

П. О. Черненко¹
О. В. Мартинюк¹
В. О. Мірошник¹
А. І. Заславський¹

ДОСТОВІРИЗАЦІЯ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЕЛЕКТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ПІДПРИЄМСТВ

¹Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

Показано переваги і недоліки трьох методик виявлення та відновлення аномальних значень електричного навантаження енергооб'єктів, що ґрунтуються на методах статистичного аналізу часових рядів та математичному апараті штучних нейронних мереж. Ефективність запропонованих алгоритмів достовіризації апробувалась на реальних даних електричних навантажень енергоємних підприємств Дніпропетровської області.

Ключові слова: достовіризація, аномальні значення, електричне навантаження, енергоємні підприємства.

Вступ

Розв'язуючи задачу короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження (ЕН) енергооб'єднання України на інтервал упередження до семи діб, як правило використовується ретроспективна технологічна і метеорологічна інформація з обмеженого інтервалу передісторії [1]. Зазначена інформація надходить в базу даних розробленої програми короткострокового прогнозування із різних джерел: оперативно-інформаційного комплексу НЕК «Укренерго», Гідрометеоцентру, Держенергонагляду. Деяка частина цієї інформації може бути недостовірною внаслідок збоїв в системі телемеханіки, каналах передачі інформації, або ж через помилки персоналу. Наявність у вибірці вихідної інформації аномальних даних у вигляді трикутних або трапецієподібних викидів призводить до викривлення математичної моделі впливу на електричне навантаження зовнішніх факторів, що спричиняє зниження точності та стабільності результатів короткострокового прогнозування [2, 3]. Одним із технологічних факторів, що суттєво впливає на електричне навантаження енергооб'єднання України є режими роботи енергоємних підприємств (ЕП). Аномальні значення ЕН ЕП в основному викликані помилками вимірювання, збоями під час передачі інформації, або різкою зміною нормального режиму роботи підприємств.

За результатами проведених досліджень запропоновані методики, які реалізовані у вигляді трьох алгоритмів достовіризації аномальних значень енергоємних підприємств: на основі методів статистичного аналізу погодинних зрізів електричного навантаження ЕП, аналізу даних різницевого ряду першого порядку погодинних значень ЕН ЕП, а також на основі математичного апарату штучних нейронних мереж (ШНМ). Методика ідентифікації аномальних значень апробувалась на реальних даних добових графіків ЕН енергоємних підприємств Дніпропетровської області.

Алгоритми достовіризації даних

Почергово наведемо опис кожного з трьох алгоритмів ідентифікації та відновлення аномальних значень електричного навантаження енергоємних підприємств. Алгоритм № 1 ґрунтується на основі методів статистичного аналізу погодинних зрізів ЕН і передбачає виявлення аномальних даних безпосередньо на всій вибірці окремо для кожної години доби.

Проведений аналіз електричного навантаження енергоємних підприємств за річний інтервал передісторії показав неоднорідність вихідної вибірки даних, наявність сезонних коливань та трендової складової ЕН. Встановлено, що електричне навантаження ЕП слабо залежить від різних коливань температури повітря (коефіцієнт кореляції $< 0,63$) але пов'язане із глибокими сезонними змінами температури повітря. На рис. 1 показано нормовані значення попередньо апроксимованих за допомогою методу

кусково-поліноміальної апроксимації [4] даних сумарного електричного навантаження 16-ти найбільш енергоємних підприємств інтервально о 22 години та середньодобової температури повітря у відповідному регіоні. Нормування проведено за формулою $x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$, де x_{\min} , x_{\max} — відповідно, мінімальне та максимальне значення у вибірці даних.

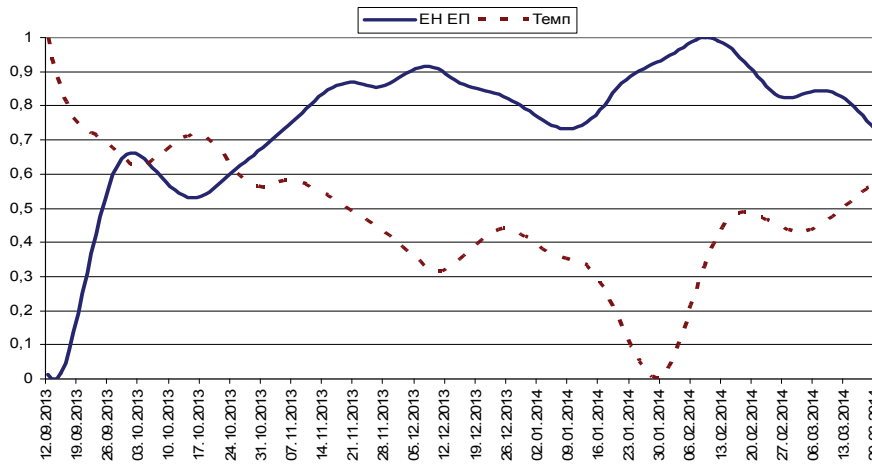


Рис. 1. Нормовані апроксимовані значення ЕП Дніпропетровської області о 22 год та середньодобової температури повітря

Відповідно до рис. 1 спостерігається чітка зворотна кореляційна залежність між ЕП та температурою повітря, що в кількісному вимірі становить 0,77. Ця обставина не дозволяє застосовувати статистичні методи ідентифікації аномальних значень [5] безпосередньо до вихідних значень електричного навантаження. Вплив температури та трендові коливання ЕП призводять до порушення однорідності загальної вибірки даних, наслідком чого є відмінність значень статистичних характеристик (математичного сподівання та дисперсії вибірки) на різних її інтервалах.

Одним із інструментів усунення такої неоднорідності є виділення метеорологічно чутливої та трендової частин ЕП в окрему регулярну складову електричного навантаження. Отримана таким чином залишкова складова ЕП буде позбавлена впливу температури, внаслідок чого вибірка залишків буде однорідною на всьому інтервалі. З метою виділення регулярної складової електричного навантаження запропоновано використовувати один із методів апроксимації даних.

Алгоритм достовіризації електричного навантаження енергоємних підприємств передбачає виконання таких етапів.

1. Проводиться апроксимація погодинних зрізів електричного навантаження ЕП із використанням методу кусково-поліноміальної апроксимації.

2. Формується масив апроксимованих даних \bar{P}_i^j та масив відхилень фактичних значень ЕП від апроксимованих: $\Delta P_i^j = P_i^j - \bar{P}_i^j \quad \forall j = 1 \dots 24; \quad i = 1 \dots N$.

3. Для кожного стовпчика масиву відхилень ($\forall j = 1 \dots 24$) розраховуються статистичні характеристики вибірки: математичне сподівання $M(\Delta P^j)$ та стандартне відхилення $\delta(\Delta P^j)$.

4. Проводиться перевірка кожної з 24 вибірок відхилень на відповідність нормальному закону розподілу згідно з критерієм погодження Пірсона з довірчою ймовірністю $P = 0,95$. Якщо критерій не виконується, то перевіряється, чи є закон розподілу унімодальним. Якщо результат і цього разу негативний, то приймається, що закон розподілу є довільним.

5. Для $\forall j = 1 \dots 24$ елементи вибірки відхилень ΔP_i^j перевіряються на аномальність за допомогою критерію Чебишева:

$$|\Delta P_i^j| \leq M(\Delta P^j) + k \cdot \delta(\Delta P^j), \quad (1)$$

де k — коефіцієнт, що залежить від виду розподілу вибірки [5]

$$k = \begin{cases} 1,96, & \text{якщо закон розподілу вибірки — нормальний;} \\ 2,82, & \text{якщо закон розподілу вибірки — унімодальний;} \\ 4,24, & \text{якщо закон розподілу вибірки — довільний.} \end{cases}$$

Якщо нерівність виконується, то це значення не аномальне. Якщо не виконується, то дата цього аномального викиду, $P_{anom_i}^j$, запам'ятовується і це значення виключається з масиву відхилень. Після перевірки всіх 24 вибірок по N елементів у кожній, процедура повторюється, починаючи з п. 3. наведеного алгоритму. У разі відсутності ідентифікації нових аномальних значень виконання алгоритму продовжується з наступного пункту.

6. Проводиться класифікація виявлених аномальних значень ЕН ЕП. Всі виявлені викиди поділяються на дві групи: такі, що зумовлені збоями в системі збору, передачі та обробки інформації, і такі, що дійсно мали місце на практиці (аварійне вимкнення енергоємних споживачів на підприємствах). Класифікація ґрунтується на тісному кореляційному зв'язку між ЕН енергоємних підприємств та сумарним електричним навантаженням обленерго, що живить ці підприємства. Наприклад, для Дніпробленерго значення відповідного коефіцієнта кореляції перевищує 0,7. Відокремлення реальних викидів ЕН ЕП від штучних необхідне для подальшої достовіризації СЕН обленерго та коректного виділення комунально-побутової складової сумарного електричного навантаження.

7. Відновлення аномальних значень ЕП ЕП проводиться за такими формулами:

$$P_{norm_i}^j = \begin{cases} \bar{P}_i^j, & \text{якщо викид трикутний;} \\ \bar{P}_i^j + P_{anom_i}^j - \frac{\sum_{k=i}^{k<i+M} P_{anom_k}^j}{M}, & \text{якщо викид трапецієподібний,} \end{cases} \quad (2)$$

де M — кількість елементів у групі.

До недоліків зазначеного алгоритму слід віднести складність його реалізації, що передбачає виконання процедури кусково-поліноміальної апроксимації 24-х погодинних зрізів ЕН, а також ідентифікацію закону розподілу відхилень на кожному ітераційному кроці. Запропоновано спрощений алгоритм достовіризації ЕН ЕП, який позбавлений зазначених недоліків і дозволяє швидко виявити та відновити аномальні значення електричного навантаження.

Наведемо процедуру достовіризації електричного навантаження ЕП на основі аналізу даних різницевого ряду першого порядку погодинних значень ЕН (алгоритм № 2). Згідно з цим алгоритмом неоднорідність вихідної вибірки даних запропоновано усувати шляхом взяття різниць першого порядку та звуженням загального масиву отриманих даних до обмеженого інтервалу.

Процедура ідентифікації та коригування аномальних відхилень ЕН проводилися у такий спосіб:

1. Для кожної години доби $j = 1 \dots 24$ формуються архіви ЕН по всіх днях N передісторії.

2. Формується вибірка різниць першого порядку, тобто послідовно обчислюються різниці поточного та попереднього значення ЕН: $\Delta P_i^j = P_i^j - P_{i-1}^j$; $\forall j = 1 \dots 24$; $i = 2 \dots N$. В такій вибірці на місці трикутного [1] викиду вихідного процесу з'являються два протилежно спрямованих трикутних викиди, а в місцях початку та закінчення трапецієподібного викиду [1] — трикутні викиди. Таким чином, вибірка різниць першого порядку містить лише трикутні викиди. Використання різницевого ряду першого порядку дозволяє знехтувати трендовою складовою електричного навантаження та спростити, таким чином, розрахунки.

3. Знаходяться аномальні значення вибірки різниць ЕН першого порядку окремо для кожної години. Їх пошук виконується у такий спосіб:

3.1 Розраховуються середні $M(\Delta P_i^j)$ та середньоквадратичні $\delta(\Delta P_i^j)$ значення вибірки перших різниць СЕН за попередні два тижні для кожної години доби.

3.2 Наступне значення вибірки перших різниць ЕН перевіряються на аномальність за допомогою критерію Чебишева (1). При цьому приймається значення коефіцієнта k для довільного закону розподілу ($k = 4,24$).

Якщо нерівність виконується, то таке значення не аномальне. Якщо не виконується, то номер цього аномального викиду запам'ятовується, а відповідне йому значення із вихідної P_{i+1}^j заміщується на

таке: $\tilde{P}_{i+1}^j = \frac{\sum_{k=1}^{k=14} P_{i-k}^j}{14}$. Вибірка різниць першого порядку в такому випадку формується повторно.

3.3 Двотижневий інтервал зміщується на одиницю по часовому ряду даних, і перевірка нового елемента вибірки здійснюється згідно з п.п. 3.1—3.2 алгоритму. Процес триватиме допоки не виконуватиметься нерівність (1) для всієї вибірки різниць першого порядку для кожної години доби.

3.4. У випадку виявлення кількох послідовних аномальних значень (трапецієподібний викид) коригування вихідного ряду ЕН, починаючи із першого викиду P_i^j , відбувається за допомогою формули

$$P_i^{j'} = P_i^j - \frac{\sum_{k=1}^{k=K} P_{i+k-1}^j}{K} + \frac{\sum_{k=1}^{k=14} P_{i-k}^j}{14}, \quad (3)$$

де $P_i^{j'}$ — скориговане значення вихідного ряду; K — обсяг вибірки трапецієподібного викиду.

Перевага використання у цій задачі різницевого ряду першого порядку в порівнянні з класичними методами достовіризації даних, які використовують відхилення фактичних значень процесу від усереднених за допомогою різних методів апроксимації, полягає в тому, що в такому випадку вдається ідентифікувати також і трапецієподібні викиди.

Процедура достовіризації електричного навантаження енергоємних підприємств із використанням математичного апарату ШНМ схожа за суттю на процедуру згідно з алгоритмом № 1 з такими відмінностями:

— аналізуються не 24 окремих погодинних зрізи електричного навантаження, а відразу весь неперервний часовий ряд ЕН;

— масив відхилень ΔP_i^j (п. 2 алгоритму № 1) розраховується як різниця між фактичними значеннями ЕН ЕП та прогнозними значеннями електричного навантаження, що отримані за допомогою заздалегідь побудованої ШНМ.

— у разі виявлення викидів, аномальне значення замінюється на прогнозне.

В якості оператора прогнозування обрано штучну нейронну мережу типу багат шаровий перцептрон з одним прихованим шаром нейронів. До її переваг можна віднести здатність до відтворення нелінійних зв'язків, порівняно просту структуру мережі та наявність великої кількості програмних засобів, що спрощують процедуру її побудови. Прогнозна модель була однофакторна, тобто на шукане значення електричного навантаження враховувався лише вплив його попередніх значень. Вектор вихідних даних для навчання мережі обрано в результаті визначення пікових коефіцієнтів автокореляції ЕН. Таким чином використано вектор із таких елементів: $P_i^{j-1}, P_i^{j-2}, P_i^{j-3}, P_{i-1}^{j+1}, P_{i-1}^j, P_{i-1}^{j-1}, P_{i-1}^{j+1}, P_{i-7}^j, P_{i-7}^{j-1}$.

Ідентифікація аномальних відхилень між фактичними та прогнозними значеннями ЕН проводилася послідовно згідно з критерієм Чебишева (1). У разі виявлення викиду фактичне значення замінювалося на прогнозне з одночасним перерахуванням подальшого масиву ΔP_i^j та статистичних характеристик $M(\Delta P)$ та $\delta(\Delta P)$ загальної вибірки. Після проходження всього часового ряду ШНМ перенавчається на відновлених даних і процедура достовіризації повторюється. Ітераційна процедура зупиняється, якщо нерівність Чебишева виконується для всіх значень часового ряду відхилень. До недоліків цього методу належать: стохастичність процесу навчання мережі, що в деяких випадках може призвести до розбіжності алгоритму, припущення щодо відсутності викидів у початковому векторі вхідних даних, можливість ідентифікації помилкових аномалій (обмеження однофакторної моделі).

Результати розрахунків

Ефективність запропонованих алгоритмів достовіризації апробувалась на даних сумарного електричного навантаження енергоємних підприємств Дніпропетровської області в період вечірнього максимуму (о 22 годині) з 12.09.13 по 30.03.14 р. Розраховані згідно з п.п. 2—3 алгоритму № 1

статистичні характеристики відхилень ЕН становлять: середнє значення — $M(\Delta P^{22}) = -1,95$, стандартне відхилення — $\delta(\Delta P^{22}) = 49,34$. Згідно з п. 4. алгоритму № 1 визначено, що розподіл відхилень ЕН не відповідає нормальному закону розподілу ($\chi^2 = 18,32 > 9,49$, де 9,49 — квантиль розподілу Пірсона з рівнем значимості $p = 0,05$ для 4 степенів свободи. У розрахунку використано об'єднання інтервалів). Відповідно до рис. 3 очікуваний закон розподілу є унімодальним. Таким чином, коефіцієнт k нерівності (1) в цьому випадку становитиме 2,82.

Проведено ітераційну процедуру ідентифікації аномальних значень ЕН ЕП згідно з п. 5 алгоритму № 1. Зниження середньоквадратичного відхилення на останньому кроці ітераційної процедури склало 29 % по відношенню до $\delta(\Delta P^{22})$ на першому ітераційному кроці. Гіпотеза про належність закону розподілу відхилень ЕН до унімодального на кожному кроці ітераційного процесу залишалася вірною. Загальна кількість виявлених на третьому (останньому) кроці аномальних значень становила 12.

Серед ідентифікованих аномалій троє відносяться до групових (одночасно два, два та чотири викиди) і 4-ри одиночних. Результати відновлення виявлених викидів, що виконані згідно з п. 7, показано на рис. 2.

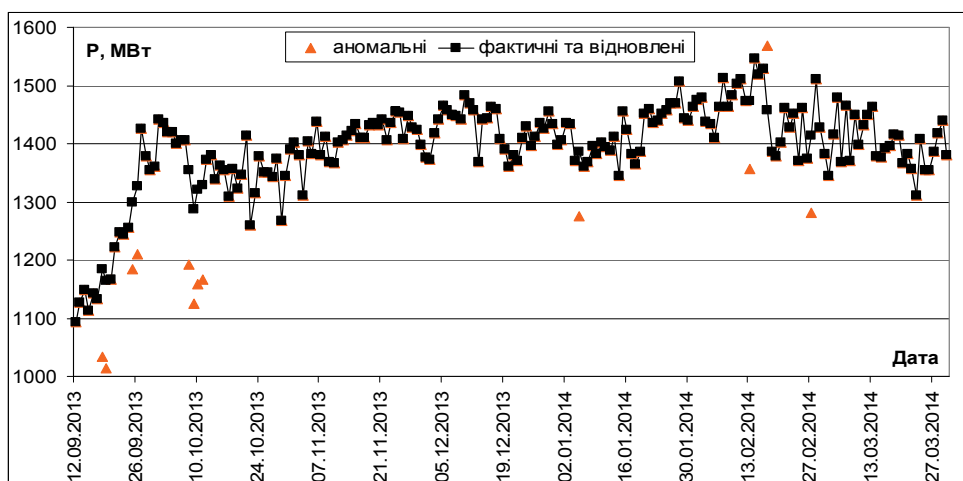


Рис. 2. Аномальні та відновлені за алгоритмом № 1 значення електричного навантаження енергоємних підприємств ПАТ «Дніпрообленерго» о 22-й годині

Проведемо аналіз та класифікацію окремих виявлених аномальних значень ЕН ЕП. На рис. 3, 4 зображено суміщені добові графіки електричного навантаження ПАТ «Дніпрообленерго» та суми навантажень 16-ти енергоємних підприємств, електропостачання яких здійснюється вказаною компанією.

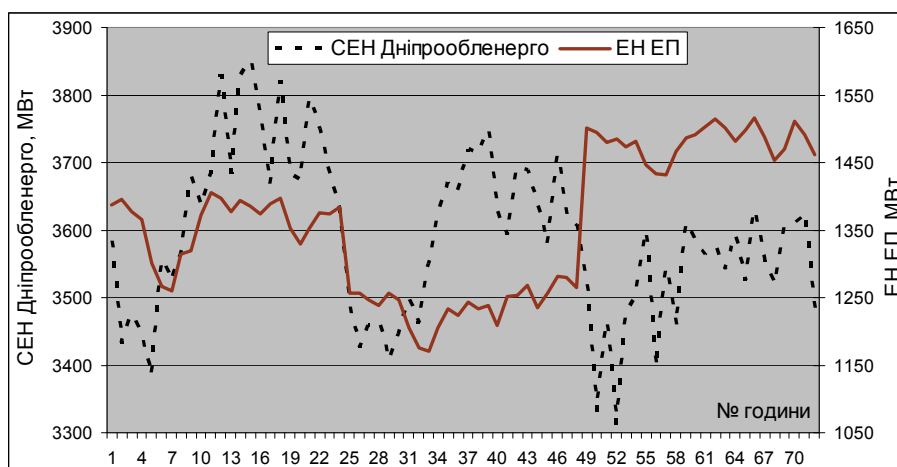


Рис. 3. Графіки електричного навантаження ПАТ «Дніпрообленерго» та енергоємних підприємств Дніпропетровської області за період 26.02.14—28.02.14 р.

Згідно з рис. 3 не виконується умова стійкого кореляційного зв'язку між двома наведеними графіками — падіння ЕН ЕП 27.02.2014 не позначається на загальному рівні електричного навантаження ПАТ «Дніпрообленерго». Така невідповідність свідчить про те, що аномальне значення суми електричних навантажень ЕП 27.02.2014 р. викликане збоями в системі збору, передачі та обробки інформації одного із підприємств області, а не реальним зниженням його навантаження. В результаті аналізу добових графіків навантаження окремих підприємств виявлено, що це ЕП — Дніпровський металургійний завод ім. Дзержинського, потужність якого, згідно з даними добової відомості за 27.02.2014 р., була знижена вдвічі (в середньому — на 100 МВт).

Таким чином, в цьому випадку після відновлення аномальних значень ЕН ЕП процедура достовіризації для сумарного електричного навантаження ПАТ «Дніпрообленерго» проводити не потрібно.

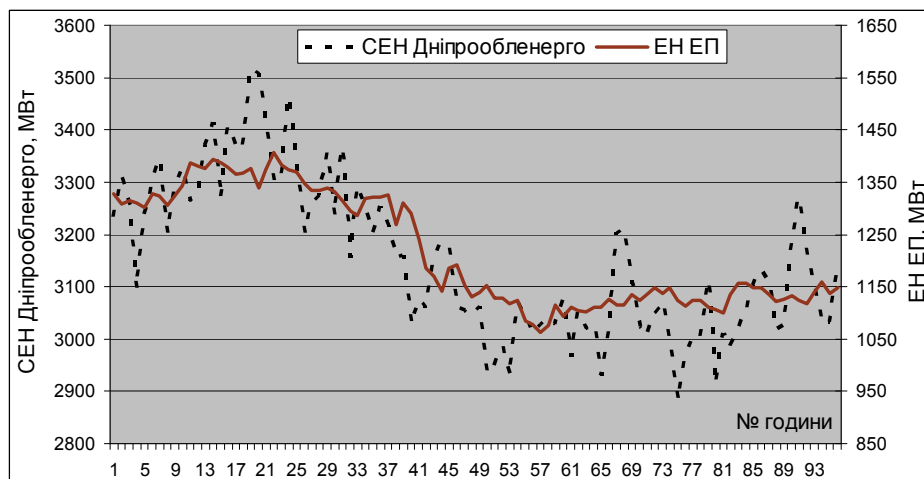


Рис. 4. Графіки електричного навантаження ПАТ «Дніпрообленерго» та енергоємних підприємств Дніпропетровської області за період 07.10.13—10.10.13 р.

Відповідно до рис. 4, зниження ЕН ЕП на 200 МВт тотожно зміні СЕН ПАТ «Дніпрообленерго», що свідчить про реальність такої динаміки навантаження енергоємних підприємств. В цьому випадку, після достовіризації ЕН ЕП необхідно проводити коригування СЕН ПАТ «Дніпрообленерго» на величину $\Delta = P_{norm_i}^j - P_i^j$.

За результатами достовіризації електричного навантаження енергоємних підприємств на аналогічній вибірці даних згідно з алгоритмом № 2 ідентифіковано один трапецієподібний викид протяжністю 11 діб (27.09.2013—07.10.2013 р.) та вісім трикутних. Обмеження згідно з алгоритмом № 2 інтервалу вибірки до 14 значень знижує їх дисперсію і дозволяє виявити менш суттєві аномалії, в порівнянні з методом № 1 навіть за умови використання коефіцієнта k , що відповідає довільному закону розподілу. Однак, за алгоритмом № 2 неможливо ідентифікувати викиди у початковому інтервалі. У разі наявності таких викидів додатково зростає ймовірність пропуску аномалій при послідовній достовіризації наступних значень ЕН. Також за алгоритмом № 2 і за алгоритмом на основі ШНМ можлива помилкова ідентифікація як суцільного трапецієподібного викиду реальних даних електричного навантаження, суттєва відмінність яких від значень на попередньому інтервалі викликана рядом об'єктивних факторів (температура повітря, економічні обставини, тренд, сезонні коливання). Достовіризація даних за алгоритмом № 1 позбавлена зазначених недоліків, отримані таким чином результати є стабільнішими.

Висновки

1. За наявності в складі електричного навантаження обласних енергосистем значної кількості енергоємних підприємств, для підвищення точності визначення залежності ЕН від метеорологічних факторів необхідно проводити статистично коректну достовіризацію вихідної інформації про добові графіки енергоємних підприємств.

2. Дослідження показали, що у вибірці погодинних значень сумарного навантаження групи енергоємних підприємств, які становлять суттєвий вклад в навантаження окремих обласних енергосистем, присутні трендова та метеорологічно чутлива складова, які зумовлюють нестационарний характер зміни навантаження в часі. Усунення нестационарності вихідного ряду за допомогою кус-

ково-поліноміальної апроксимації або побудови ряду перших різниць дозволило з використанням критерію Чебишева проводити виявлення аномальних даних у вигляді трикутних та трапецієподібних викидів, їх виключення та відновлення пропущених значень.

3. При однофакторному розв'язанні задачі штучна нейронна мережа не достатньо точно відтворює довгострокові тренди, а також зв'язок між навантаженням та температурою, що призводить до помилкового виключення достовірних даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черненко П. О. Багаторівневе короткострокове прогнозування сумарного електричного навантаження енергооб'єднання / П. О. Черненко, О. В. Мартинюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вінниця — 2011. — № 2. С. 74—80.
2. Черненко П. А. Методы повышения достоверности телеизмеряемых параметров режима электроэнергетических систем / П. А. Черненко, А. И. Заславский // Электродинамика : пр. Ин-ту электродинамики НАНУ. — 2001. — С. 109—114.
3. Черненко П. А. Обработка и анализ информации для иерархического прогнозирования электрических нагрузок / П. А. Черненко, А. И. Заславский, А. В. Мартынюк // Праці ІЕД НАНУ. — 2006. — Вип. 2(14). — С. 47—49.
4. Черненко П. О. Прогнозування добового графіка сумарного електричного навантаження електроенергетичної системи / П. О. Черненко, О. В. Мартинюк // Праці ІЕД НАНУ. — 2007. — Вип. 18. — С. 57—65.
5. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. — М. : Наука, 1968. — 288 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 6.11.2014

Черненко Павло Олексійович — д-р техн. наук, професор, провідний науковий співробітник відділу моделювання електроенергетичних об'єктів і систем, email: cher@ied.org.ua;

Мартинюк Олександр Васильович — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу моделювання електроенергетичних об'єктів і систем, email: samark@ukr.net;

Мірошник Володимир Олександрович — аспірант відділу моделювання електроенергетичних об'єктів і систем, email: vmiroshnik@inbox.ru;

Заславський Аркадій Ілліч — провідний інженер-програміст відділу моделювання електроенергетичних об'єктів і систем.

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ

P. O. Chernenko¹
O. V. Martyniuk¹
V. O. Miroshnyk¹
A. I. Zaslavskiy¹

Anomaly detection in the raw data electrical load of energy-intensive enterprises

¹Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv

This paper presents the advantages and disadvantages of three methods for the identification and recovery of anomalous values of electric power load based on the methods of statistical time series analysis and mathematical apparatus of artificial neural networks. The effectiveness of the proposed anomaly detection algorithms has been tested on real data of electrical loads of energy-intensive enterprises of Dnipropetrovsk region.

Keywords: anomaly detection, anomalous values, electrical load, energy-intensive enterprises.

Chernenko Pavlo O. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Senior Research Assistant of the Department of Modelling of Electrical Power Objects and Systems, e-mail: cher@ied.org.ua;

Martyniuk Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Assistant of the Department of Modeling of Electrical Power Objects and Systems, email: samark@ukr.net;

Miroshnyk Volodymyr O. — Post-Graduate Student of the Department of Modeling of Electrical Power Objects and Systems, email: vmiroshnik301290@gmail.com;

Zaslavskiy Arkadii I. — Leading Programming Engineer of the Department of Modeling of Electrical Power Objects and Systems

П. А. Черненко¹
А. В. Мартынюк¹
В. А. Мирошник¹
А. И. Заславский¹

Достоверизация исходной информации об электрической нагрузке энергоемких предприятий

¹Институт электродинамики НАН Украины, Киев

Показаны преимущества и недостатки трех методик идентификации и восстановления аномальных значений электрической нагрузки энергообъектов, основанные на методах статистического анализа временных рядов и математическом аппарате искусственных нейронных сетей. Эффективность предложенных алгоритмов достоверизации апробировалась на реальных данных электрических нагрузок энергоемких предприятий Днепропетровской области.

Ключевые слова: достоверизация, аномальные значения, электрическая нагрузка, энергоемкие предприятия.

Черненко Павел Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела моделирования электроэнергетических объектов и систем, email: cher@ied.org.ua;

Мартынюк Александр Васильевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела моделирования электроэнергетических объектов и систем, email: samark@ukr.net;

Мирошник Владимир Александрович — аспирант отдела моделирования электроэнергетических объектов и систем, email: vmiroshnik@inbox.ru;

Заславский Аркадий Ильич — ведущий инженер-программист отдела моделирования электроэнергетических объектов и систем