

УДК 621.316.7

А. В. ВОЛОШКО, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-3337-****
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ
Т.Е. ДЖЕРЯ, аспірантка, кафедра електропостачання, ІЕЕ,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ – ГРАФІКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ (ГЕН)

Метою роботи є формування моделі інформаційного потоку параметрів режиму електропостачання за допомогою адаптивного ортогонального перетворення – «вейвлет-аналізу» та визначення основних властивостей цього процесу. Виконано кратнo-масштабний аналіз. Виявлено переваги та ряд обмежень при застосуванні даної моделі для формування єдиного (узагальненого) інформаційного простору. Візуалізовано структурно-функціональну модель ГЕН, яка представляє собою ієрархічну структуру порівневих частотно-впорядкованих та взаємо-пов'язаних вейвлет-коефіцієнтів.

Ключові слова: графік електричного навантаження (ГЕН), інформаційний потік, «вейвлет-аналіз», кратнo-масштабним аналізом (КМА), сингулярність, порівнявє наближення.

Вступ.

За останнє десятиліття набула великої актуальності та популярності проблема забезпечення якості електричної енергії (ЯЕЕ) і, як результат, розв'язанню цього питанні приділяється багато уваги та коштів. Одним із шляхів вирішення такої задачі є ефективне управління режимами електроспоживання на промисловому підприємстві, яке забезпечується сучасною системою її моніторингу. Формування інформаційного потоку (вектору режимних параметрів) заданого об'єму та якості є необхідною основою побудови всього процесу моніторингу. При створенні такої системи в реальному часі потрібна наявність широкого набору певних інформаційних технологій, які, у свою чергу, будуть відкалібровані на параметри реальної системи електропостачання.

Постає питання про введення такого терміну, як інформаційний потік – це сукупність вимірних режимних змінних в певний проміжок часу. Також виникає необхідність обробки (також в реальному часі) значних об'ємів інформації різної якості та формування таких інформаційних потоків, які будуть гарантувати необхідну точність вирішення режимних задач.

Огляд наукових праць по темі дослідження.

Для того, щоб можливим було проведення аналізу інформаційних потоків, потрібно попередньо створити їх модель. Вихідними даними є результуючі вимірювання якісних і кількісних характеристик режиму електропостачання. Надалі можна буде інтерпретувати представлені дані, але тільки тоді, коли модель буде ідентифікована та формально описана.

Після проведення аналізу попередніх наукових праць був виявлений ряд недоліків. Причому ті, що характерні для формування моделі інформаційного потоку за допомогою перетворення Фур'є, присутні також (в тій чи іншій мірі) в ортогональних перетвореннях Уолша-Адамара (за допомогою функцій Радемахера, Хаара, Уолша [1]), Вінерівській фільтрації та перетворенні Гільберта [2]. Нижче наведено головні недоліки найпоширеніших та найвідоміших методів обробки сигналів, які і формулюють обмеження моделі

представлення сигналу:

1. Одним із обмежень апроксимуючих функцій f_i , $i = \overline{1, r}$ є необхідність їх ортогональності відносно проміжку часу t_i . Так як інформаційний сигнал ділиться на різномасштабні компоненти (тобто локальні особливості, які відрізняються відносними величинами і часовою тривалістю), найефективнішим способом їх представлення (на даний час) є використання методів апроксимації. Вони засновуються на розкладанні сигналу за тим чи іншим базисом: $f(t) = X_1 f_1(t) + X_2 f_2(t) + \dots + X_n f_n(t)$. А якщо коефіцієнти X_i корелюють між собою, то важко визначити, які саме апроксимуючі функції потрібно застосовувати: Уолша-Адамара, Радемахера, Хаара, Уолша, Вінерівську фільтрацію, перетворення Гільберта.

2. Неєфективним є також представлення сигналів із наявними особливостями на основі їх апроксимації лінійними фільтрами у випадку, коли завади у сигналі не завжди мають Гаусів закон розподілення і піки/злами інформаційної складової «згладжуються» при повторній обробці лінійним фільтром.

3. При усуненні вищезазначеного недоліку застосування лінійних фільтрів проводиться побудовою нелінійних адаптивних апроксимуючих систем на основі екстраполюючих фільтрів.

Проаналізувавши найпоширеніші та найвідоміші методи обробки сигналу, а також їх недоліки та обмеження можна скласти загальні вимоги до методу представлення сигналі (або його моделі), які мають фігурувати при подальшій розробці моделі інформаційного потоку:

- вибраний базис апроксимації сигналу має бути адаптованим до властивостей сигналу, а також мати змогу адаптуватися до нього в реальному часі;
- роздільність за частотою має бути такою, щоб збільшення масштабу призводило до звуження Фур'є-спектру базисної функції;
- роздільність у часі має бути такою, щоб при зміщенні базисної функції у часі забезпечувалась можливість аналізу властивостей сигналу в різних точках на досліджуваному проміжку;
- базисні функції – ортонормовані, а перетворення – ортогональне;
- побудована модель має включати в єдиний інформаційний простір всі етапи представлення інформації, а саме збір, обробку, зберігання та передачу. Це в подальшому буде сприяти побудові ефективної багаторівневої системи керування режимами системи електропостачання.

Формування моделі інформаційного потоку.

Після етапів аналізу наукових праць та синтезу обмежень до моделі інформаційного сигналу розглядається етап застосування методів ортогональних перетворень, які зараз розвиваються із величезною швидкістю. Не так давно, на початку дев'яностих років минулого століття широкого розповсюдження набуває термін «вейвлет-аналіз» - адаптивне ортогональне перетворення. В основу теорії вейвлет-перетворення покладено метод аналізу із різноманітним розділенням, який називається кратно-масштабний аналіз (multiresolution analysis) і забезпечує представлення сигналу $f(t)$ в базисі $\left\{ \psi_{a,b} = |a|^{-1/2} \psi((t-b)/a) \right\}_{a,b}$ з

коефіцієнтами розкладання $v(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle$, де $\langle f, \psi_{a,b} \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt \equiv \langle f, \psi_{a,b} \rangle$. У [3, 4] наведено основні формули та співвідношення, які використовуються для проведення вейвлет-аналізу.

Результат проведення вейвлет-аналізу в науковій літературі по іншому називається кратно-масштабним аналізом (КМА) - це послідовність замкнених підпросторів $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ із

$L^2(R)$, які утворюють кратно-масштабну апроксимацію, якщо задовольняються наступні шість властивостей [5]:

$$\forall (j, k) \in Z^2, \quad f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(t - 2^j k) \in V_j, \quad (1)$$

$$\forall j \in Z, \quad V_{j+1} \subset V_j, \quad (2)$$

$$\forall j \in Z \quad f(t) \in V_j \Leftrightarrow f\left(\frac{t}{2}\right) \in V_{j+1}, \quad (3)$$

$$\lim_{j \rightarrow +\infty} V_j = \bigcap_{j=-\infty}^{+\infty} V_j = \{0\}, \quad (4)$$

$$\lim_{j \rightarrow -\infty} V_j = \text{Замикання} \left(\bigcup_{j=-\infty}^{+\infty} V_j \right) = L^2(R). \quad (5)$$

Існує масштабна функція $\phi(t) \in V_0$ така, що множина її зрушень $\{\phi(t-k), k \text{ — ціле}\}$ складає базис V_0 . (6)

Аналіз вищезазначених властивостей дає такі результати:

- властивість (1) означає, що V_j інваріантне відносно зсуву, пропорційного масштабу 2^j . Цей простір являє собою рівномірну решітку з кроками 2^j , яка характеризує наближення сигналу з роздільністю 2^{-j} ;
- включення (2) – це причинна властивість, згідно якої наближення з роздільністю 2^{-j} містить всю необхідну інформацію для обчислення з грубою роздільністю 2^{-j-1} ;
- розтягнення функцій із V_j в два рази збільшує у два рази роздільність, і (3) гарантує, що це визначає апроксимацію з більш грубою роздільністю 2^{-j-1} ;
- коли роздільність 2^{-j} прямує до 0, то властивість (4) вказує, що усі деталі сигналу $f(t)$ загублені і його енергетична компактність $\lim_{j \rightarrow +\infty} \|P_{V_j} f\| = 0$;
- з іншого боку, коли роздільність 2^{-j} прямує до $+\infty$, властивість (5) відповідає тому, що апроксимація сигналу збігається до початкового вигляду сигналу, тобто $\lim_{j \rightarrow -\infty} \|f - P_{V_j} f\| = 0$;
- коли роздільність 2^{-j} зростає, швидкість убуття похибки апроксимації $\|f - P_{V_j} f\|$ залежить від гладкості сигналу $f(t)$ (дана похибка пов'язана з рівномірною гладкістю Ліпшиця f [6]).

Наближення f з роздільністю 2^{-j} визначається як ортогональна проекція $P_{V_j} f$ на V_j . Для того, щоб обчислити дану проекцію необхідно віднайти ортонормований базис V_j . Побудова ортогонального базису кожного простору V_j проводиться за допомогою розтягнення і зсуву однієї функції ϕ , яка називається масштабуючою функцією. Масштабуюча функція задовольняє ряду властивостей, які лежать в основі схем смугової фільтрації, стискання сигналів і зображень [115]:

$$\phi(t) = 2 \sum_k h_k \phi(2t - k), \quad \sum_k h_k = 1. \quad (7)$$

Співвідношення (7) представляє рівняння розтягування. Набір

$$\left\{ \phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) \right\}_{k=1,2,\dots} \quad (8)$$

являється базисом для множини V_j .

Крім масштабної функції в алгоритмах розкладання та реконструкції бере участь

вейвлет-функція $\psi(t)$ та базис $\{\psi_{j,k}(t)\}$ для W_j на її основі. Має місце також ортогональне розкладання (2.9), (2.10). Функції $\{\psi(t-k)\}_{k=1,2,\dots}$ являються базисом в W_0 , а $\{\psi_{j,k}(t), j, k - \text{цїлі}\}$ базисом в L^2 [48, 49]:

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j, \quad (9)$$

$$\bigcup \oplus W_j = L^2. \quad (10)$$

Вейвлет-функція $\psi(t)$ задовольняє співвідношенню (11), за структурою аналогічному (7):

$$\psi(t) = 2 \sum_k g_k \varphi(2t - k). \quad (11)$$

Підсумувавши вищенаведені вирази можна виділити основні властивості вейвлет-аналізу. Вейвлет-перетворення має розвинену структуру математичної формалізації і різноманітні форми вираження двох основних функцій (масштабної, або скейлінг-функції та вейвлет-функції), які визначають базис вейвлет-перетворення (ВП) і його види.

Побудова моделі інформаційного потоку системи електропостачання ґрунтується на головних властивостях ВП. За зручність обчислень вейвлет-коефіцієнтів розкладання, мінімальні розбіжності фільтрів аналізу та синтезу відповідає ортогональність (що суттєво зменшує об'єми обчислень). Нулеві моменти базисних функцій сприяють стисканню інформації при ВП [6]. Гладкість гарантує відсутність спотворень при ВП гладких сигналів, компактність забезпечує невелику довжину фільтрів, а симетрія забезпечує зберігання фазових співвідношень при реконструкції сигналу [6 - 8].

При тому, що зібрати всі властивості в одному ВП не представляється можливим, структура та особливості сигналу, що аналізується, потребує вибору між адекватністю базису та його властивостями. В [9] проведено систематизацію характеристик базисів ВП в плані класифікації типів базисів за 8-ма ознаками, які включають ортогональність, компактність носія, наявність симетрії, можливість задання бажаної кількості нульових моментів, повноту відновлення сигналу при зворотному ВП, регулярність, наявність КІХ-фільтрів (нерекурсивних) в алгоритмах аналізу та синтезу, а також наявність явних виразів функцій $\varphi(t)$ та $\psi(t)$, які утворюють базис (рис. 1.1).

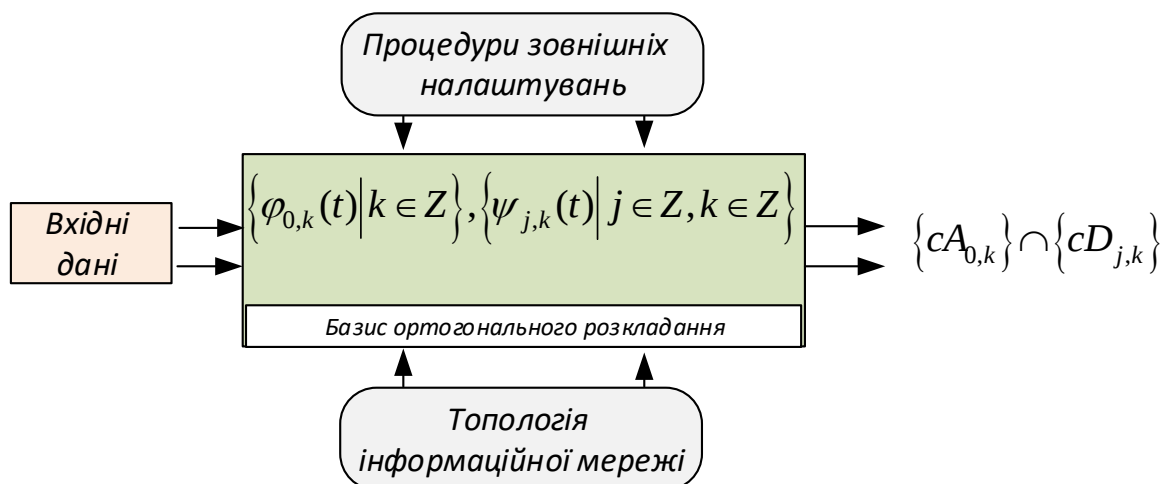


Рисунок 1.1 – Ортогонально-просторова та частотно-впорядкована модель інформаційного потоку

Вихідні значення (коефіцієнти) моделі $\{cA_{0,k}\} \cap \{cD_{j,k}\}$ - це коефіцієнти ортогонального розкладання вхідних даних за базисами

$\{\varphi_{0,k}(t) | k \in Z\}, \{\psi_{j,k}(t) | j \in Z, k \in Z\}$, причому $\{\psi_{j,k}(t) | j \in Z, k \in Z\}$ є базисом простору W_j , за допомогою якого задається рівень ортогонального розкладу інформаційного потоку.

Висновок.

Коефіцієнти моделі $\{cA_{0,k}\} \cap \{cD_{j,k}\}$ відображають інформацію на площині, при цьому розташовуючи її частотні компоненти на різних рівнях розподілення та одночасно показуючи час появи сингулярності в інформаційного потоку.

Наближення інформаційного потоку

$$f(t) = \sum_k cA_{0,k} \varphi_{0,k}(t) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_k cD_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (12)$$

відзначається властивостями часової та частотної локалізації:

- підсумовування членів розкладу по змінній k відповідає локалізації сингулярності у часовій області, оскільки припускає транслявання базисних функцій $\varphi_{0,0}(t)$ та $\psi_{j,0}(t)$ уздовж осі абсцис;

- підсумовування членів ряду розкладу по j припускає визначити спектральний склад інформаційного потоку, а також (12) представляє собою ортогональний розклад інформаційного потоку, характер якого визначається вибором базисних функцій $\varphi_{0,k}(t)$ та $\psi_{j,k}(t)$. При цьому, основною відмінністю даної моделі від моделі на базі Фур'є-перетворення є те, що побудова спектру Фур'є вхідної функції $f(t)$ припускає розклад даної функції у ряд на єдиному рівні, в той час як число рівнів розкладу по (12) визначається числом просторів W_j .

Однак існують деякі обмеження при застосуванні даної моделі для формування єдиного (узагальненого) інформаційного простору:

- в залежності від структури вхідного сигналу (частотний спектр, несинусоїдальність, наявність шумових компонент, спотворень його номінальних параметрів необхідно вибирати найкращий базис, адаптований до структури сигналу шляхом мінімізації похибки апроксимації в ньому;

- формування того чи іншого параметру інформаційного потоку залежить від частоти дискретизації вхідних даних, і, як наслідок, від рівня ортогонального розкладу;

- виходячи із властивостей ортогонального ВП число просторів розкладу (значення j) повинно обиратися виходячи із формули $j = \log_2 N$, де N – число дискретних значень вхідного сигналу;

- якщо кількість вхідних значень N не відповідає числу 2^J , то недостатня кількість значень сигналу добавляється нулями.

При формуванні моделі ГЕН ортогональне перетворення виконується до рівня $J = 5$ (через властивість ВП). Роздільність 2^J повинна бути кратною 2. Тому що почасовий ГЕН має 24 значення, для проведення вейвлет-аналізу дані значення доповнюються вісьмома нульовими значеннями. У кінцевому результаті маємо число значень ГЕН $N = 32$ і так як, $2^J = 32$, то із цього слідує $J = 5$. На рис.1.2 представлено структурно-функціональну модель ГЕН, яка представляє собою ієрархічну структуру порівневих частотно-впорядкованих та взаємопов'язаних вейвлет-коефіцієнтів.

Дана модель описується наступним чином

$$\{P[k]\}_{k=0}^{31} = \sum_{k=0}^{31} cA_5(k) + \sum_{j=1}^5 \sum_{k=0}^{31} cD_j(k), \quad (13)$$

де $\{P[k]\}_{k=0}^{31}$ – вихідні дані ГЕН (нульовий рівень вейвлет-декомпозиції), $\sum_{k=0}^{31} cA_5(k)$ –

апроксимуючі вейвлет-коефіцієнти останнього, п'ятого рівня вейвлет-декомпозиції, $\sum_{j=1}^5 \sum_{k=0}^{31} cD_j(k)$ – деталізуючі вейвлет-коефіцієнти з першого по п'ятий рівень вейвлет-декомпозиції.

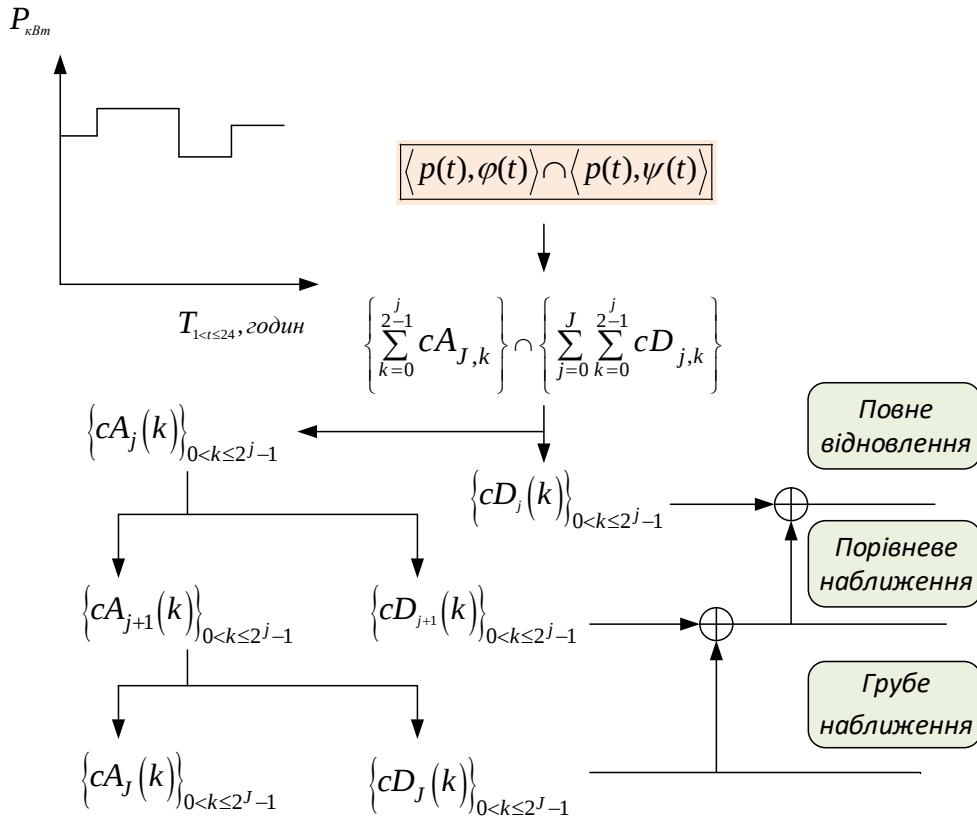


Рисунок 1.2 – Структурно-функціональна модель ГЕН

J – останній рівень вейвлет-декомпозиції ($J = 5$)

Аналізуючи рис. 1.2 та вираз (12) можна зазначити, що дана модель будується розкладанням сигналу на апроксимуючу частину $\{cA_j(k)\}$ та деталізуючі рівні $\sum_{j=1}^5 \sum_{k=0}^{31} cD_j(k)$, а відновлення вихідного сигналу може проводитись із необхідною точністю для аналізу моделі.

На п'ятий рівень моделі приходить найбільш груба апроксимація ГЕН $\{P_5(k)\} = \{cA_5(k)\} + \{cD_5(k)\}$. Підняття на один рівень моделі вгору приводить до уточнення вихідного сигналу і на останньому рівні – першому, повністю відновлюється вихідний сигнал $\{P(k)\} = \{cA_5(k)\} + \{cD_5(k)\} + \dots + \{cD_1(k)\}$.

Представлена розроблена модель дозволяє однозначно представляти ГЕН і, в залежності від поставленої задачі, відновлювати його з необхідною точністю (від 50 % до 100 %). Тобто, реалізується можливість з необхідною точністю наближувати найбільш важливі ділянки ГЕН (ділянки максимумів навантаження та його спаду, окремі ділянки ГЕН промислового підприємства для більш детального їх аналізу і т. д.). Також, така побудова інформаційної моделі ГЕН дозволяє суттєво (у десятки разів) стискати інформаційні потоки при електроспоживанні.

Література.

1. Залмазон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1989. – 496 с.

2. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов/Л. Рабинер, Б. Гоулд. М.: Мир. – 1978. – 848 с.
3. Праховник А.В. О построении информационной модели электропотребления/Вестник Киевск. Политехн. Ин – та. Горная электромеханика и автоматика. – 1976. – вып. 7. – С. 44 – 46.
4. Chow C.K. An Optimum Character Recognition System using Decision Functions/IRE Frans. On Electr. Comp. – EC-6. – 1957. – P. 247 – 254.
5. Akansu A. Multiresolution Signal Decomposition/A/ Akansu, R. Haddad//Academic Press. 1993. – 499 p.
6. Meyer Y. Wavelet and Operators/Cambridge Studies in Advanced Mathematics, 37. – 1992. – 240 p.
7. Coifman R.R. In Wavelets and their Applications/ R.R. Coifman, Y. Meyer//Digital and Signal Processing. 1992, V. 7, P. 153 – 178.
8. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
9. Davis G.M. Adaptive time-frequency decompositions/G.M. Davis, S. Mallat, Z. Zhang//SPIE J. of Opt. Engin. – 1994. - Vol. 33(7). – P. 2183 – 2191.
10. Aldroubi A. Families of multiresolution and wavelets spaces with optimal properties/A. Aldroubi, M. Unser//Numer. Functional Anal. and Optimization, 1993. V. 14. – P. 417 – 446.
11. Меркушева А.В. Классы преобразований нестационарного сигнала в информационно-измерительных системах. II. Время-частотные преобразования/Научное приборостроение, - 2002, - том 12, - №2, - С. 59 -70.

УДК 621.316.7

A.V. Voloshko

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

T.E. Dzheria

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

INFORMATION MODEL OF QUANTITATIVE PARAMETERS OF ELECTRICITY CONSUMPTION MODE - ELECTRIC LOAD GRAPHICS (ELG)

The aim of the work is to form a model of the information flow of power supply mode parameters by means of adaptive orthogonal transformation - "wavelet analysis" and to determine the main properties of this process. Multiple-scale analysis was performed. The advantages and a number of limitations in the application of this model for the formation of a single (generalized) information space are identified. The structural-functional model of ELG is visualized, which is a hierarchical structure of comparative frequency-ordered and interconnected wavelet coefficients.

Keywords: electric load graph (ELG), information flow, "wavelet analysis", multiple-scale analysis (MSA), singularity, comparative approximation.

References.

1. Zalmazon L.A. Fourier, Walsh, Haar transforms and their application in control, communication and other fields. - М.: Nauka.- math. lit., 1989. -- 496 p.
2. Rabiner L. Theory and application of digital signal processing / L. Rabiner, B. Gould, Moscow: Mir. - 1978. -- 848 p.
3. A. V. Prakhovnik On the construction of an information model of electricity consumption / Bulletin of the Kiev Polytechnic Institute. Mining electromechanics and automation. - 1976. - number 7. - S. 44 - 46.
4. Chow C.K. An Optimum Character Recognition System using Decision Functions/IRE

Frans. On Electr. Comp. – EC-6. – 1957. – P. 247 – 254.

5. Akansu A. Multiresolution Signal Decomposition/A/ Akansu, R. Haddad//Academic Press. 1993. – 499 p.

6. Meyer Y. Wavelet and Operators/Cambridge Studies in Advanced Mathematics, 37. – 1992. – 240 p.

7. Coifman R.R. In Wavelets and their Applications/ R.R. Coifman, Y. Meyer//Digital and Signal Processing. 1992, V. 7, P. 153 – 178.

8. Malla S. Wavelets in Signal Processing: Translated from English. - M.: Mir, 2005. -- 671 p.

9. Davis G.M. Adaptive time-frequency decompositions/G.M. Davis, S. Mallat, Z. Zhang//SPIE J. of Opt. Engin. – 1994. - Vol. 33(7). – P. 2183 – 2191.

10. Aldroubi A. Families of multiresolution and wavelets spaces with optimal properties/A. Aldroubi, M. Unser//Numer. Functional Anal. and Optimization, 1993. V. 14. – P. 417 – 446.

11. A.V. Merkusheva Classes of transformations of a non-stationary signal in information-measuring systems. II. Time-frequency transformations / Scientific instrument making, - 2002, - v. 12, - No. 2, - P. 59 -70.