed signal is carried out on the basis of the continuous wavelet transform.*
The results: *The algorithm is finally presented as a computer code. The algorithm is tested for three input signals from the magnetic scattering sensor installed in the generator end plate area. The authors determined the criterion of the turn-to-turn short circuit occurrence by variation value of the continuous wavelet transform spectrogram of the magnetic flux scattering sensor signal. The paper introduces the results of experimental data analysis on the basis of the proposed algorithm which indicates the event of a turn-to-turn short circuit.*

Key words:
Synchronous generator rotor, magnetic leakage flux, coiled rotor circuit, integral wavelet spectrum, wavelet coefficients variance.

REFERENCES

1. *Ustroystvo zashchity sinkhronnoy elektricheskoy mashiny ot vitkovykh i dvoynykh na zemlyu zamykaniy v obmotke rotora* [The security device of synchronous electric machine from interturn and double earth fault in the winding rotor stalemate]. Patent KZ 22450. no. 2008/1073.1, 2008.
2. Polishchuk V.I. Postroenie zashchity ot vitkovogo zamykaniya v obmotke rotora sinkhronnogo generatora na osnove induktsionnogo datchika magnitnogo polya rasseyaniya [Construction of protection interturn fault in the winding of synchronous generator rotor based on inductive sensor magnetic stray field]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 57–61.
3. Yakovlev A.N. *Vvedenie v veyvlet-preobrazovaniya* [Introduction into wavelet transform]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2003. 104 p.
4. Saprykin V.A., Small V., Shatalov G.V. *Ustroystvo obnaruzheniya uzkopolosnykh shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove vychisleniya integralnogo veyvlet-spektra* [The detection device of narrowband sonar signals based on the evaluation of the integral wavelet spectrum]. Patent RF, no. 2367970, 2009.
5. Dremin I.M., Furletov V.I., Ivanov O.V., Nechitaylo V.A., Terziev V.G. *Sposob diagnostiki raboty dvigatelya* [A method of engine operation diagnosing]. Patent RF, no. 2154813, 2000.
6. Yamaliev V.U., Khasanov M.M., Yakulov R.N., Ishemguzhin E.I., Kuzeev I.R., Solodovnikov D.S. *Sposob opredeleniya rabotosposobnosti porodorazrushayushchego instrumenta* [Method of assessing the performance of drilling tools]. Patent RF, no. 2188939, 2002.
7. Xueying Zhang, Zhefeng Zhao, Gaofeng Zhao. A Speech Endpoint Detection Method Based on Wavelet Coefficient Variance and Sub-Band Amplitude Variance. *Innovative Computing, Information and Control, 2006 (ICICIC '06): First International Conference*. Beijing, Aug. 30 – Sept. 1 2006, vol. 3, pp. 83–86.
8. Khamukhin A.A. *Ustroystvo dlya vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya* [A device for computing a sampled continuous wavelet transform]. Patent RF, no. 2437147, 2011.
9. Khamukhin A.A. Matematicheskaya model yacheyki odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [Mathematical model of a homogeneous cell structure for calculation of the continuous wavelet transform]. *Problems of Informatics*, 2011, no. 5, pp. 87–93.
10. Khamukhin A.A. Primenenie yacheek odnorodnoy struktury dlya vychisleniya nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [The use of a uniform cell structure for calculation of the continuous wavelet transform]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 5, pp. 149–153.
11. Khamukhin A.A. O parallelnom vychislenii nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya v zadache obnaruzheniya uzkopolosnykh shumovykh gidroakusticheskikh signalov na osnove integralnogo veyvlet-spektra [On the parallel computation of the continuous wavelet transform to the problem of detecting narrowband sonar signals from the integral wavelet spectrum]. *Electronic Journal. Technical Acoustics*, 2012, no. 5. Available at: http://ejta.org/ru/khamukhin1 (accessed 20.06.2013).
12. Khamukhin A.A. Iteratsionny algoritm vychisleniya diskretizirovannogo nepreryvnogo veyvlet-preobrazovaniya [An iterative algorithm for computing the sampled continuous wavelet transform]. *Herald of computer and information technologies*, 2013, no. 3, pp. 9–13.