

**ПРАЦІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
МОЛОДИХ ВЧЕНИХ ТА СПЕЦІАЛІСТІВ ІНСТИТУТУ**

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.068>

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДЕКОМПОЗИЦІЇ У КОРОТКОСТРОКОВОМУ
ПРОГНОЗУВАННІ СУМАРНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ**

І.В. Блінов*, докт. техн. наук, **В.В. Сичова****

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: blinovigor81@gmail.com, shorl@ukr.net

На основі виконаних досліджень удосконалено метод декомпозиції графіків сумарного електричного навантаження енергосистеми із застосуванням методу Гільберта-Хуанга. Наведений підхід дає змогу отримати однорідну базову складову електричного навантаження та температурну складову, яка має тісний кореляційний зв'язок із температурою повітря, що сприяє підвищенню точності короткострокового прогнозування. Наведено результати тестування розробленої математичної моделі. Бібл. 9, рисунок, таблиця.

Ключові слова: короткострокове прогнозування, електричне навантаження, декомпозиція, метод Гільберта-Хуанга.

Вступ. Перехід до нового ринку електроенергії (ринку двосторонніх договорів та балансуєчого ринку) [1, 2] вимагає уваги до завдання підвищення точності та стабільності результатів короткострокового прогнозування (КСП) сумарного електричного навантаження (СЕН) [3]. Його розв'язання можливе за допомогою побудови багатофакторної математичної моделі, у якій враховано структуру й характер електроспоживання, зважаючи на чинники впливу. Тому вдосконалення методів КСП СЕН дає змогу підвищити ефективність роботи учасників ринку [4] та операторів систем розподілу [5] в організованих сегментах ринку електричної енергії, а також оператора системи передачі під час організації роботи балансуєчого ринку електричної енергії України [6].

Мета статті. Опис удосконаленого методу декомпозиції графіків сумарного електричного навантаження з урахуванням чинників впливу на нього задля підвищення точності результатів короткострокового прогнозування (КСП) СЕН.

Опис моделі. Оскільки на значення СЕН впливає декілька різнорідних чинників: внутрішні (технологічні) й зовнішні (метеорологічні, астрономічні тощо), для визначення міри впливу того чи іншого чинника доцільно проводити декомпозицію графіків годинних перерізів СЕН і прогнозувати кожен складову окремо залежно від чинника впливу на неї.

У цій моделі для декомпозиції графіків СЕН на температурну й базову складові застосовано метод Гільберта-Хуанга [7]. Цей метод є перспективним для дослідження нелінійних та нестационарних процесів. Класичний алгоритм методу Гільберта-Хуанга виглядає так:

1. Пошук у кривій СЕН годинного перерізу $P(x)$ локальних екстремумів, групування окремо локальних мінімумів та максимумів СЕН.

2. Побудова оригінальних кривих шляхом інтерполяції кривих локальних мінімумів $ub(xb)$ та максимумів $ut(xt)$. Оскільки кількість точок в оригінальних кривих може суттєво відрізнятися, необхідно інтерполювати (за допомогою кубічних сплайнів) та екстраполювати (за допомогою методу Брауна першого порядку) їхні функції на всьому об'ємі вибірки $ub(x)$ та $ut(x)$ відповідно там, де x змінюється від 1 до n – об'єм вибірки.

3. Тоді перша складова m знаходиться як середнє значення між функціями $ub(x)$ та $ut(x)$ (1):

$$m_i = \frac{ub_i + ut_i}{2}. \quad (1)$$

4. Друга складова c_k (k – номер ітерації) є різницею між значеннями повного навантаження та першою складовою.

5. На наступних ітераціях $y(x)$ приймає значення m_{k-1} й алгоритм 1-4 продовжується доти, доки кількість локальних мінімумів або максимумів не буде меншою ніж 2.

Так, у роботі [8] описаний метод використано для попередньої обробки даних при однофакторному прогнозуванні із застосуванням нейронних мереж.

У розробленій моделі цей алгоритм адаптовано задля відповідності результатів декомпозиції реальному процесові впливу зміни температури на СЕН. Зокрема виконано такі зміни:

1. Під час розрахунків використовується лише оригінальна крива локальними мінімумами графіка СЕН, у такий спосіб здебільшого базова та температурна складові мають додатні значення, крім того, визначається межа «зони нечутливості» за температур, нижче якої температурна складова рівна нулю.

2. Після кожної ітерації виділені складові c_k додаються, й розраховується коефіцієнт кореляції між сумою виділених складових $\sum c_k$ та температурою повітря, він є додатковою умовою для зупинки циклу декомпозиції.

Задля прогнозування температурної складової використовується поліноміальна регресія з підбором оптимальних степеня та моделі (2):

$$P = \sum_{i=0}^m a_i t^i \quad (2)$$

де i змінюється від 0 до оптимального степеня m , а – коефіцієнти поліноміального рівняння.

Ці коефіцієнти визначаються в такій послідовності: за допомогою матричного методу формується система алгебраїчних рівнянь (3). Оскільки матриця вхідних параметрів (значень температури повітря) $t\{[1], [t_i], [t_i^2] \dots [t_i^m]\}$ найчастіше є прямокутною, варто застосувати матричні перетворення рівняння (3), тоді шукані коефіцієнти визначаються за рівнянням (4):

$$tA = P; \quad (3)$$

$$t^T tA = (t^T P) \quad (4)$$

Для підвищення універсальності методу розрахунку системи рівнянь (3), а саме уникнення випадків, коли матриця $t^T t$ не має оберненої, отримана система алгебраїчних рівнянь розв'язується за допомогою методу Гауса. Аналіз попередніх розрахунків показав, що достатнім є підбір степеня від 2 до 10. Водночас для кожного степеня відбувається вибір оптимальної моделі. Критерій мінімум середньої відносної похибки (MAPE) прийнято як цільова функція для вибору оптимальної моделі.

Оператором прогнозування базової складової СЕН використано метод канонічного розкладання випадкових процесів Пугачова [9]. Метод канонічного розкладання являє собою представлення функції $Pb(t)$ у вигляді:

$$Pb(t) = m_{Pb}(t) + \sum_v V_v \varphi_v(t) \quad (5)$$

де $m_{Pb}(t)$ – математичне очікування базової складової СЕН, V_v – деякі випадкові величини, математичне очікування яких рівне 0, $\varphi_v(t)$ – координатна функція, що розраховується за такою формулою:

$$\varphi_v(t) = \frac{1}{D_v} M(Pb(t)V_v) \quad (6)$$

де D_v – дисперсія масиву випадкових чисел; $Pb(t)$ – значення базової складової СЕН, центровані за середнім значенням (відхилення вихідної функції від середнього значення).

Масив випадкових чисел має задовольняти такі умови:

$$M[V_v] = 0; \quad M[V_v V_m] = 0 \quad (m \neq v) \quad (7)$$

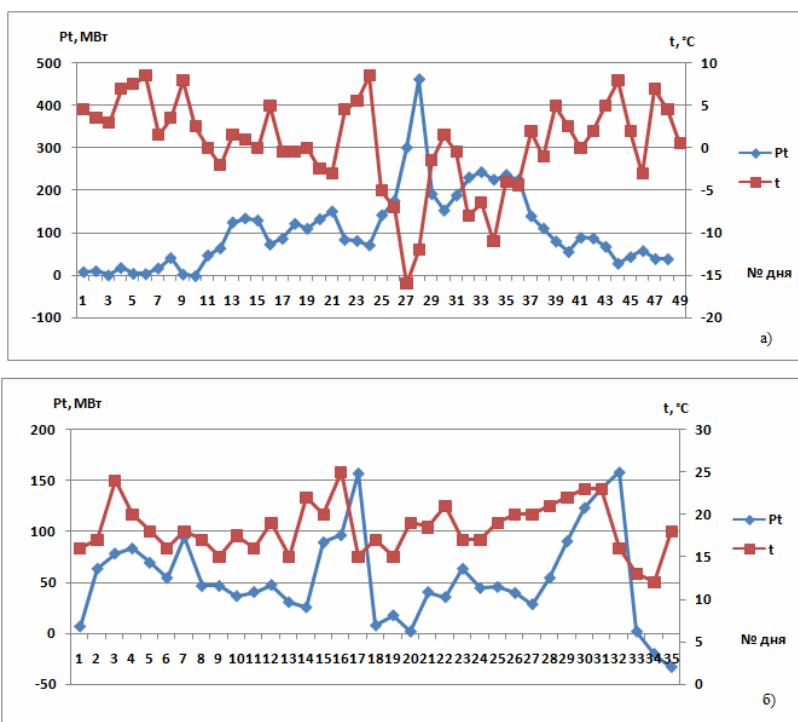
Випадкові числа були отримані за допомогою генератора білого шуму.
Прогнозування базової складової СЕН виконується за формулою:

$$Pb(t+1) = m_{pb}(t) + \varphi v(t)V_v \quad (8)$$

Синтез прогнозного графіка виконується як алгебраїчна сума температурної й базової складових у кожній годині добового графіка.

Аналіз результатів. Дослідження проведено за даними Київенерго за зимовий період з 01.11.2015 до 31.03.2016 та за літній період з 01.06.2015 до 31.08.2015. Обидві вибірки мають погодинну дискретність та містять виключно робочі дні з вівторка до четверга. Дані щодо температури повітря були отримані з відкритих джерел для міста Києва з дискретністю 3 години, тому для отримання погодинних значень було проведено інтерполяцію цих даних.

На рисунку зображено графіки температурної складової й температури повітря для 12-годинного перерізу обох вибірок, де чітко спостерігається обернений (для зимового) й прямий (для літнього періоду) кореляційний зв'язок. Тестування математичної моделі проводилося для декількох днів, для літнього періоду – на чотири дні, для зимового – на три дні. Для оцінювання похибки прогнозу використовується значення MAPE. Результати прогнозування наведені в таблиці.



Прогнозні дні	Літній період				Зимовий період		
	1	2	3	4	1	2	3
MAPE, %	1,95	1,46	1,65	1,89	1,98	1,88	3,15

Висновки. За результатами виконаних досліджень та виконання декомпозиції графіків СЕН (окремо для кожного зрізу) за допомогою методу Гільберта-Хуанга із запропонованими та внесеними змінами для розв'язання поставленого завдання отримано температурну складову, що має тісний кореляційний зв'язок із температурою повітря, що сприяє побудові більш точної регресійної залежності для її прогнозування. Використання запропонованого методу дає змогу забезпечити похибку результатів КСП СЕН у межах 1,5...3,15 %.

Фінансується за держбюджетною темою «Науково-технічні засади розвитку та керуваності сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генеруючих потужностей електроенергетичних систем» (шифр

«СЕКМЕНТ»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України, протокол №11 від 04.07.2017 р. Державний реєстраційний номер роботи 0117U007711. КПКВК 6541030.

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 №2019-VIII.
2. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>
3. Черненко П., Сичова В. Удосконалення алгоритму визначення впливу температури повітря на сумарне електричне навантаження енергосистеми для підвищення точності короткострокового прогнозування. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 2, С. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.02.077>
4. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Короткостроковий інтервальний прогноз сумарного відпуску електроенергії виробниками з відновлювальних джерел енергії. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2019. Вип. 54. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
5. Блінов І.В., Мірошник В.О., Шиманюк П.В. Оцінка вартості похибки прогнозу «на добу наперед» технологічних втрат в електричних мережах України. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С 70–73.
6. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Правил ринку» № 307 від 14.03.2018. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.05.070>
7. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. [The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis](#). *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1998. Vol. 454. Pp. 903–995. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
8. Курбацкий В. Г., Сидоров Д. Н., Спириев В. А., Томин Н. В. О нейросетевом подходе к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе преобразования Гильберта–Хуанга. *Автомат. и телемех.* 2011. Вып. 7. С. 58–68.
9. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического уравнения. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит. 1962. 883 с.

APPLICATION OF DECOMPOSITION METHODS IN SHORT-TERM FORECASTING OF OVERALL ELECTRIC LOAD OF ENERGY SYSTEM

I.V. Blinov, V.V. Sychova

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: blinovigor81@gmail.com , shorl@ukr.net

Based on the performed researches the method of decomposition of graphs of total electric loading of power system with application of a method of Hilbert-Huang is improved. This approach allows obtaining a homogeneous basic component of electrical load and temperature component, which has a close correlation with air temperature, which improves the accuracy of short-term forecasting. The results of testing the developed mathematical model are given. Ref. 9, figure, table.

Keywords: short-term forecasting, electric load, decomposition, Hilbert-Huang method.

1. On Electricity Market: The Law of Ukraine. No. 2019-VIII of 13.04.2017.
2. Ivanov H., Blinov I., Parus Y. Simulation Model of New Electricity Market in Ukraine. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764184>
3. Chernenko P., Sychova V. 2021. Improving the algorithm for determining the effect of air temperature on the overall electrical load of the power system to improve the accuracy of short-term forecasting. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 2. Pp. 77–83. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2021.02.077>
4. Blinov I.V., Miroshnyk V.O., Shymaniuk P.V. Short-term interval forecast of total electricity generation by renewable energy sources producers. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2019. Vol. 54. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.005>
5. Blinov I., Miroshnyk V., Shymaniuk P. The cost of error of "day ahead" forecast of technological losses of electrical energy. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 5. Pp. 70–73. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.05.070>
6. NEURC's Resolution On Approval of Market Rules. No. 307. 14. 03.2018.
7. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C., and Liu H. H. [The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis](#). *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1998. Vol. 454. Pp. 903–995. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>
8. Kurbatskyi V.H., Sydorov D.N., Spyrjaev V.A., Tomyn N.V. On a neural network approach to forecasting non-stationary time series based on the Hilbert-Huang transform. *Avtomat. and telemekh.* 2011. Vol. 7. Pp. 58–68. (Rus)
9. Puhachev V.S. The theory of random functions and its application to problems of automatic equations. Moskva: Hos. yzd-vo fiz.-mat. lyt., 1962. 883 p. (Rus)