

Информационные системы и технологии

УДК 658.562

Н.А. Любимова, канд. техн. наук

Харьковский национальный аграрный университет им. В.В. Докучаева,
п/о«Коммунист-1», Харьковская обл., 62483.

Анализ эффектов спектральной нестационарности в процессах загрязнения воздушной среды

Рассмотрены математические модели вейвлет-преобразования дискретизированных процессов случайного изменения параметров экологического контроля и мониторинга на примере выбросов тепловых электростанций. Получены трехмерные вейвлет-изображения контролируемых процессов для пяти показателей загрязнения. Проанализированы локальные спектральные особенности изображений с оценкой частоты возможных превышений норм ПДВ. Библ. 9, рис. 2.

Ключевые слова: экологический мониторинг, выбросы тепловых электростанций, контроль, анализ

Введение

Контроль процессов загрязнения окружающей природной среды отходами промышленных предприятий – важнейшая часть Государственной системной организации управления защитой окружающей среды на Украине, которая учитывает не только национальные интересы, но и требования международных стандартов. В отличие от объектов контроля с нормативно заданными параметрами и свойствами (серийно выпускаемая промышленная продукция), процессы загрязнения природной среды промышленными предприятиями, в рассматриваемом случае выбросами теплоэлектростанций, являются диффузными объектами, свойства которых отличаются априорной неопределенностью случайных выбросов, общей нестационарностью изменений во времени и неопределенностью вероятностных моделей контролируемых параметров.

Повышение эффективности контроля процессов загрязнения окружающей среды – это, прежде всего, изучение закономерностей поведения процессов случайного изменения контролируемых показателей. Такие закономерности носят локальный частотно-амплитудный характер и трудно различимы на фоне комплексной по среднему значению и спектру нестационар-

ности наблюдаемых процессов загрязнения. Знание априорных вероятностей состояний динамического объекта контроля (процесса загрязнения) на заданных интервалах времени его наблюдения позволяет повысить точность (экстраполяции) локальных превышений норм предельно допустимых выбросов (ПДВ).

Для этого необходимо выделить в контролируемых нестационарных процессах загрязнения, неслучайные по частоте и случайные по амплитуде локальные тренды. Суммарная по частоте и по времени наблюдения дисперсия таких трендов является мерой неопределенности локальных кратковременных выбросов. Оценка такой дисперсии возможна, если известны вероятностные свойства контролируемых процессов по каждой из измеряемых компонент химического состава загрязнения.

Задачи оценивания вероятностных свойств нестационарных по ряду параметров случайных процессов загрязнения являются задачей проблематичной из-за наличия ряда неустраняемых и неконтролируемых факторных влияний. Однако, выявить в таких процессах закономерности и функциональные систематические тенденции вполне возможно, имея достаточно представительные выборки результатов измерений.

Существующие в настоящее время методы статистической обработки данных, распределенных во времени, особенно в задачах экологического мониторинга и качественных измерений базируется на теории статистического анализа временных рядов [1-4]. Эти методы закрепились нормативно в рамках государственных стандартов Украины [5] и используются не только для статистического контроля многомерных показателей качества, но и для регулирования технологических процессов, включая процедуры прогнозирования нарушений качества [6]. Однако, несмотря на разнообразие и математическую корректность существующих методов статистического анализа первичных данных при динамическом контроле процессов загрязнения

среды, остается нерешенным вопрос построения структурной модели контролируемых процессов, в которой раскрывалась бы полнота вероятностных свойств при минимальной неопределенности качественных изменений.

Цель статьи – показать возможности методов локализованного спектрального анализа (вейвлет-анализа) в задачах оценивания частотно-временных изменений в нестационарных процессах загрязнения атмосферы предприятиями с целью минимизации неопределенности при нарушении норм ПДВ.

Структурный анализ модели нестационарных возмущений. В ходе любого автоматизированного мониторинга выбросов вредных веществ в атмосферу информация о количественных значениях физико-химических показателей загрязнения – это дискретизированные во времени реализации случайных процессов. В силу ограниченности периодов наблюдения и конечности интервалов дискретизации, такие реализации удобно представлять статистическими моделями временных рядов с частотно-фазовой нестационарностью присутствующих в таких рядах низкочастотных и высокочастотных трендов [1]. Из-за наличия в таких реализациях локальных спектральных возмущений, вызывающих нарушения стабильности временного ряда и превышение нарушений норм предельно допустимых выбросов (ПДВ) имеет смысл использовать для анализа рядов локализованный спектральный анализ (вейвлет-анализ) [7].

Такой анализ, во-первых, позволяет выявить регулярные частотные и фазовые особенности конечных (суточных, недельных и т.п.) рядов наблюдений, во-вторых, дает возможность оценивания по дисперсии вейвлет-коэффициентов амплитудных скачкообразных изменений регулярных локальных трендов разных частот.

В конечном счете, задаваясь структурой модели нестационарности временного ряда (по среднему значению, дисперсии, спектру) можно оценить впоследствии априорные вероятности превышения норм ПДВ на локализованных интервалах времени в пределах нормативно заданных периодов наблюдения. Знание такой вероятности позволит не только адаптировать план контроля выбросов к реальным условиям протекания технологических процессов, но и даст возможность снизить вероятности ошибок контроля, особенно ошибки второго рода.

Для учета в структуре временного ряда $x(t)$ частотной (спектральной) и амплитудной (по математическому ожиданию) видов нестационарности, представим реализацию случайной

функции $X(t)$ выбросов по контролируемому показателю X моделью

$$x(t) = S(t, \omega(t)) + e(t, \lambda(t)) + \eta(t), \quad (1)$$

где $S(t, \omega(t))$ – систематическая трендовая составляющая $x(t)$, зависящая от времени t и вектора $\omega(t)$ частотных параметров; $e(t, \lambda(t))$ – систематическая трендовая составляющая реализации $x(t)$, зависящая от t и вектора $\lambda(t)$ амплитудных параметров; $\eta(t)$ – случайная, центрированная относительно $e(t, \lambda(t))$ составляющая реализации $x(t)$ и имеющая постоянные спектр и дисперсию.

Непрерывные вейвлет-преобразования реализации $x(t)$ позволяют выявить локальные частотно-временные возмущения составляющих $S(t, \omega(t))$ и $e(t, \lambda(t))$, и формально реализуются в виде стандартного вейвлет-коэффициента [7].

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2)$$

где a, b – параметры, независимые аргументы соответственно масштаба и сдвига; $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – базисная вейвлет-функция, отвечающая условиям ограниченности, локализации и нулевого среднего.

Перечисленные условия отвечают следующим свойствам базисной вейвлет-функции:

а) ограниченность $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty$; (3)

б) локализация $\begin{cases} |\psi(t)| \leq c(1+|t|^{-1-\varepsilon}); \\ |\psi(t)| \leq c(1+|\omega|^{-1-\varepsilon}), \end{cases}$ (4)

где ω – частота, $\varepsilon > 0$, $c = \text{const}$,

в) нулевое среднее $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$. (5)

Кроме условий (3) – (5) можно добавить условие постоянства плотности расположения базисных вейвлет-функций по оси времени t :

$$\frac{b}{a} = \text{const}. \quad (6)$$

Модель (1) вейвлет-преобразования формально непрерывна, однако при реальных вычислениях значения аргументов (параметров масштаба и сдвига) a и b задаются дискретно, что обеспечивает дискретизацию масштабнo-временной плоскости.

Поскольку выявление частотной составляющей $S(t, \omega(t))$ структурной модели (1) осуществляется при разных масштабах в соответ-

ствии с принципом взаимной обратной частоты ω и масштаба a , то выявление частотных трендов удобно проводить при фиксированном сдвиге b и разных масштабах, от минимального до максимального.

Выявление амплитудных изменений составляющей удобно осуществлять при фиксированном масштабе и разных сдвигах. В этом случае оценка дисперсии вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$, при $a = \text{const}$, и $b = \text{var}$ дает возможность выявить локальные тренды фиксированной частоты, но с максимальной вероятностью локальных всплесков, превышающих нормы ПДВ.

Экспериментальное оценивание параметров нестационарности

Для практического применения непрерывной модели (2) используем ее дискретный аналог [8].

$$W_{gK}(a_j, b_l) = \frac{a_j}{\sqrt{C_{gK} |a_j|}} \times \sum_{i=1}^N x^i \left[g_{K-1} \left[\frac{t_{i-1} - b_l}{a_j} \right] - g_{K-1} \left[\frac{t_i - b_l}{a_j} \right] \right], \quad (7)$$

где gK – гауссовский материнский вейвлет k -го порядка; C_{gK} – нормировочный множитель; x^i – реализация процесса $x(t)$ в момент времени t_i , $i = \overline{1, N}$.

В качестве исследуемых были использованы реализации (по $N = 6150$ значений) выбросов ТЭС в атмосферу следующих продуктов загрязнения: пыль, NO_x , SO_2 , CO , O_2 .

Общее время ТН наблюдения контролируемых процессов загрязнения – 22 дня, а интер-

вал дискретизации $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ являлся постоянным и составлял 5 минут.

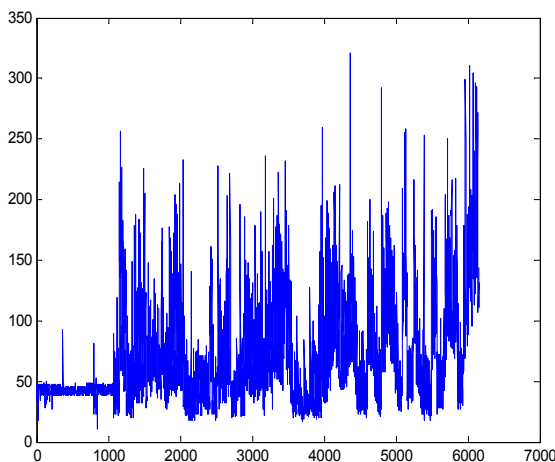
Все исходные первичные данные были получены с помощью информационно-измерительной системы централизованного контроля.

На рис. 1 (а – д) представлены реализации измеренных за время наблюдения физико-химических показателей загрязнения (выбросы ТЭС).

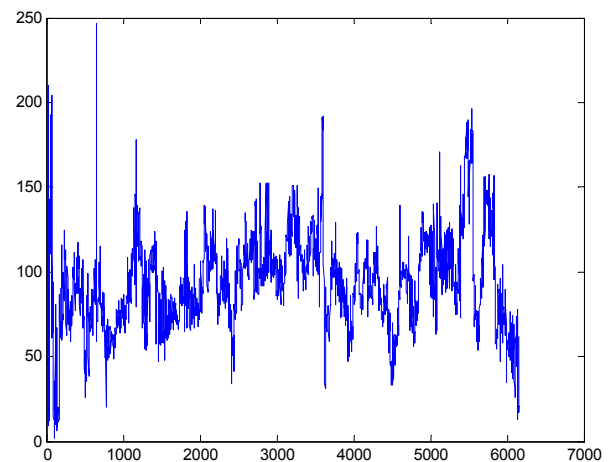
На рис. 1 (а – д) показано, что спектральный состав представленных процессов неодинаков и отражает две принципиально разные модели случайного изменения контролируемых величин во времени. Реализация «пыль» соответствует модели широкополосного мало связанного процесса, содержащего в своем спектре ограниченное количество низкочастотных трендов. Модель « NO_x » характеризует сильно связанный процесс, с преобладанием большого числа низкочастотных трендов.

Априорные вероятности экстремальных выбросов у модели «пыль» выше, чем у модели « NO_x ». Реализации рис. 1 (а, б) представлены на ограниченном интервале времени наблюдения и отличаются локальной спектральной нестационарностью. Особенно модель «пыль». Ограничение по времени наблюдения и наличие локальной нестационарности не позволяют применять для гармонического разложения преобразование Фурье. Более подходящими являются методы локализованного спектрального анализа (вейвлет-анализа).

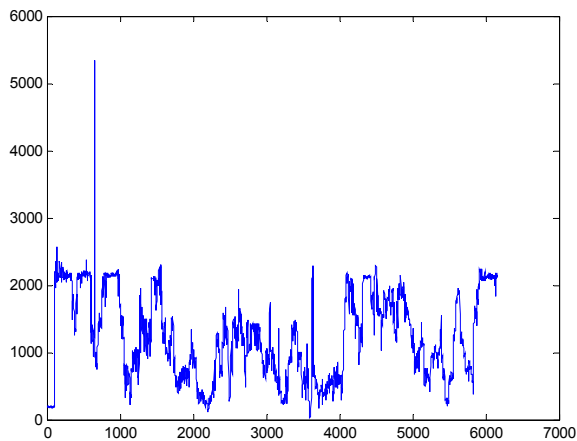
На рис. 2 (а – д) представлены трехмерные вейвлет-изображения процессов, показанных на рис 1.



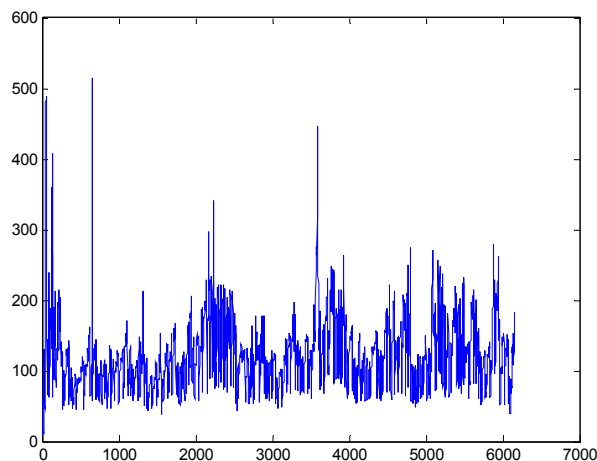
а) пыль



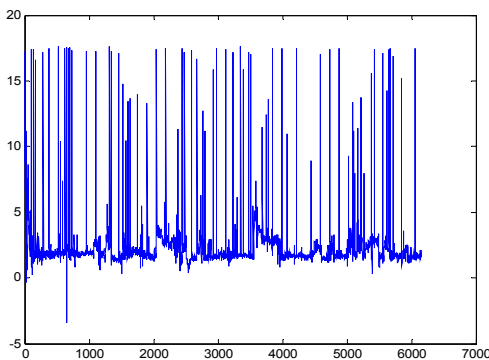
б) NO_x



в) SO₂



г) CO



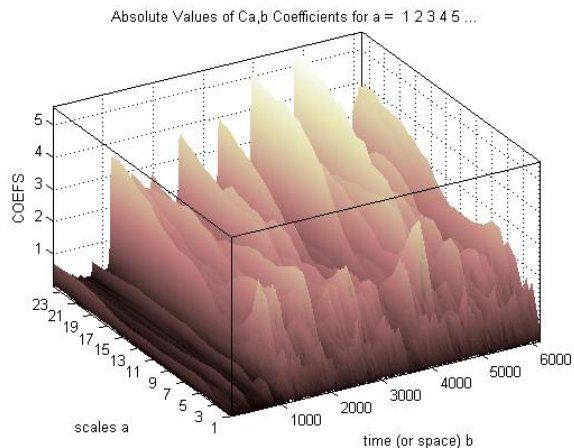
д) O₂

Рис. 1. Типичные реализации измеренных значений показателей загрязнений

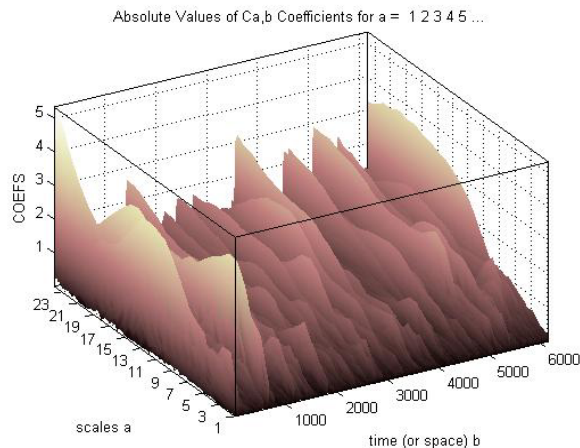
Вейвлет-изображения рисунка 2 получены для нормированных по среднему значению и дисперсии [9] процессов, которые представлены на рис. 1.

Такая нормировка устраняет различия в размерности сравниваемых процессов, обеспе-

чивая равенство их общих дисперсий. На этом фоне легко выявляются различия в дисперсиях, локализованных по масштабу (частоте), процессах. Сравнение трехмерных вейвлет-изображений рис. 2 (а – д) показывает следующее.



а) пыль



б) NO_x

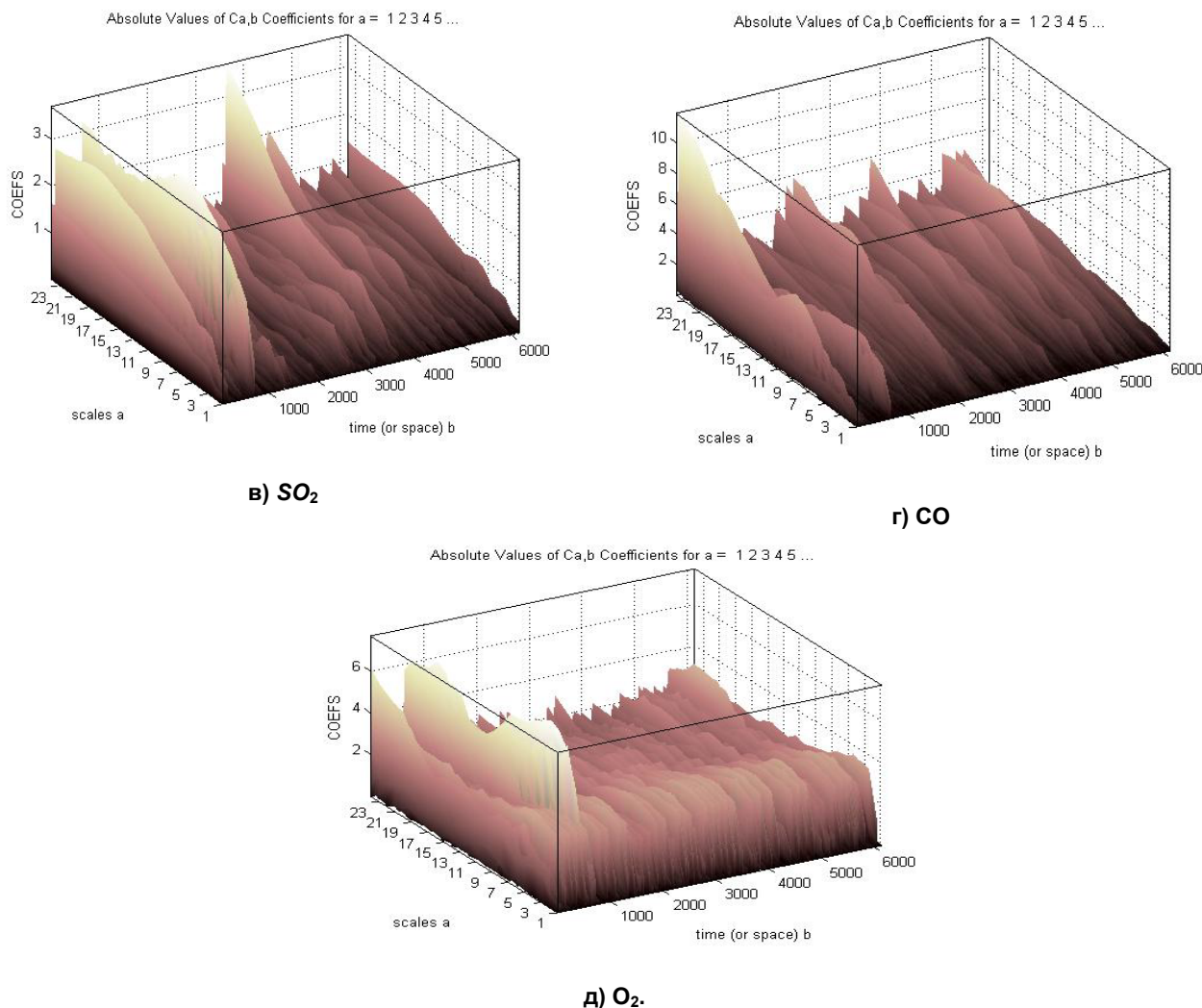


Рис. 2. Трехмерные вейвлет-изображения случайных процессов загрязнения

- Амплитудные значения выбросов увеличиваются с увеличением масштаба (более высокие амплитуды имеют более низкочастотные тренды).
- Наибольшая дисперсия выбросов, особенно для низкочастотных трендов (большой масштаб), характерна для показателя CO. Для этого же показателя характерен и максимальный относительный всплеск амплитуды.
- Стационарность дисперсии характерна только для показателя O₂ (вейвлет-коэффициенты не меняются при изменении масштаба). Для остальных показателей имеется нестационарность, не только по дисперсии, но также по спектру и по среднему значению (вейвлет-изображения ассиметричны по масштабу).
- Ассиметрия рисунков б), в), г) практически соразмерна при малых и больших масшта-

бах, что указывает на взаимную корреляцию показателей NO, SO₂ и CO.

- У показателя «пыль» ярко выражены всплески мощности для высокочастотных составляющих (большие изменения значений вейвлет-коэффициентов при малых масштабах).

Выводы

1. Вейвлет-анализ случайных последовательностей результатов измерения показателей контроля при экологическом мониторинге среды является удобным инструментом качественного сравнения локальных спектральных особенностей компонент состава загрязнения.

2. Вейвлет-изображение процессов загрязнения позволяет выявить моменты времени, для которых характерно одновременное появление низких и высоких частот для локальных трендов, что резко повышает вероятность пре-

вышения норм ПДВ. Изображение позволяет оценить и устойчивость в периодах следования таких превышений.

3. При использовании трехмерных вейвлет-изображений спектрально-нестационарных процессов следует учитывать наличие в таких изображениях краевых эффектов неопределенности [7,8]. Однако, для достаточно больших интервалов наблюдения такими эффектами можно пренебречь.

Список использованных источников

1. Малайчук В.П. Інформаційно-вимірвальні технології неруйнівного контролю: Навч. посіб. / В.П. Малайчук, О.В. Мозговой, О.М. Петренко – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2001. – 240 с.
2. Захожай В. Б. Статистика якості : Підруч. для студ. вищих навч. закл. / В. Б. Захожай, А. Ю. Чорний; Міжрегіональна академія управління персоналом. - К. : МАУП, 2005. - 576 с.
3. Kristensen K. Statistical Monitoring and Optimization in Total Quality Management / K. Kristensen // Statistical Process Monitoring and Optimization. – New York: Marcel Dekker Inc., 2000. – P. 19-34
4. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. / D.C. Montgomery– New York: John Willey&sons., 2001. – P. 796.
5. ДСТУ 3514-97 Статистичні методи контролю та регулювання. Терміни і визначення. – К.: Держстандарт України., 1997. – 52 с.
6. Єрина А. М. "Статистичне моделювання та прогнозування": Навч. посіб. / А.М. Єрина. - К.: КНЕУ, 2001. - 170 с.
7. Новиков Л.В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие./ Л.В. Новиков, 1999. –152 с.
8. G.Ososkov. Gaussian Wavelet Features and their Application for Analysis of Discretized Signals. / G.Ososkov, A.Shitov – Computer Physics Communication, Vol.126 (2000). – pp. 149-157.
9. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / под ред. В.С.Королюка – К.: Наукова думка., 1978. – 584 с.

Поступила в редакцию 18 апрель 2014 г.

УДК 658.562

Н.О. Любимова, канд. техн. наук

Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва,
в/о«Комуніст-1», Харківська обл., 62483.

Аналіз ефектів спектральної нестационарності в процесах забруднення повітряного середовища

Розглянуті математичні моделі вейвлет-перетворення дискретизованих процесів випадкової зміни параметрів екологічного контролю та моніторингу на прикладі викидів теплоелектростанції. Отримані тривимірні вейвлет-зображення процесів, що контролюються, для п'яти показників забруднення. Проаналізовані локальні спектральні особливості зображення з оцінкою гущини можливих перевищень норм гранично допустимих викидів. Бібл.9, рис. 2.

Ключові слова: екологічний моніторинг, викиди теплоелектростанції, контроль, аналіз.

UDC 658.562

N.A. Lyubymova, Ph.D.

Kharkov National Agrarian V.V. Dokuchaev University, Ukraine, Kharkov region, «Comunist-1», 62483.

Analyzing of transient effects in the processes of air pollution

Mathematical models of wavelet transforming of sampled processes of random changing o ecology control and monitoring on the example of power station emission is considered. 3-D wavelet representations of controlled processes for five indexes of pollution have been obtained. Local spectral singularities of representations with estimation the frequency of possible exceeding of maximum permissible emission are analyzed. References 9, Figures 2.

Keywords: *ecology monitoring, air pollution of power stations, control, analyze.*

References

1. *Malaychuc V.P. Malaychuc V.P., Mozgovoy O.V., Petrenko O.M.* (2001), "Information-measuring technology nondestroy control: study book", Dnepropetrovsk: PBB DNU, P. 240 (Ukr)
2. *Zahogay V. B., Zahogay V. B., Chorniy A. U.* (2005), "Statistic of quality: study book for university", Kyiv, MAUP, P. 576 (Ukr)
3. *Kristensen K.* (2000), "Statistical Monitoring and Optimization in Total Quality Management. Statistical Process Monitoring and Optimization, New York: Marcel Dekker Inc., P. 19-34
4. *Montgomery D.C.* (2001), "Introduction to Statistical Quality Control", New York, John Willey&sons, P. 796
5. DSTU 3514-97 (1997), "Statistic method of control and regulation. Termin and definicion", Kyiv, Dergstandart, P. 52 (Ukr)
6. *Erina A. M.* (2001), "Statistic model and prognoz: Study book", Kyiv, National Economic University, P. 170 (Ukr)
7. *Novicov L.V.* (1999), "Basis of wavelet-analys signal. Study book", P. 152 (Rus)
8. *Ososkov G.* (2000), "Gaussian Wavelet Features and their Application for Analysis of Discretized Signals", Computer Physics Communication, Vol.126, p. 149-157
9. *V.S.Koroluk* (1978), "Reference of theory probability and mathematic statistic", Kyiv, Naukova Dumka, P. 584 (Rus)