

УДК 621.311.1:621.316.7:697.34:519.233

Євген Кауркін, <https://orcid.org/0000-0002-5878-128X>

Ігор Карпалюк*, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: humpway@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ СИНГУЛЯРНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ І ВЕЛИЧИНИ НАДСПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Анотація. Однією з проблем енергосистеми України є високий рівень втрат електричної енергії, що мають різні причини, однією з яких є зниження її якості. У статті розглядається надмірне навантаження ділянок мережі, що призводить до погіршення якості електроенергії. Досліджено причини виникнення надспоживання електричної енергії в умовах недостатнього теплопостачання та його вплив на режими роботи електричних мереж. Обґрунтовано взаємозв'язок між споживанням електричної і теплової енергії та необхідність аналізу їх часових залежностей для виявлення порушень режимів. Метою дослідження є розроблення методу виявлення режимів надспоживання електричної енергії, що виникають унаслідок недостатнього теплопостачання та призводять до погіршення показників якості електроенергії та зростання втрат. Методика реалізації – застосовано сингулярно-спектральний аналіз часових рядів електроспоживання та теплопостачання з використанням процедури виявлення структурних змін (розладнань) на основі аналізу спектра власних чисел і власних трійок. Дослідження виконано на реальних даних житлового масиву за річний період. За результатами дослідження встановлено залежність електроспоживання від температури зовнішнього середовища та обсягів теплопостачання; виділено структурні компоненти, що відповідають сезонним і експлуатаційним факторам; доведено можливість ідентифікації моментів надспоживання за аналізом залишкових складових часового ряду. Запропонований підхід дозволяє визначати параметри надспоживання електроенергії та оцінювати необхідний обсяг теплопостачання для його зменшення, що створює основу для підвищення якості електроенергії та зниження втрат.

Ключові слова: провали напруги, надспоживання, часові ряди, спектрально-сингулярний метод, тепла енергія, пов'язаність енергій.

1. Вступ

Однією з проблем енергосистеми України є високий рівень втрат електричної енергії. Вони мають різні причини, однією з яких є зниження якості електроенергії. Низькі показники її якості є індикатором низки негативних наслідків, зокрема: підвищення втрат електроенергії, скорочення строку служби електрообладнання та зростання кількості аварійних ситуацій.

Погіршення якості електричної енергії може виникати з різних причин і призводити до різних наслідків. Одним з найбільш поширених негативних явищ в енергосистемі України та однією з основних причин перебоїв у роботі обладнання, як зазначено в [1], є провали напруги (близько 31 % від їх загальної кількості).

Провали напруги впливають не лише на поширені електроприймачі, такі як асинхронні двигуни, але й на більш чутливе обладнання: персональні комп'ютери, інвертори, перетворювачі частоти, системи керування та автоматизації. Загалом чутливість електрообладнання до провалів напруги є високою.

Провали напруги у вузлах навантаження можуть призводити до порушення стійкості роботи як асинхронних, так і синхронних двигунів. Зокрема, при тривалих провалах напруги (тривалістю кілька секунд) і значному зниженні її рівня можливе гальмування («перекидання») асинхронних двигунів, а також випадання синхронних двигунів із синхронізму [2].

© Кауркін Є., Карпалюк І., 2026



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC0 1.0 Universal
<https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0>

Своєчасний моніторинг показників якості електричної енергії та впровадження технічних заходів з покращення її якості є актуальною задачею забезпечення безперебійності робочих процесів на виробничих підприємствах. Дослідниками були визначені причини провалів напруг, які можна згрупувати в наступний перелік: короткі замикання в мережах різних класів напруги; пускові струми великогабаритних асинхронних двигунів; комутаційні процеси силового електрообладнання; перемикання трансформаторів; надмірне навантаження ділянок мережі; зовнішні впливи.

Саме надмірне навантаження ділянок мережі виділимо окремо. Це створює серйозні проблеми, включаючи перегрів проводки, пошкодження ізоляції, короткі замикання та ризик пожеж, а також виведення з ладу електроприладів через стрибки та відхилення напруги.

Моніторинг таких режимів та їхня оцінка згідно зі стандартами IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Інститут інженерів з електротехніки та електроніки) та ІЕС (International Electrotechnical Commission, Міжнародна електротехнічна комісія) є ключовими для підвищення надійності та енергоефективності промислових підприємств.

2. Мета та завдання

Створення методу визначення режимів надмірного навантаження електричної мережі за допомогою статистичного методу, побудованого на сингулярно-спектральному аналізі даних споживання електричної енергії.

3. Матеріал і результати досліджень

На експериментальних даних було отримано залежність між електричною і тепловою енергією. Таку залежність пов'язаності теплової та електричної енергій було визначено Вороновським [3]. На відміну від нього було запропоновано концепцію взаємопов'язаності енергій, яка пояснює умови, за якими контроль споживання одного типу енергії дозволяє проводити контроль інших видів енергії споживача за якісними показниками [4]. Загальний принцип концепції наступний: розглядається певна кількість типів енергії із різними властивостями (технологічні особливості, одиниці вимірювання, параметри використання, вартість). Розглядається можливість перетворення інформації, неявно представленій у добових профілях електроспоживання, на інформацію про якість теплопостачання, оскільки недоотримане тепло споживачі можуть компенсувати електрообігрівом.

Така ситуація характерна для міст, у яких функціонує система центрального теплопостачання. За проектом електропостачання багатоквартирних житлових будинків питоме навантаження на одну квартиру визначається за нормативами [5] відповідно до рівня електрифікації (за наявності газових або електричних плит для приготування їжі). Наприклад, питома активна потужність для будинку на 200 квартир, обладнаному плитами для приготування їжі на природному газі, становитиме $\text{рқв.пит} = 1,47 \text{ кВт/житло}$. В такому разі використання електричного обігрівача потужністю 1,5 кВт призведе до повного використання запроєктованої електропотужності. Тобто споживання електроенергії на освітлення та побутові електроприлади перевищуватиме проєктний обсяг. Таке явище можна назвати надспоживанням, яке негативно впливає на електричну систему. Одним із наслідків надспоживання є перевантаження елементів мережі – силових трансформаторів, силових кабелів, комутуючих приладів, що призводить до збільшення падіння напруги, погіршення показників якості електроенергії. Таким чином, визначення появи надспоживання і його величини є актуальним завданням для електроенергетичної системи.

Знаходити режими надспоживання в електричній мережі пропонується шляхом одночасного моніторингу двох параметрів: обсягу спожитої електричної енергії та обсягу поставленої теплової енергії.

Параметри роботи технічних систем постійно змінюються в часі та можуть бути представлені у вигляді потоку даних або, мовою математики, часового ряду. Чим складніша технічна структура, тим більше параметрів потрібно контролювати для розуміння процесів. Аналіз поточкових даних технічної структури дозволяє зрозуміти походження того чи іншого стану технічної структури, а це зі свого

боку дозволяє створити стратегії управління для досягнення, наприклад, оптимальності або економічності.

Дані обсягів теплової та електричної енергії пропонується розглядати як часові ряди, обробка яких дає змогу виявляти ті чи інші події. Зокрема, під час обробки часових рядів здійснюється пошук розладок, що свідчать про надспоживання електроенергії.

Автори виділяють два класи «завдань про розладнання» [6].

Перший клас отримав назву «Завдання про якнайшвидше виявлення розладнання». Для такого класу завдань постановка задачі звучить так: «нехай послідовно в часі надходить інформація про випадковий процес, у певний момент часу відбувається зміна будь-якої ймовірнісної характеристики процесу». Завдання – якнайшвидше виявити зміну. Потрібно обмежити помилкові сигнали тривоги деякою величиною. Таке вирішення завдання не потребує зазначення точного моменту часу, коли відбулася «розладнання».

Другий клас отримав назву «Апостеріорне завдання про розладнання». Для такого класу завдань постановка задачі звучить так: «нехай пред'явлено реалізацію випадкового процесу. За умови, що вибірка не є статистично однорідною. У певний момент часу відбувається зміна будь-якої ймовірнісної характеристики процесу». Завдання – виявити момент часу зміни ймовірнісних характеристик і розбити вихідну вибірку на кілька статистично однорідних фрагментів. Така постановка завдання потребує якнайточніше оцінити момент виникнення «розладнання».

4. Опис математичного методу

Формальна постановка задачі виявлення «розладнання» буде описана в такому вигляді: нехай дана випадкова послідовність $x_1, x_2, \dots, x_N$, яка в певний момент часу t_0 стрибкоподібно змінює свої властивості. Ці властивості однозначно визначаються вектором параметрів θ . Це означає, що при $t \leq t_0 - 1$ вектор $\theta = \theta_1$, а при $t \geq t_0$ вектор $\theta = \theta_2$. Необхідно, спостерігаючи послідовність $x_1, x_2, \dots, x_N$, виявляти момент «розладнання» t_0 .

Обробку часових рядів проводимо методом сингулярно-спектрального аналізу [7, 8], який включає дві частини:

1. Розкладання;
2. Відновлення.

Розкладання включає етап вкладення (формування траєкторної матриці) і сингулярне розкладання (формування власних трійок і розкладання траєкторної матриці на суму елементарних матриць).

Відновлення включає групування (групування власних трійок, поділ адитивних компонентів ряду) і діагональне усереднення (формальна процедура перетворення матриць у часовий ряд).

Алгоритм методу SSA (Singular Spectrum Analysis, сингулярно-спектральний аналіз), описаний авторами [7, 8], виглядає наступним чином:

Є часовий ряд $X_N = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ довжини N , ($N > 2$).

Першим йде етап *Вкладення*, тобто формування траєкторної матриці. Основним кроком тут є вибір цілого числа L – довжини вікна, $2 \leq L \leq N - 1$. При виборі параметра L доцільно враховувати наступне: якщо довжина вікна буде обрана досить великою, всі вектори траєкторної матриці будуть містити істотну частину інформації про поведінку вихідного часового ряду.

Оскільки траєкторна матриця має властивість симетрії і сингулярні розкладання траєкторних матриць з довжиною вікна L та довжиною вікна $N - L + 1$ еквівалентні, то вибір величини L , що перевищує половину довжини часового ряду, не має сенсу. Таким чином, для формування траєкторної матриці доцільно вибрати довжину вікна, що приблизно дорівнює половині довжини ряду: $L \approx \frac{N}{2}$.

Після вибору параметра L , значеннями вихідного часового ряду послідовно заповнюються стовпці траєкторної матриці X^* . При цьому перший стовпець містить елементи ряду від x_0 до x_{L-1} , другий – від x_1 до x_L і так далі, поки ряд не буде вичерпаний.

Отже, перший етап полягає у формуванні з часового ряду X_N траєкторної матриці $X^*(L \times M)$, де $M = N - L + 1$, шляхом послідовного вибору з ряду X_N відрізків довжини L , тобто перетворення вихідного одновимірного ряду на послідовність L – мірних векторів, кількість яких дорівнює M , де $X_j^* = (x_{j-1}, \dots, x_{j+L-2})^T$, $1 \leq j \leq M$. Матриця X^* має вигляд:

$$X^* = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots & x_{M-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_M \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{M+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{L-1} & x_L & x_{L+1} & \dots & x_{L+M-2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Наступним етапом є сингулярне розкладання. Сингулярне розкладання матриці X^* проводиться за такою схемою:

Обчислюється матриця $R = X^*X^{*T}$. Знаходяться власні числа $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ матриці R . Всі власні числа розташовані в порядку, що не зростає: $(\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0)$. Знаходяться власні вектори $U_1, \dots, U_L$ матриці $R(L \times L)$, відповідні цим власним числам, $\{U_1, \dots, U_L\}$ – система ортонормованих власних векторів матриці R , вектори U_i – ліві сингулярні вектори.

Далі обчислюються $\sqrt{\lambda_i}$ – сингулярні числа і факторні вектори V_i :

$$V_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} X^{*T} U_i, i=1, \dots, d, \quad (2)$$

де $d = \max\{i, \lambda_i > 0\}$.

V_i – факторні вектори (праві сингулярні вектори).

Обчислюється вектор i -х головних компонент:

$$Z_i = \sqrt{\lambda_i} V_i = X^{*T} U_i, i=1, \dots, d. \quad (3)$$

В результаті вищевикладеного отримаємо сингулярне розкладання траєкторної матриці X^* :

$$X^* = X_1^* + \dots + X_i^* + \dots + X_d^*, i=1, \dots, d, \quad (4)$$

де $X_i^* = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$,

$$X^* = \sum_{i=1}^d \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T. \quad (5)$$

Для цього сингулярного розкладання набір $\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i$ – це i -та власна трійка сингулярного розкладання; матриці X_i^* – елементарні (мають ранг, що дорівнює 1).

Кожне власне число λ_i характеризує внесок матриці X_i^* у сингулярне розкладання.

Сингулярне розкладання можна інтерпретувати, за аналогією з методом головних компонентів у статистиці, як розкладання всіх стовпців матриці X^* за базисом з їх основних векторів.

На наступному етапі сингулярно-спектрального аналізу виконується групування компонентів розкладання, метою якого є поділ часового ряду на адитивні компоненти.

Процедура групування дозволяє розділити всі множини індексів $(i = 1, \dots, d)$ на m непересічних підмножин: $I_1, \dots, I_m$. Тобто проводиться процедура об'єднання індексів у групи, або поділ членів сингулярного розкладання на групи.

Кожній підмножині I_j відповідає результуюча матриця $X_{I_j}^*$, що визначається як сума матриць, які входять до цієї підмножини. Обчисливши результуючі матриці для кожної з m підмножин, можна

увести сингулярне розкладання матриці X^* у згрупованому вигляді як суму результуючих матриць кожної підмножини:

$$X^* = X_{I1}^* + X_{I2}^* \dots + X_{Im}^*. \quad (6)$$

У методі SSA етап групування складно повністю формалізувати. Ця процедура ґрунтується на аналізі власних чисел λ_i , а також векторів U_i і V_i – лівих та правих сингулярних векторів у сингулярному розкладанні. Оскільки кожна матрична компонента сингулярного розкладання повністю визначається відповідною сингулярною трійкою $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$, йдеться про групування власних трійок. Аналізуючи форму сингулярних векторів однієї із власних трійок, можна передбачити поведінку відповідної компоненти ряду, відновленої за допомогою цієї трійки, оскільки відновлена компонента матиме схожу форму. Чим більше сингулярне число у власній трійці, тим більше внесок компоненти ряду, відновленої за цією власною трійкою.

Щоб виокремити тренд із часового ряду, необхідно згрупувати всі власні трійки з сингулярними векторами, що повільно змінюються; при цьому, якщо ряд має яскраво виражену тенденцію, то власні трійки, відповідні тренду, матимуть перші позиції у сингулярному розкладанні траєкторної матриці [9].

Принцип групування для ідентифікації шуму може полягати у віднесенні до окремої групи власних трійок, що не містять ані трендової, ані коливальної складових. Додатковою ознакою для виявлення шумових компонентів є різкий спад власних чисел: у такому випадку інформативній складовій сигналу відповідають більші власні числа, тоді як шумовій – менші.

Останнім етапом методу SSA є діагональне усереднення. На цьому етапі проводиться відновлення рядів $X_N^{(j)}$ за згрупованими матрицями X_{Ij}^* , тобто кожна матриця X_{Ij}^* переводиться в новий ряд довжини N .

Оскільки передбачається, що кожна матриця X_{Ij}^* є траєкторною матрицею деякого часового ряду, побічні діагоналі таких матриць мають складатися з однакових елементів. Однак на практиці це трапляється не завжди. Тому виникає необхідність застосування процедури, яка формально перетворює довільну матрицю X_{Ij}^* у ганкелеву, що містить однакові елементи на побічних діагоналях. Для такого перетворення використовується діагональне усереднення, за допомогою якого значення ряду $X_N^{(j)}$ визначаються як середні значення елементів матриці X_{Ij}^* вздовж відповідних побічних діагоналей.

Принцип діагонального усереднення викладено у [10–13]. Діагональне усереднення для довільної матриці X^* розмірністю $(L \times M)$ (при $L < M$) виконується за формулою:

$$x_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} x_{i,k-i+2} & \text{для } 0 \leq k \leq L-1, \\ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_{i,k-i+2} & \text{для } L-1 \leq k \leq M, \\ \frac{1}{N-k} \sum_{i=k-M+2}^{N-M+1} x_{i,k-i+2} & \text{для } M \leq k \leq N. \end{cases}, \quad (7)$$

де x_k – елементи ряду $X_N = (x_0, \dots, x_{N-1})$, $N = L + K - 1$ – довжина ряду, x_{ij} – елементи матриці X^* , $(j = k - i + 2)$.

Отже, діагональне усереднення перекладає матрицю X^* в ряд $X_N = (x_0, \dots, x_{N-1})$ за формулою (7).

В результаті застосування методу сингулярно-спектрального аналізу вихідний ряд $X_N = (x_0, \dots, x_{N-1})$ розкладається на суму m рядів $X_N^{(j)}$, тобто можна досягти розбиття часового ряду на адитивні складові.

Наступне питання, яке може виникнути під час аналізу часових рядів, стосується інтерпретації відновлених компонентів і належить до предметної галузі дослідження, що проводиться.

Перевагами описаного методу є відсутність необхідності апріорного завдання моделі ряду, а також можливість роботи з модульованими гармоніками (на відміну від методів, що використовують перетворення Фур'є).

5. Методика застосування сингулярного розкладання для виявлення та аналізу структурних змін часових рядів

Пропонується методика діагностики структурних змін часового ряду, для виявлення яких розглядається часовий ряд $X_N = \{x_0, \dots, x_t, \dots, x_{N-1}\}$ фіксованої довжини N , ($N > 2$). Обирається довжина діапазону перегляду досліджуваного часового ряду – параметр D , ($D < N$). Вибір діапазону здійснюється на основі попереднього аналізу часового ряду або використання апріорної інформації про структурні складові ряду.

Спочатку межі діапазону перегляду встановлюються таким чином: $t \in [0; D - 1]$. Після чого за алгоритмом методу сингулярно-спектрального аналізу проводиться сингулярне розкладання фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду, та аналізується отриманий в результаті розкладання набір власних трійок.

Далі проводиться поетапне зміщення діапазону перегляду з кроком один елемент часового ряду.

На кожному наступному етапі межі діапазону перегляду зміщуються праворуч на один елемент часового ряду наступним чином: спочатку $t \in [0; D - 1]$, при першому зміщенні $t \in [1; D]$, при i -м зміщенні $t \in [i; D + i - 1]$ (рис. 1). На кожному етапі проводиться сингулярно-спектральний аналіз фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду.

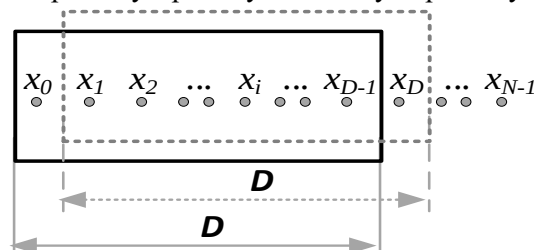


Рисунок 1. Зміщення меж діапазону перегляду

Оскільки кожна власна трійка однозначно визначає компонент розкладання, то аналіз змін у структурі власних трійок сингулярного розкладання фрагмента ряду всередині діапазону перегляду при його зміщенні дає можливість виявити структурні зміни часового ряду. Поява нових власних трійок свідчить про те, що у часовому ряді з'явилися нові структурні складові. Слід враховувати, що кожна гармонічна компонента породжує дві власні трійки з близькими сингулярними числами, тому про появу нової гармонічної складової у структурі ряду свідчить нова пара власних трійок у сингулярно-спектральному розкладанні чергового фрагмента ряду всередині діапазону перегляду.

Зникнення власних трійок у сингулярно-спектральному розкладанні при зміщенні меж діапазону перегляду свідчить про те, що відповідні структурні компоненти більше не присутні у часовому ряді.

Збільшення або зменшення значень сингулярних чисел у власних трійках свідчить про зміну значущості відповідних компонент розкладання. Якщо йдеться про гармонічні структурні складові часового ряду, то зміна значень сингулярних чисел може свідчити про зміну амплітуди коливань (про посилення або зменшення впливу фактора, що зумовлює появу компоненти у структурі часового ряду).

Власні (сингулярні) трійки $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$ сингулярного розкладання при сингулярно-спектральному аналізі складаються з $\sqrt{\lambda_i}$ – сингулярних чисел, U_i – лівих сингулярних векторів та V_i – факторних векторів (правих сингулярних векторів), де λ_i – власні числа матриці $R = X \cdot X^*T$. Тому замість аналізу сингулярних чисел можна аналізувати набір власних чисел коваріаційної матриці $R = X \cdot X^*T$. Зміна спектра матриці R при черговому зміщенні діапазону перегляду дає підстави припускати, що в цей момент мають місце структурні зміни в часовому ряді $X_N = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$.

Аналіз структурних змін часового ряду за запропонованою методикою можна умовно поділити на три етапи:

1. Експрес-аналіз (аналізується лише динаміка значень власних чисел коваріаційної матриці під час руху діапазону перегляду).
2. Детальний аналіз (враховуються зміни у власних трійках під час руху діапазону перегляду).
3. Додатковий аналіз (аналізується ряд залишків після отримання певних значущих структурних складових часового ряду).

6. Аналіз даних району великого міста України

Для обробки було використано реальні дані постачання теплової енергії та споживання електричної енергії житловим масивом великого міста України. Розглядався інтервал тривалістю один астрономічний рік (365 днів).

Метою аналізу було виявлення відхилень у споживанні електричної енергії, які у взаємозв'язку з параметрами теплопостачання можуть свідчити про режим надспоживання електричної енергії споживачами.

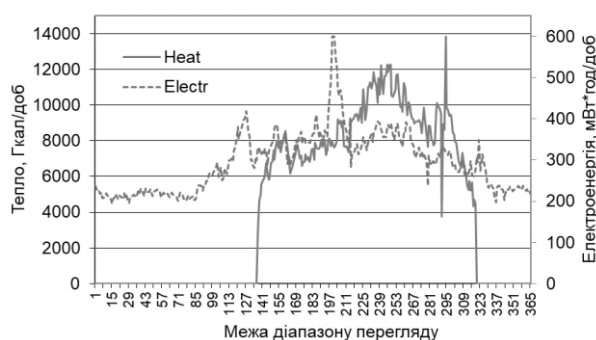


Рисунок 2. Споживання електроенергії і добовий відпуск тепла

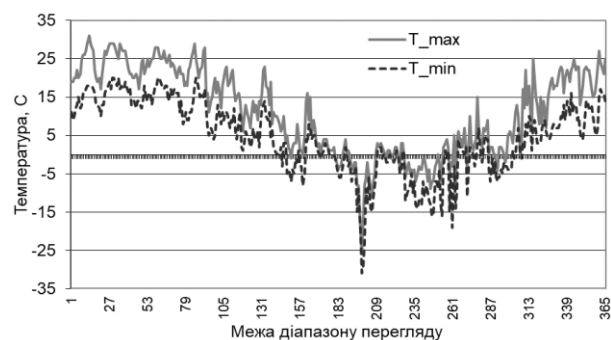


Рисунок 3. Температура повітря

Результати експрес-аналізу.

Дослідження проводились при діапазоні перегляду $D=60$ (два місяці), довжині вікна $L=30$ (один місяць) (довжина ряду $N=365$) (Метод сингулярно-спектрального аналізу був застосований без центрування та нормування). Динаміка значень власних чисел представлена на рис. 4, 5.



Рисунок 4. Динаміка власних чисел 1-ї власної трійки



Рисунок 5. Динаміка власних чисел 2-ї та 3-ї власних трійок

Проведений експрес-аналіз дає змогу виявляти точки та інтервали структурних змін часового ряду, а також свідчить, що на формування ряду даних споживання електричної енергії побутовими споживачами у літній період впливає переважно один фактор, тоді як у період опалювального сезону – інші фактори, причому за умов суттєвого зниження зовнішньої температури їхній вплив є значним.

Результат детального аналізу.

Із часового ряду споживання електроенергії виділено першу структурну компоненту, яка характеризується найбільшою часткою значущості та відповідає першій власній трійці (і, відповідно, найбільшому власному числу). Її графічне подання наведено на рис. 6.

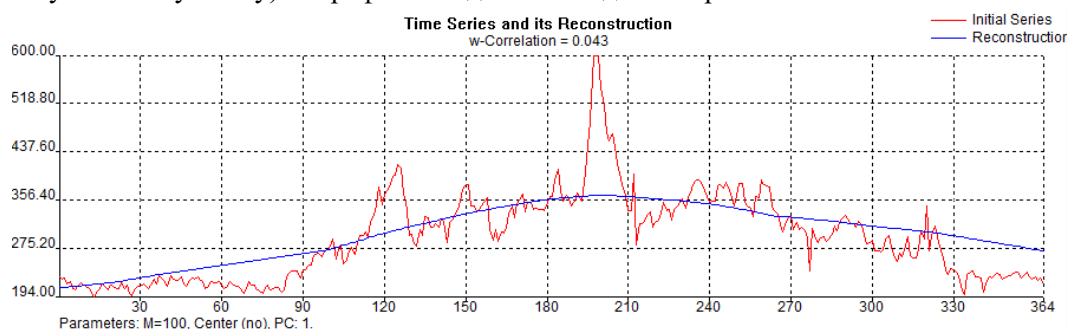


Рисунок 6. Вилучення з низки даних споживання електроенергії структурних компонентів, перша компонента (97,724 %)

Порівняння отриманих результатів (рис. 6) з графіком кривої річного споживання електроенергії дає підстави стверджувати, що виділена перша структурна компонента формується до настання опалювального сезону та узгоджується з відповідною динамікою річного споживання. Отже, перша структурна компонента визначається впливом фактора «довжина світлового дня», відтворює характер річної кривої електроспоживання побутових споживачів і не враховує складову, пов'язану з використанням електроенергії для обігріву електронагрівальними приладами. Таким чином, першу структурну компоненту інтерпретовано.

Результат додаткового аналізу.

Для підвищення точності діагностики моментів структурної «розладки» часового ряду споживання електроенергії виконують додатковий етап аналізу. З цією метою досліджують ряд залишків, сформований після вилучення компоненти (або групи компонент) з найбільшою значущістю. У межах даного експерименту виконується аналіз залишкового ряду, отриманий після виключення першої головної компоненти. Такий підхід забезпечує отримання додаткової інформації щодо часової локалізації структурних змін у споживанні електроенергії побутовими споживачами.

На рис. 7 наведено інтервал 107–137, який не охоплює опалювальний період. У межах цього відрізка простежується залежність обсягів споживання електричної енергії від температури повітря. Зокрема, на інтервалі 117–130 зі зниженням температури спостерігається відповідне зростання електроспоживання.

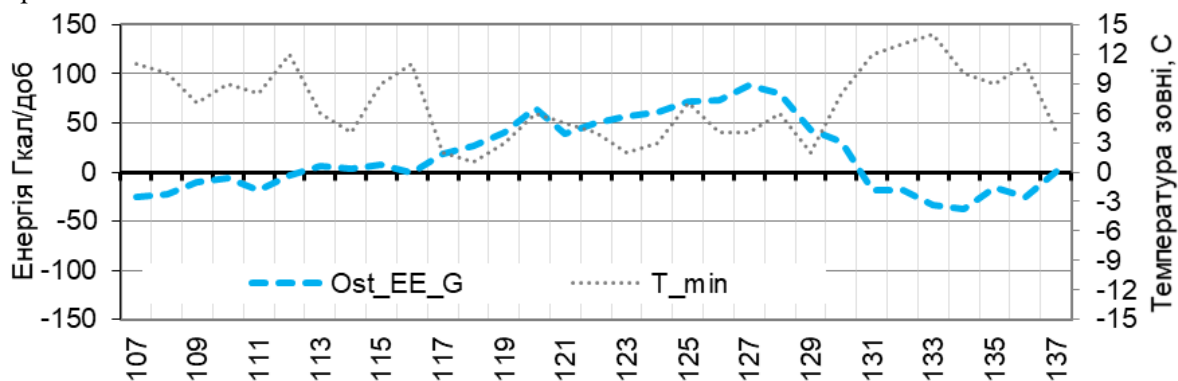


Рисунок 7. Залишки ряду споживання електричної енергії і зовнішня температура (до початку опалювального сезону)

На рис. 8 представлено інтервал 193–213, який відповідає опалювальному сезону. На рисунку 8 Ost_EE_G – ряд залишків споживання електричної енергії в перерахунку розмірності на Гкал, Ost_Heat/10 – ряд залишків поданої теплової енергії зменшений в 10 разів для збереження наочності змін порівняно із обсягами електричної енергії, T_min – мінімальна температура навколишнього повітря.

У межах відрізка 196–209 фіксується різке зниження температури, що супроводжується зростанням залишкової складової ряду споживання електроенергії. Водночас збільшення обсягів подачі теплової енергії спостерігається лише в точці 204, що призвело до відповідного зменшення споживання електричної енергії.

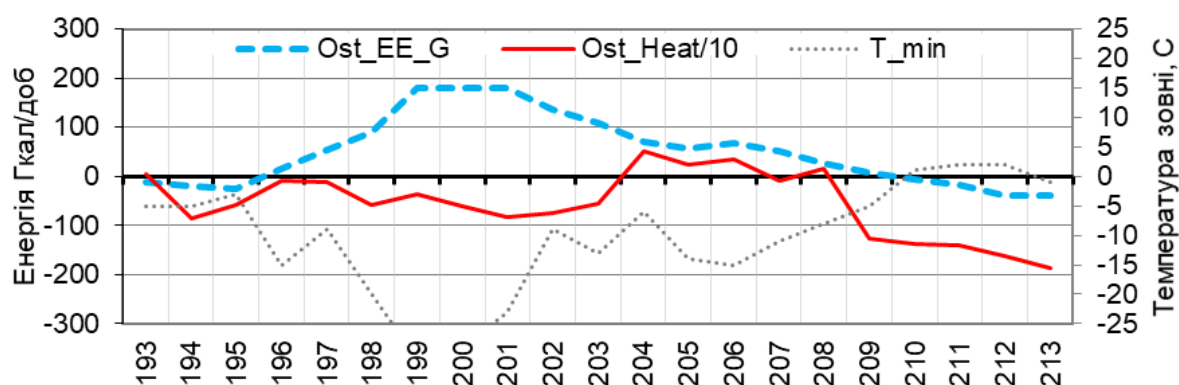


Рисунок 8. Фрагмент ряду залишків споживання електроенергії (під час опалювального періоду)

На прикладах, наведених на рисунках 7 і 8, показано аналіз залишків часового ряду споживання електричної енергії у поєднанні з даними щодо обсягів теплової енергії та зовнішньої температури. Такий підхід дає змогу фіксувати моменти структурних змін у часовому ряді. У результаті виявлено «розладки», зумовлені впливом зовнішньої температури, якістю теплопостачання, а також міжсезонними змінами режимів споживання.

7. Висновки

На основі отриманих результатів аналізу можна оцінити необхідний обсяг теплової енергії, достатній для зниження рівня «надспоживання» електричної енергії. Динаміка надспоживання електроенергії та зміни її якісних показників дають змогу ідентифікувати момент початку додаткової подачі енергії в мережу. Величина додаткового теплового потоку визначається за абсолютними значеннями залишків часового ряду споживання електричної енергії. Різниця між обсягом теплової енергії, поданої в мережу, і величиною надспоживання електроенергії відповідає мінімально необхідному додатковому обсягу теплової енергії, який забезпечує умови, за яких споживач не переходить у режим підвищеного електроспоживання.

Застосування запропонованого підходу забезпечує не лише виявлення та діагностику структурних змін у часовому ряді електроспоживання, а й дозволяє трансформувати дані про обсяги споживаної електроенергії в індикатори якості теплопостачання. Це створює передумови для розроблення комп'ютерної системи моніторингу та керування якістю електропостачання через пов'язаність енергій.

Оскільки запропонований метод дозволяє визначити параметри надспоживання електричної енергії та, відповідно, прийняти заходи щодо його зменшення, що сприятиме не тільки покращенню якості електричної енергії, а й скороченню її втрат, дослідження доцільно продовжувати.

Посилання

1. Волошко А.В., Шевчук В.В. Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 4. С. 145–149. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>
2. Варецький Ю.О., Пукальський А.М. Аналіз впливу провалів напруги на систему електроспоживання. *Вісник Національного ун-ту «Львівська політехніка»*. Серія: Електротехніка та комп'ютерні технології. 2006. № 562. С. 14–22.
3. Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. Харьков: Изд-во «Харьков», 2002. 240 с.
4. Гриб О.Г., Карпалюк І.Т., Швець С.В., Лука О.В., Кауркін Є.О. Якість електричної енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2022. № 2. С. 60–65. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.10>
5. ДБН В. 2.5-23-2003 Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення.
6. Іванов І.І. Теорія системного аналізу та діагностики: підручник. Київ: Вища школа, 2018. 320 с.
7. Yiou P., Sornette D., Ghil M. Data-Adaptive Wavelets and Multi-Scale Singular-Spectrum Analysis. *Physica D*. 2000. Vol. 142. Iss. 3-4. P. 254–290. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00045-2)
8. Baratta D., Cicioni G., Masulli F., Studer L. Application of an ensemble technique based on singular spectrum analysis to daily rainfall forecasting. *Neural Networks*. 2003. Vol. 16. P. 375–387. URL: <https://person.dibris.unige.it/masulli-francesco/VALUTAZIONI-COMPARATIVE/papers/R-masulli-nn03-baratta.pdf> (Last accessed: 10.03.2026).
9. Ruusunen M., Paavola M. Quality Monitoring and Fault Detection in an Automated Manufacturing System – a Soft Computing Approach: Report A No 19. Control Engineering Laboratory, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finland, 2002. 38 p.
10. Білобородько О.І., Ємел'яненко Т.Г. Аналіз динамічних рядів: навч. посіб. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2014. 80 с.
11. Земледух В.А. Компонентне прогнозування навантаження у багатокористувацьких комп'ютерних мережах: квал. робота магістра. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2025. 101 с.
12. Гардер С.Є., Корніль Т.Л., Решетнікова С.М., Сердюк І.В. Сингулярний спектральний аналіз температурного багатовимірного часового ряду. *Вісник Національного технічного ун-ту «ХПІ»*. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. 2024. № 1. С. 37–45. [https://doi.org/10.20998/2222-0631.2024.01\(6\).05](https://doi.org/10.20998/2222-0631.2024.01(6).05)
13. Гаврилюк О.П. Система прогнозування і аналізу сезонних часових рядів у задачах енергетики: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2020. 150 с.

References

1. Voloshko, A.V., & Shevchuk, V.V. (2023). Identification and classification of single-phase voltage dips using the methodology of the spatial vector of angular frequency. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*, 4, 145–149 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2023.290944>
2. Varetskyi, Yu.O., & Pukalskyi, A.M. (2006). Analiz vplyvu provaliv napruhy na systemu elektrosposhyvannia. *Visnyk Nats. un-tu «Lviv. politekhnika»*. Ser.: Elektrotekhnika ta kompiuterni tekhnolohii, 562, 14–22.
3. Voronovskyi, H.K. (2002). *Usovershenstvovanye praktyky operatyvnoho upravleniya krupnyu teplofykatsyonnyu systematy v novykh ekonomicheskyykh usloviyakh*. Kharkov: Yzd-vo "Kharkov".
4. Grub, O., Krapalyuk, I., Shvets, S., Luka, O., & Kaurkin, Y. (2022). Relationship between coronal discharge and harmonious component and their influence on electricity quality indicators. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, 2, 60–65 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.10>
5. DBN V. 2.5-23-2003 Proektuvannia elektroobladnannia ob'ektiv tsyvilnoho pryznachennia.
6. Ivanov, I.I. (2018). *Teoriia systemnoho analizu ta diahnostryky*: pidruchnyk. Kyiv: Vyscha shkola.
7. Yiou, P., Sornette, D., & Ghil, M. (2000). Data-Adaptive Wavelets and Multi-Scale Singular-Spectrum Analysis. *Physica D*, 142(3-4), 254–290. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(00)00045-2)
8. Baratta, D., Cicioni, G., Masulli, F., & Studer, L. (2003). Application of an ensemble technique based on singular spectrum analysis to daily rainfall forecasting. *Neural Networks*, 16, 375–387. Retrieved March 10, 2026, from <https://person.dibris.unige.it/masulli-francesco/VALUTAZIONI-COMPARATIVE/papers/R-masulli-nn03-baratta.pdf>
9. Ruusunen, M., & Paavola, M. (2002). *Quality Monitoring and Fault Detection in an Automated Manufacturing System – a Soft Computing Approach*: Report A No 19. Control Engineering Laboratory, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finland.
10. Biloborodko, O.I., & Yemelienenko, T.H. (2014). *Analiz dynamichnykh riadiv*: navch. posib. Dnipropetrovsk: RVV DNU.

11. Zemledukh, V.A. (2025). *Komponentne prohnozuvannia navantazhennia u bahatokorystuvatskykh kompiuternykh merezhakh: kval. robota mahistra*. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
12. Harder, S.Ye., Kornil, T.L., Reshetnikova, S.M., & Serdiuk, I.V. (2024). Singular spectral analysis of temperature multidimensional time series. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*, 1, 37–45 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.20998/2222-0631.2024.01\(6\).05](https://doi.org/10.20998/2222-0631.2024.01(6).05)
13. Havryliuk, O.P. (2020). *Systema prohnozuvannia i analizu sezonnykh chasovykh riadiv u zadachakh enerhetyky: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06*. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

APPLICATION OF SINGULAR SPECTRUM ANALYSIS FOR DETERMINING THE TIMING AND MAGNITUDE OF EXCESSIVE ELECTRICITY CONSUMPTION

Yevgen Kaurkin, <https://orcid.org/0000-0002-5878-128X>

Ihor Karpaliuk*, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5634-6807>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: humpway@gmail.com

Abstract. *One of the problems of the power system of Ukraine is the high level of electrical energy losses, which have various causes, one of which is the deterioration of power quality. The article considers the overloading of network sections that leads to a decline in electrical energy quality. The causes of excessive electricity consumption under conditions of insufficient heat supply and its impact on the operating modes of electrical networks are investigated. The interrelation between electrical and thermal energy consumption is substantiated, as well as the necessity of analyzing their time dependencies to detect disturbances in operating conditions. The aim of the study is to develop a method for detecting regimes of excessive electricity consumption arising from insufficient heat supply, which lead to the deterioration of power quality indicators and increased losses. Methodology – singular spectrum analysis of time series of electricity consumption and heat supply is applied using a procedure for detecting structural changes (regime shifts) based on the analysis of the spectrum of eigenvalues and eigentriples. The study is conducted using real data from a residential area over a one-year period. Results – the dependence of electricity consumption on ambient temperature and heat supply volumes is established; structural components corresponding to seasonal and operational factors are identified; the possibility of identifying moments of excessive consumption through the analysis of residual components of the time series is demonstrated. The proposed approach makes it possible to determine the parameters of excessive electricity consumption and to estimate the required level of heat supply for its reduction, thereby providing a basis for improving power quality and reducing losses.*

Keywords: voltage sags, excessive consumption, time series, singular spectrum analysis, thermal energy, interdependence of energy forms.

Дата першого надходження статті до журналу: 13.05.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.05.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026