

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДИННОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ РЕГІОНУ ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Василь Приймак¹, Ольга Голубник², Софія Палій³

^{1,2,3}Львівський національний університет імені Івана Франка
79008 м. Львів, проспект Свободи, 18

¹E-mail: vasyl.pryymak@lnu.edu.ua; ORCID: 0000-0003-0244-8661

²E-mail: olga.holubnyk@lnu.edu.ua; ORCID: 0000-0003-1211-4614

³E-mail: sofiia.palii@lnu.edu.ua

Анотація. У статті здійснено аналіз поточного стану та виконано прогнозування погодинного споживання електроенергії в Тернопільській області. Дослідження базується на статистичних даних за 2020–2024 рр., що дало змогу простежити основні тенденції та особливості енергоспоживання в регіоні. Встановлено, що структура споживання має виражений циклічний характер, з коливаннями протягом доби та сезонними відмінностями. Прогнозування виконано із використанням методики гармонійного аналізу, що забезпечує виокремлення ключових тенденцій у даних. На основі проведеного прогнозування запропоновано рекомендації щодо підвищення ефективності використання енергоресурсів. Отримані результати мають практичне значення для оптимізації енергетичної політики регіону, а прогнозування на погодинному рівні виступає стратегічним інструментом, здатним підвищити стійкість енергосистеми та сприяти ефективному управлінню в умовах воєнної нестабільності.

Ключові слова: енергоспоживання, прогнозування, гармонійний аналіз, поліномом Фур'є, циклічні коливання, управління.

Постановка проблеми. В умовах постійних ракетних і дронівих атак російських військових на об'єкти цивільної інфраструктури, зокрема і на об'єкти енергопостачання, першочерговим завданням у питанні безперервного забезпечення населення України потребами в електроенергії є її ефективне використання. Вирішення цього завдання неможливе без аналізу наявного стану систем електроспоживання і прогнозу обсягів цього споживання на перспективу. Обсяги споживання електроенергії залежать від регіону, пори року і місяця, дня тижня, а також від години протягом доби. На відміну від нічних годин, в денні години, коли працюють підприємства, обсяги використання цієї енергії збільшуються. Нерівномірне споживання електроенергії протягом доби спонукає науковців до виконання аналізу, моделювання і прогнозування цих



процесів. Тому актуальними є наукові дослідження, які дають змогу визначити прогностичні значення погодинного споживання електроенергії, а також максимально усунути дисбаланс цього споживання протягом доби.

Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань у дослідженні використано статистичні методи для аналізу динаміки погодинного споживання електроенергії, для виявлення закономірностей та характеру коливань застосовано методи порівняння, узагальнення та структурного аналізу. Прогнозування виконано із використанням методики гармонійного аналізу, що дало змогу виокремити основні тренди та циклічні компоненти енергоспоживання регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогнозуванням споживанням електроенергії, цін на енергоресурси, моделюванням цих процесів, інших проблем, які стосуються використання електричної енергії, займались як українські, так і зарубіжні науковці. Наприклад, автори наукової статті [1] на основі результатів сценарного прогнозування визначили перспективи розвитку відновлювальної енергетики у структурі енергетичного балансу України. Огляд сучасних методів прогнозування такої відновлювальної енергії як сонячна зробив у своїй публікації Д. Матушкін [2].

Автори монографії [3] пропонують результати розробленого ними методу та моделі оперативного прогнозування навантаження систем споживання електричної енергії застосувати до вирішення проблеми підвищення ефективності керування використанням електроенергії. Прогнозування електроспоживання міської електричної мережі розглянуто в науковій праці [4], а прогнозування цін на електроенергію запропоновано в роботі [5]. В науковій статті [6] за допомогою простої ковзної середньої, зваженої ковзної середньої, простого експоненційного згладжування, лінійного тренду Холта, Холта-Вінтерса та центрованої ковзної середньої знайдено прогнози споживання електроенергії одним з університетів Малайзії. Для прогнозування електричного навантаження в інтелектуальних мережах автори роботи [7] застосували метод опорних векторів. В літературних джерелах також опубліковано результати інших наукових досліджень, які стосуються розглянутої проблематики. Однак, у відкритому доступі відсутні публікації, які б висвітлювали результати аналізу і прогнозу погодинного споживання електроенергії в регіонах України.

Постановка завдання. З урахуванням вищесказаного, мета статті – виконання аналізу теперішнього та прогнозування майбутнього стану погодинного споживання електроенергії в Тернопільській області та вироблення рекомендацій щодо ефективності її використання.

Виклад основного матеріалу дослідження. В теперішній час без електроенергії неможливе нормальне функціонування всіх галузей економіки а також побутової сфери. В сьогоденних умовах, коли на електротехнічну систему нашої країни крім таких внутрішніх чинників як погодні умови, міграція населення, зміна економічної активності та ін. впливають зовнішні фактори, які пов'язані з воєнними діями російського агресора, стратегічну роль відіграють як загальні прогнози, так і деталізовані, серед яких особливе місце займають погодинні прогнози споживання електроенергії. Останні прогнози дають змогу визначити циклічні зміни цього споживання протягом доби, що має особливе значення для ефективного управління процесами генерації електроенергії та її розподілом протягом цього періоду часу.

Повномасштабне вторгнення в Україну російських військ у 2022 р. та їхні повітряні атаки на електростанції, електропідстанції та інші об'єкти системи електропостачання по цілій країні призвели до суттєвого збільшення навантаження на працівників цієї системи. Нестача електроенергії, неможливість покрити її з-за кордону чи іншими

способами спонукають населення України і працівників сфери електрозабезпечення до пошуку способів не тільки економії цієї електроенергії, а й ефективного її використання, зокрема в межах добового її споживання.

Усесторонній аналіз і прогнозування погодинного споживання електроенергії протягом доби дає можливість не тільки оптимізувати витрати та уникнути її перевитрат, запобігти перенавантаженням та своєчасно відреагувати на загрози відповідній системі, а й максимізувати ефективність роботи операторів цієї системи, забезпечити гнучкість формування тарифів і попиту на ринку розподілу електроенергії.

З оглянутого, для вироблення заходів поліпшення використання електроенергії протягом доби необхідно вивчити процеси теперішнього її погодинного споживання і спрогнозувати їх на майбутнє. Дослідимо ці процеси на прикладі Тернопільської області.

Для знаходження ключових тенденцій і вироблення прогнозу розглянемо статистичні дані щодо погодинного споживання електроенергії в Тернопільській області протягом 2020-2024 рр. [8]. З логічних міркувань напрошується гіпотеза про максимальні навантаження на енергосистему зимою через низьку температуру і потребу в опалюванні приміщень та в певні періоди літом через високу температуру і можливість кондиціонування цих приміщень. Відповідно менші навантаження на цю систему мали би відбуватися весною і восени. Хоча ці навантаження будуть залежати ще й від місяця, для якого виконується аналіз. Враховуючи ці міркування і для більш точного аналізу впливу сезонності на обсяги погодинного використання електроенергії та відповідного прогнозування будемо розглядати ці процеси окремо для кожного місяця і відповідної пори року. Разом з цим, при дослідженні погодинного споживання електроенергії можна припустити, що в нічні години доби обсяги цього споживання зменшуються порівняно з іншими годинами доби.

Виконані розрахунки підтвердили обидва вказані припущення. Результати цих розрахунків показали циклічні коливання у споживанні електроенергії протягом доби, які є різними для кожного місяця (рис. 1-4). Для компактного подання матеріалу дослідження на поданих графіках відразу зображено прогнозні значення цього споживання, пояснення яких буде зроблено нижче.

Розпочнемо аналіз з весняних місяців (рис. 1). Характерним для всіх трьох цих місяців є наявність двох періодів з максимальним використанням електроенергії (приблизно 9.00-12.00 і 19.00-22.00), перший з яких відповідає початковій стадії робочого дня більшості населення і другий – періоду після закінчення роботи та проведення дозвілля. Найменші витрати електроенергії відбувались у нічний час приблизно з 3.00 до 5.00 год., що було типовим для всіх місяців року.

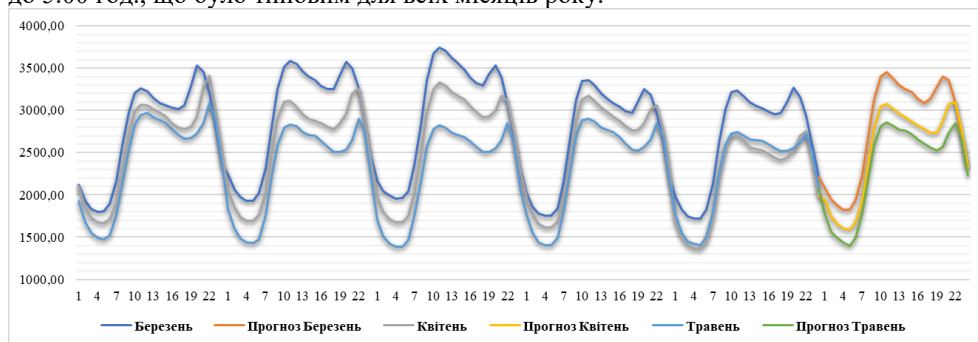


Рис. 1. Динаміка реального (2020-2024 рр.) та прогнозованого (2025 р.) споживання електроенергії у весняний період (МВт·год)

Джерело: розроблено авторами за даними [8]

Щодо помісячної диференціації добового електроспоживання весною, то найвищий його рівень спостерігався у березні, а найнижчий – у травні, що зумовлено поліпшенням погодних умов та збільшенням світлового дня. Причому разом зі зменшенням цього споживання від початку до кінця весни, його денна крива стає трохи рівнішою.

Для літнього періоду (рис. 2) характерним є приблизно однакова структура добового споживання електроенергії протягом всіх його місяців (графіки майже однакові). Причому у денні години літніх місяців (приблизно з 12.00 до 16.00) споживання, порівняно з весняним періодом, є більш стабільним (криві є більш згладжені), що вказує на сталу активність об'єктів, які використовують електроенергію.

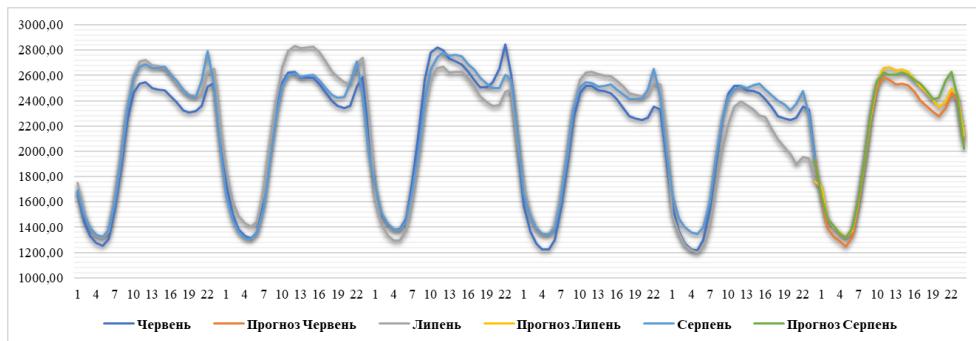


Рис. 2. Динаміка реального (2020-2024 рр.) та прогнозованого (2025 р.) споживання електроенергії в літні місяці (МВт·год)

Джерело: розроблено авторами за даними [8]

Стосовно літніх періодів максимального споживання електроенергії впродовж доби, то вони, порівняно з весняними, зсунулись «в право» у часовому вимірі (з 10.00 до 15.00 і з 21.00 до 23.00), а піки графіків не так різко виражені. Винятком є липень 2024 року, у якому спостерігається відносно зменшення споживання електроенергії, що може бути пов'язано з її аварійними відключеннями.

Динаміку споживання електроенергії протягом доби в осінні місяці відображено на рисунку 3. Подібно як і для весняного періоду, для кожного з цих місяців характерним є два піки – ранковий (приблизно від 10.00 до 12.00) і вечірній (близько 18.00-21.00).

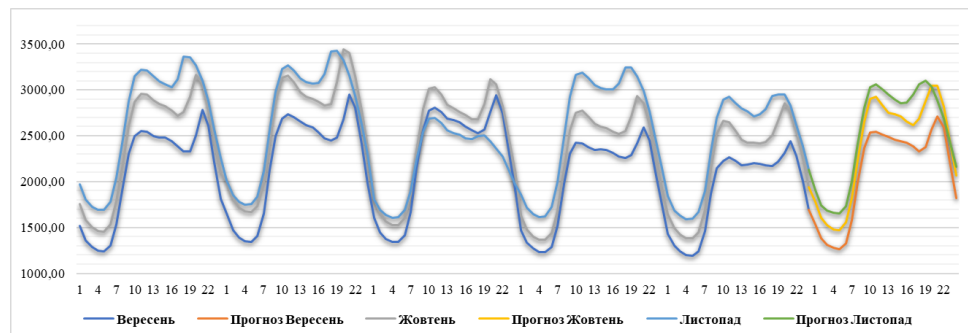


Рис. 3. Динаміка реального (2020-2024 рр.) та прогнозованого (2025 р.) споживання електроенергії в осінній період (МВт·год)

Джерело: розроблено авторами за даними [8]

Щодо помісячної диференціації динаміки електроспоживання в цей період, то аналіз підтверджує зростання цього споживання від вересня до листопада, що є очевидним з огляду на природне зменшення температури повітря при наближенні до зими і зменшення світлового дня. Деякі відхилення від загальної тенденції у споживанні електроенергії, наприклад у листопаді 2022 р., пов'язані з російськими атаками ракет і безпілотних систем на різноманітні інфраструктурні об'єкти українських територій далеких від лінії фронту і відповідними аварійними відключеннями струму.

Електроспоживання у зимові місяці багато в чому відрізняється від цього споживання в інші пори року (рис. 4), хоча його типова структура в загальному зберігається. Зокрема, через низьку температуру повітря у зимовий час споживання електроенергії різко зростає. Хоча, подібно як і для деяких інших пір року, найбільш інтенсивне електроспоживання очікувано відбувається у денні та вечірні години (пікові навантаження припадають приблизно на години: 10.00-12.00 і 17.00-20.00), а найменш інтенсивне – у нічні.

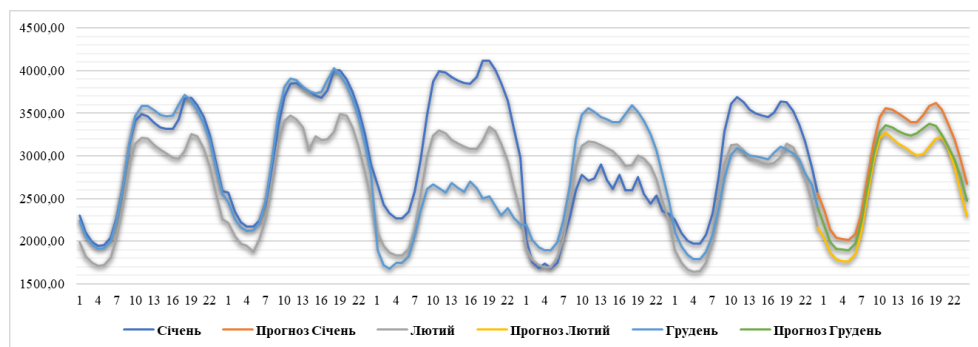


Рис. 4. Зимові динаміка реального (2020-2024 рр.) та прогнозованого (2025 р.) електроспоживання (МВт·год)

Джерело: розроблено авторами за даними [8]

Крім цього, суттєвий вплив на типовість структури досліджуваного споживання електроенергії відіграють російські атаки на об'єкти енергетичної інфраструктури України. Як видно з рис. 4, значні відхилення від усталеної динаміки цього споживання відбулися в кінці (грудень) 2022 і на початку (січень) 2023 років (крива споживання у денний період доби втратила монотонність). Неможливість одночасно забезпечити всіх споживачів потрібними обсягами електроенергії змусив енергосистему перейти на режим періодичного відключення електроенергії і поетапну її подачу різним абонентам.

Оскільки динаміка погодинного споживання електроенергії показує періодичні коливання цього споживання, то для його прогнозування скористаємось методикою гармонійного аналізу [9, 10]. Суть цього методу полягає тому, що якщо часовий ряд x_1, x_2, \dots, x_n має циклічні коливання, то його можна апроксимувати поліномом Фур'є:

$$x_t^{(k)} = a + \sum_{i=1}^k (b_i \cos \omega i t + d_i \sin \omega i t), \quad (1)$$

де i – номер гармоніки поліному Фур'є;

k – кількість гармонік, які ураховано для моделювання;

$\tau = t - 1$;

$\omega = 2\pi/s$ – кутова частота гармоніки визначається через тривалість циклу s ;

a, b_i, d_i – параметри (коефіцієнти Фур'є).

Для знаходження невідомих параметрів переважно використовують метод найменших квадратів. Тоді для їх розрахунку отримують такі формули [9, 10]:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t; \quad b_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n [x_t \cdot \cos(\omega i t)]; \quad d_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n [x_t \cdot \sin(\omega i t)]. \quad (2)$$

У зв'язку з великими обсягами обчислень для прогнозування переважно використовують небагато гармонік. Як показує практика, достатню точність можна отримати скориставшись трьома-сімома гармоніками. За рекомендацією науковців [9, 10], обчислення зупиняють, якщо збільшення кількості гармонік приносить незначний приріст точності.

Як показав проведеним нами аналіз обсягів споживання електроенергії значно відрізняються для деяких місяців, наприклад для січня і червня, тому будемо виконувати прогнозування цих обсягів на 2025 рік окремо для кожного місяця – від січня до грудня.

Перший місяць року є один з найхолодніших місяців через низьку температуру повітря і короткий світловий день, тому і споживання електроенергії одне з найбільших. На початку потрібно визначити кількість гармонік, які доцільно використати для прогнозування цього споживання у цьому місяці. Критерієм у цьому виборі буде цей же критерій, що й у методі мінімального елемента – сума квадратів відхилень між фактичними і розрахованими величинами тренду за формулою:

$$\sum (x_t - x_t^{(k)})^2. \quad (3)$$

Як було сказано вище, для прогнозування з використанням цього методу урахувати більше семи його гармонік не має рації. Тому виконаємо розрахунки абсолютної похибки за формулою (3) для кожного з цих випадків і визначимо на скільки зменшилася ця величина при поступовому збільшенні кількості урахованих при розрахунках гармонік (табл. 1).

З табл. 1 видно, що величина розрахованої за формулою (3) сума квадратів постійно зменшується, що вказує на поліпшення використовуваної нами для прогнозування моделі зі збільшенням кількості гармонік. При урахуванні шостої гармоніки точність нашої моделі поліпшилася набагато менше як з урахуванням попередніх гармонік. Тому обмежимося п'ятьма з цих гармонік. В результаті отримуємо:

Таблиця 1

Порівняння моделей прогнозування на січень з різною кількістю гармонік

| № | Кількість врахованих гармонік | $\sum (x_t - x_t^{(k)})^2$ | Величина зменшення суми (3) |
|---|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 1 285 149,78 | - |
| 2 | 2 | 144 234,97 | 1 140 914,81 |
| 3 | 3 | 40 926,45 | 103 308,53 |
| 4 | 4 | 26 414,91 | 14 511,54 |
| 5 | 5 | 6784,34 | 19 630,57 |
| 6 | 6 | 5054,38 | 1 729,96 |
| 7 | 7 | 4844,88 | 209,50 |

Джерело: розраховано авторами на основі даних [8]

$$x_t^{(5)} = 2983,20 - 573,03 \cdot \cos \frac{\pi t}{12} - 524,46 \cdot \sin \frac{\pi t}{12} - 19,66 \cdot \cos \frac{\pi t}{6} - 307,72 \cdot \sin \frac{\pi t}{6} + 16,77 \cdot \cos \frac{\pi t}{4} + 91,26 \cdot \sin \frac{\pi t}{4} - 34,39 \cdot \cos \frac{\pi t}{3} - 5,17 \cdot \sin \frac{\pi t}{3} - 12,52 \cdot \cos \frac{5\pi t}{12} - 38,46 \cdot \sin \frac{5\pi t}{12}. \quad (4)$$

Аналогічні дії і побудова трендових моделей було виконано для інших місяців року. Причому для кожного з них в результаті узгодження між точністю моделі і складністю розрахунків було обґрунтовано, що для кожного з шести місяців – з квітня по вересень – доцільно включити в рівняння тренду шість, а для інших шести місяців – п'ять гармонік.

Побудовані трендові моделі було використано для знаходження прогнозу споживання електроенергії в Тернопільській області на 2025 рік. Для кращого візуального сприйняття прогнозні значення обсягів електроспоживання, які розраховані з використанням формули (4) для січня і аналогічних формул для інших місяців року, подано у вигляді теплокарти [11] на рис. 5.

В тепловій карті низьке і високе споживання електроенергії відображається відповідно зеленим (холодний тон) та червоним кольорами (теплий тон). Причому жовтий і помаранчевий – проміжні кольори.

Як видно на рис. 5 прогнозні величини електроспоживання підтверджують наші припущення про низькі обсяги цього споживання у нічні години доби і високі – у денні, зростання цього споживання у зимові місяці, дещо зниження його обсягів з помітними вечірніми піками літом та помірними значеннями весною та осінню.

Для кращого розуміння і наочності погодинних прогнозів, розрахованих для кожного місяця, на рис. 1-4 подано їх графічне зображення. На графіках чітко видно загальний вигляд кривих, їх максимуми (піки) і мінімуми, а такої їхні проміжки монотонності – зростання і спадання.

Наочне порівняння отриманих прогнозних кривих з кривими базового для прогнозування періоду показує задовільну точність передачі ними трендових коливань динаміки електроспоживання. Однак, візуальні висновки не можуть бути достатніми для обґрунтування достовірності прогнозів. При наявності фактичних даних для оцінювання точності розрахованих прогнозів потрібне використання кількісних методів.

Науковці пропонують кілька таких методів, серед яких розрахунок абсолютних і відносних показників. Слід зауважити, що абсолютні показники оцінювання точності прогнозів залежать від розмірності первинних даних, в той час як відносні показники є безрозмірними чи виражаються у відсотках. Тому для цієї процедури краще використовувати відносні показники, на основі значення яких можна з впевненістю стверджувати, що якість отриманого прогнозу висока, добра, задовільна чи незадовільна.

На основі отриманих прогнозних і фактичних значень нами розраховано два показники: середню похибку апроксимації (МАРЕ) [12] і коефіцієнт невідповідності (коефіцієнт Тейла, U) [9]. Оскільки побудована нами для прогнозування погодинного електроспоживання модель гармонійного аналізу для січня 2025 р. включає шість гармонік, а перший місяць цього року, для якого модель прогнозування включає п'ять гармонік і для цих місяців є фактичні дані щодо цього споживання, то ми розрахували вказані вище показники точності отриманих прогнозів саме для цих місяців. В результаті, для січня величини цих показників відповідно становили 11,3 % і 0,052, а для квітня – 9,8 % і 0,051, що вказує на досить добру (майже високу) точність отриманих нами прогнозів. Тобто метод гармонійного аналізу доцільно використовувати для прогнозування погодинного електроспоживання і точність отриманих прогнозних значень буде досить доброю.

| Годинна доба | Січень | Лютий | Березень | Квітень | Травень | Червень | Липень | Серпень | Вересень | Жовтень | Листопад | Грудень |
|--------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|---------|
| 01:00 | 2360,36 | 2035,72 | 2082,73 | 1943,05 | 1783,45 | 1650,73 | 1719,31 | 1647,06 | 1536,88 | 1778,95 | 1903,71 | 2183,86 |
| 02:00 | 2137,39 | 1864,81 | 1947,03 | 1746,44 | 1556,56 | 1393,68 | 1472,07 | 1469,30 | 1384,80 | 1608,67 | 1741,58 | 1987,39 |
| 03:00 | 2043,98 | 1787,53 | 1877,67 | 1657,96 | 1489,59 | 1323,45 | 1399,89 | 1405,06 | 1312,24 | 1523,30 | 1680,72 | 1913,39 |
| 04:00 | 2022,55 | 1761,71 | 1828,15 | 1603,68 | 1435,24 | 1286,42 | 1358,49 | 1348,25 | 1275,71 | 1477,33 | 1658,96 | 1897,84 |
| 05:00 | 2017,78 | 1762,79 | 1819,59 | 1588,82 | 1396,70 | 1247,22 | 1315,17 | 1318,45 | 1260,96 | 1468,31 | 1651,30 | 1897,33 |
| 06:00 | 2080,32 | 1846,74 | 1934,87 | 1676,58 | 1495,11 | 1323,73 | 1377,63 | 1394,91 | 1329,91 | 1558,70 | 1734,35 | 1972,64 |
| 07:00 | 2314,30 | 2101,55 | 2239,50 | 1938,98 | 1788,02 | 1579,14 | 1606,43 | 1615,04 | 1582,93 | 1820,61 | 1999,96 | 2217,61 |
| 08:00 | 2723,61 | 2519,48 | 2691,25 | 2365,93 | 2200,59 | 1934,67 | 1941,11 | 1952,49 | 1994,69 | 2234,82 | 2413,98 | 2617,25 |
| 09:00 | 3160,90 | 2950,42 | 3133,68 | 2800,63 | 2586,06 | 2270,17 | 2281,49 | 2310,90 | 2367,89 | 2654,76 | 2807,49 | 3022,40 |
| 10:00 | 3454,38 | 3217,04 | 3402,13 | 3049,22 | 2815,33 | 2500,72 | 2540,70 | 2553,45 | 2537,82 | 2904,41 | 3025,78 | 3279,37 |
| 11:00 | 3556,75 | 3270,35 | 3450,97 | 3077,43 | 2859,84 | 2586,73 | 2660,53 | 2621,98 | 2542,63 | 2928,04 | 3058,29 | 3357,32 |
| 12:00 | 3543,85 | 3206,94 | 3373,76 | 3015,53 | 2810,50 | 2564,09 | 2662,34 | 2602,71 | 2512,37 | 2829,13 | 3004,81 | 3333,81 |
| 13:00 | 3497,94 | 3141,27 | 3295,41 | 2967,34 | 2773,79 | 2530,76 | 2640,36 | 2604,23 | 2490,79 | 2750,38 | 2947,35 | 3288,93 |
| 14:00 | 3443,90 | 3099,62 | 3256,28 | 2923,43 | 2758,70 | 2534,68 | 2644,46 | 2623,05 | 2460,59 | 2732,62 | 2897,99 | 3252,20 |
| 15:00 | 3395,22 | 3052,26 | 3212,86 | 2865,13 | 2717,24 | 2526,14 | 2631,36 | 2605,72 | 2437,64 | 2713,79 | 2858,10 | 3236,05 |
| 16:00 | 3397,20 | 3006,87 | 3137,96 | 2818,84 | 2653,22 | 2467,87 | 2572,48 | 2564,82 | 2427,77 | 2653,27 | 2865,56 | 3262,43 |
| 17:00 | 3478,65 | 3018,73 | 3085,50 | 2782,62 | 2604,51 | 2403,05 | 2512,00 | 2532,08 | 2386,19 | 2613,06 | 2947,74 | 3328,45 |
| 18:00 | 3586,99 | 3107,90 | 3134,61 | 2733,12 | 2563,57 | 2361,57 | 2469,80 | 2480,52 | 2328,26 | 2688,98 | 3057,95 | 3378,57 |
| 19:00 | 3622,65 | 3207,87 | 3279,67 | 2731,82 | 2526,52 | 2313,53 | 2407,83 | 2411,08 | 2375,58 | 2878,38 | 3103,86 | 3351,56 |
| 20:00 | 3541,23 | 3219,68 | 3400,67 | 2873,46 | 2570,06 | 2279,23 | 2350,56 | 2424,17 | 2565,26 | 3048,51 | 3037,58 | 3247,39 |
| 21:00 | 3383,59 | 3098,80 | 3354,93 | 3079,45 | 2731,95 | 2342,19 | 2391,83 | 2557,05 | 2709,52 | 3044,32 | 2884,97 | 3113,28 |
| 22:00 | 3196,24 | 2871,61 | 3096,91 | 3097,26 | 2845,83 | 2458,50 | 2495,02 | 2630,31 | 2588,74 | 2816,41 | 2684,91 | 2964,08 |
| 23:00 | 2966,32 | 2588,17 | 2711,16 | 2792,06 | 2674,44 | 2408,41 | 2444,73 | 2432,73 | 2221,09 | 2445,69 | 2441,63 | 2758,33 |
| 24:00 | 2670,78 | 2293,05 | 2340,06 | 2321,80 | 2227,38 | 2076,34 | 2126,29 | 2017,38 | 1818,40 | 2066,74 | 2161,68 | 2475,53 |

Рис. 5. Теплова карта прогнозованого погодинного споживання електроенергії за місяцями 2025 року (МВт·год)

Джерело: розраховано авторами на основі даних [8]

Висновки та перспективи подальших досліджень. В умовах повномасштабної війни споживання електроенергії зазнає непередбачуваних коливань, зумовлених як зміною поведінки споживачів, так і наслідками атак на енергетичну інфраструктуру. Це створює додаткові виклики для забезпечення стабільності енергосистеми та потребує оперативних механізмів реагування. У такій ситуації особливої ваги набуває прогнозування на погодинному рівні, адже воно дозволяє не лише відстежувати

короткострокові зміни у споживанні, а й завчасно адаптувати роботу системи до можливих ризиків. Такий рівень деталізації сприяє точнішому балансуванню попиту й пропозиції, зниженню ймовірності аварійних перевантажень та підвищенню ефективності планування виробничих потужностей. Крім того, погодинне прогнозування створює основу для впровадження сучасних інструментів енергетичного менеджменту, орієнтованих на гнучкість та швидку адаптацію до зовнішніх загроз. Воно також забезпечує більш раціональний розподіл ресурсів у кризових умовах, що є критично важливим для підтримання енергетичної безпеки держави. Таким чином, прогнозування на погодинному рівні виступає стратегічним інструментом, здатним підвищити стійкість енергосистеми та сприяти ефективному управлінню в умовах воєнної нестабільності.

1. Пімоненко Т.В., Люльов О.В., Зябіна Є.А., Макаренко І.О., Васирина Т.М. Прогнозування структури енергетичного балансу України: питома вага відновлюваних джерел енергії. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2021. №4 (74). С. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2021-74-3>.
2. Матушкін Д.С. Огляд сучасних методів прогнозування сонячної енергії. Аспірантські читання пам'яті професора Артура Праховника, присвячені 75-річчю ІЕЕ: матер. Internet-конф., 10-11 березня 2021. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2021. С. 34-38.
3. Лежнюк П.Д., Шулле Ю.А. Оперативне прогнозування електричних навантажень систем електроспоживання з використанням їх фрактальних властивостей : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2015. 104 с.
4. Грищенко Р. Прогнозування споживання електричної енергії електротехнічних комплексів міської електричної мережі. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Том 1, №3, С. 152-160.
5. Weron R. Electricity Price Forecasting: A Review of the State-of-the-Art with a Look into the Future. *International Journal of Forecasting*. 2014. Vol. 30, Issue 4, pp. 1030-1081.
6. Lee Y., Tay K., Choy Y.: Forecasting electricity consumption using time series model. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 7(4), pp. 218-223. URL: https://www.researchgate.net/publication/3314964-93_Forecasting_Electricity_Consumption_Using_Time_Series_Model (дата звернення: 04.03.2025).
7. Ayub N., Javaid N., Mujeeb S., Zahid M., Khan W.Z., Khattak M. U. Electricity Load Forecasting in Smart Grids Using Support Vector Machine. *Developments in Primatology: Progress and Prospects*. 2019. pp. 1-13.
8. Статистична звітна інформація ТОВ «Тернопільелектропостач» про погодинні фактичні обсяги продажу електричної енергії побутовим споживачам в торгових зонах БуОС та ОЕС України. URL: <https://tero.com.ua/press-center/> (дата звернення: 16.02.2025).
9. Галушак М.П., Галушак О.Я., Кужда Т.І. Прогнозування соціально-економічних процесів: навч. посіб. Тернопіль: ФОП Паляниця, 2021. 160 с.
10. Єлейко В.І., Єлейко О.І., Синицький О.С., Чемерис А.О. Економетричні методи прогнозування. К.: УАДУ, 1998. 116 с.
11. Теплова карта (теплокарта). Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0 (дата звернення: 21.04.2025).
12. Яровий А.Т., Страхов Є.М. Аналіз часових рядів: навч. посіб. Одеса: Освіта України, 2019. 260 с.

References

1. Pimonenko T.V., Liulov O.V., Ziabina Ye.A., Makarenko I.O., Vasylyna T.M. (2021) Prohnozuvannia struktury enerhetychnoho balansu Ukrainy: pytoma vaha

- vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Forecasting the structure of Ukraine's energy balance: the share of renewable energy sources]. *Naukovyi pohliad: ekonomika ta upravlinnia*, 4(74), pp. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2021-74-3>. [in Ukrainian].
2. Matushkin D.S. (2021) Ohliad suchasnykh metodiv prohnozuvannia soniachnoi enerhii [Review of modern methods of solar energy forecasting]. *Aspirantski chytannia pamiati profesora Artura Prakhovnyka, prysviacheni 75-richchiu IEE: mater. Internet-konf.*, 10–11 bereznia 2021. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, IEE, pp. 34–38 [in Ukrainian].
 3. Lezhniuk P.D., Shullie Yu.A. (2015) Operatyvne prohnozuvannia elektrychnykh navantazhen system elektropostachannia z vykorystanniam yikh fraktalnykh vlastyvostei [Operational forecasting of electrical loads of power supply systems using their fractal properties]: monohrafiia. Vinnytsia: VNTU, 104 p. [in Ukrainian].
 4. Hryshchenko R. (2022) Prohnozuvannia spozhyvannia elektrychnoi enerhii elektrotekhnichnykh kompleksiv miskoi elektrychnoi merezhi [Forecasting electricity consumption of electrotechnical complexes of urban electric network]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1(3), pp. 152–160 [in Ukrainian].
 5. Weron R. (2014) Electricity Price Forecasting: A Review of the State-of-the-Art with a Look into the Future. *International Journal of Forecasting*, 30(4), pp. 1030–1081.
 6. Lee Y., Tay K., Choy Y. (2018) Forecasting electricity consumption using time series model. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4), pp. 218–223. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/3314964-93_Forecasting_Electricity_Consumption_Using_Time_Series_Model (accessed 4 March 2025).
 7. Ayub N., Javaid N., Mujeeb S., Zahid M., Khan W. Z., Khattak M. U. (2019) Electricity Load Forecasting in Smart Grids Using Support Vector Machine. *Developments in Primatology: Progress and Prospects*, pp. 1–13.
 8. Statystychna zvitna informatsiia TOV «Ternopilelektropostach» pro pohodnyni faktychni obsiahy prodazhu elektrychnoi enerhii pobutovym spozhyvacham v torhovykh zonakh BuOS ta OES Ukrainy [Statistical reporting information of TOV “Ternopilelektropostach” on hourly actual sales of electricity to household consumers in BuOS and OES trading zones of Ukraine]. Retrieved from <https://tepo.com.ua/press-center/> (accessed 16 February 2025) [in Ukrainian].
 9. Halushchak M.P., Halushchak O.Ya., Kuzhda T.I. (2021) Prohnozuvannia sotsialno-ekonomichnykh protsesiv [Forecasting of socio-economic processes]: navch. posib. Ternopil: FOP Palianytsia, 160 p. [in Ukrainian].
 10. Yeleiko V.I., Yeleiko O.I., Synytskyi O.S., Chemerys A.O. (1998) *Ekonometrychni metody prohnozuvannia* [Econometric forecasting methods]. Kyiv: UADU, 116 p. [in Ukrainian].
 11. Teplova karta (teplokarta) [Heat map]. Wikipediia. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%B0 (accessed 21 April 2025) [in Ukrainian].
 12. Yarovyi A.T., Strakhov Ye. M. (2019) *Analiz chasovykh riadiv* [Time series analysis]: navch. posib. Odesa: Osvita Ukrainy, 260 p. [in Ukrainian].

FORECASTING OF HOURLY ENERGY CONSUMPTION OF THE REGION AS A STRATEGIC TOOL FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY CONSUMPTION MANAGEMENT

Vasyl Pryimak¹, Olga Holubnyk², Sofia Palii³

^{1,2,3}Ivan Franko National University of Lviv, 79008 Lviv,
Prospekt Svobody, 18

¹E-mail: vasy.l.pryymak@lnu.edu.ua; ORCID: 0000-0003-0244-8661

²E-mail: olga.holubnyk@lnu.edu.ua; ORCID: 0000-0003-1211-4614

³E-mail: sofia.palii@lnu.edu.ua

Abstract. In the context of systematic missile and drone attacks on Ukrainian energy infrastructure facilities, increasing the efficiency of electricity use is a key task. The authors determined that comprehensive analysis and forecasting of hourly consumption allow not only to optimize costs and prevent overloading of the power system, but also to increase the efficiency of responding to potential threats. The use of such approaches contributes to more efficient work of system operators, the formation of a flexible tariff policy and the regulation of demand in the electricity market.

The article analyzes the current state and forecasts hourly electricity consumption in the Ternopil region. The study is based on statistical data for 2020–2024, which made it possible to trace the main trends and features of energy consumption in the region. It was found that the consumption structure has a pronounced cyclical nature, with fluctuations during the day and seasonal differences. For a more accurate analysis of the impact of seasonality on the volume of hourly electricity use and the corresponding forecasting, the authors considered these processes separately for each month and the corresponding season. The forecasting was performed using the harmonic analysis method, which ensures the isolation of key trends in the data. The constructed trend models were used to find the forecast of electricity consumption in the Ternopil region for 2025. The obtained forecast values calculated using the constructed model are presented in the form of a heat map. The forecasted values of electricity consumption confirm our assumptions about low volumes of this consumption at night and high volumes during the day, and an increase in this consumption in the winter months. Based on the forecasting, recommendations were proposed to improve the efficiency of energy resource use. The results obtained have practical significance for optimizing the energy policy of the region, and forecasting at the hourly level is a strategic tool that can increase the stability of the energy system and contribute to effective management in conditions of military instability.

Keywords: energy consumption, forecasting, harmonic analysis, Fourier polynomial, cyclic oscillations, management.

Стаття надійшла до редколегії 30.04.2025

Прийнята до друку 25.06.2025

Опублікована (оприлюднена) 09.07.2025