

УДК 004.4

DOI <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-15>

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПРИВАТНИМИ ДОМОГОСПОДАРСТВАМИ

Ксенич А. І., к.т.н., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна. <https://orcid.org/0009-0007-6569-951X>, andrii.ksenych@nuing.edu.ua

Анотація. У статті розглянуто актуальну проблему переходу на відновлювані джерела енергії в Україні, зокрема, в умовах військового стану, коли централізована енергосистема зазнає значного навантаження й пошкоджень. В умовах енергетичної нестабільності все більше приватних домогосподарств установлюють автономні сонячні електростанції (АСЕС) як джерело безперебійного живлення. Однак генерація електроенергії АСЕС, що має переважно денний профіль, не завжди відповідає нерівномірному добовому споживанню енергії споживачами, що породжує проблему узгодження попиту і пропозиції. Метою дослідження є розроблення підходу до прогнозування добової нерівномірності споживання електроенергії приватним домогосподарством з використанням інструментів штучного інтелекту, зокрема штучних нейронних мереж (ШНМ), реалізованих на основі бібліотеки Keras. Здійснено комплексний аналіз закономірностей електроспоживання на основі статистичних даних реального приватного домогосподарства за певний період. Розглянуто три варіанти класифікації добової нерівномірності, для кожного з них проведено математичне моделювання та розрахунок середньоквадратичної похибки прогнозування, що дало змогу оцінити точність обраних моделей. Результати показали, що найменша похибка прогнозу досягається при аналізі закономірностей у розрізі окремих днів тижня, про що свідчить наявність чітко вираженої поведінкової моделі споживання. У процесі дослідження обрано оптимальну архітектуру нейромережі, методи її навчання й параметри моделі, які забезпечують високу точність прогнозування. Запропонований підхід дає змогу формувати обґрунтовані прогнози щодо споживання електроенергії, що може бути використано як для підвищення енергоефективності домогосподарств, так і для оптимізації роботи автономних енергосистем і систем накопичення енергії. Результати дослідження мають практичну цінність для власників АСЕС, розробників систем «розумного дому» й учасників енергетичного ринку, що працюють у сфері децентралізованого енергопостачання.

Ключові слова: штучні нейронні мережі, Keras, автономні сонячні електростанції, електроспоживання.

USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO PREDICT ELECTRICITY CONSUMPTION BY PRIVATE HOUSEHOLDS

Andrii Ksenych, Ph.D., Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine. <https://orcid.org/0009-0007-6569-951X>, andrii.ksenych@nuing.edu.ua

Abstract. The article considers the current problem of switching to renewable energy sources in Ukraine, in particular under martial law, when the centralized power system is experiencing significant load and damage. In conditions of energy instability, more and more private households are installing autonomous solar power plants (ASPPs) as a source of uninterrupted power supply. However, the generation of electricity by the ACES, which has a predominantly daily profile, does not always correspond to the uneven daily energy consumption by consumers, which creates the problem of matching supply and demand. The aim of the study is to develop an approach to forecasting the daily unevenness of electricity consumption by a private household using artificial intelligence tools, in particular artificial neural networks (ANNs), implemented on the basis of the Keras library. The article provides a comprehensive analysis of electricity consumption patterns based on statistical data from a real private household for a certain period. Three options for classifying daily unevenness are considered, and for each of them mathematical modeling and calculation of the mean square error of prediction are carried out, which made it possible to assess the accuracy of the selected models. The results showed that the smallest forecast error is achieved when analyzing patterns in the context of individual days of the week, as evidenced by the presence of a clearly expressed behavioral consumption model. In the process of research, the optimal architecture of the neural network, its training methods and model parameters were selected, which ensure high accuracy of prediction. The proposed approach allows to form reasonable forecasts of electricity consumption, which can be used both to increase the energy efficiency of households and to optimize the operation of autonomous power systems and energy storage systems. The results of the research have practical value for owners of ACES, developers of "smart home" systems and energy market participants working in the field of decentralized energy supply.

Key words: artificial neural networks, Keras, autonomous solar power plants, electricity consumption.

Вступ

У більшості країн світу в останнє десятиліття спостерігається чіткий тренд енергетичної трансформації в бік зеленої генерації. Наприклад, у Європі впровадження відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ), таких як сонячна енергія, є основою для досягнення цілей Європейського зеленого курсу, зокрема скорочення викидів парникових газів на 55% до 2030 року й досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [1]. Україна також слідує трендам розвитку сонячної генерації та інших ВДЕ, і це набуває особливого значення в умовах війни з росією, яка систематично знищує елементи критичної енергетичної інфраструктури. У цьому контексті все більше українців встановлюють автономні сонячні електростанції (далі – АСЕС) для своїх домогосподарств.

Порівнюючи переваги АСЕС з тими, що працюють за «зеленим тарифом», можна виділити низку основних:

- незалежність від енергомережі. СЕС за «зеленим тарифом» працюють лише за умови підключення до центральної мережі. У разі відключень електроенергії через обстріли чи аварії ці системи автоматично припиняють генерацію. АСЕС з акумуляторами забезпечує безперервну подачу енергії;
- акумулювання енергії для власних потреб. АСЕС оснащені системами зберігання енергії (акумуляторами), що дає змогу накопичувати енергію, вироблену вдень, і використовувати її вночі чи під час відсутності сонця;
- стійкість до війни та криз. В умовах знищення об'єктів енергетичної інфраструктури держава може обмежувати викуп електроенергії за «зеленим тарифом». АСЕС дає змогу уникнути залежності від таких обмежень;
- екологічна й енергетична безпека. Використання автономних СЕС зменшує навантаження на національну енергосистему, що сприяє стабілізації та безпеці її роботи в умовах криз.

Поряд із суттєвими перевагами автономні СЕС мають і низку недоліків. Зокрема, така електростанція генерує електроенергію нерівномірно, залежно від часу доби, погодних умов і пори року. Основна ж проблема полягає в невідповідності між генерацією енергії та її споживанням домогосподарством. Наведемо два основні виклики, з якими стикаються власники автономних СЕС:

- надлишок електроенергії вдень. У денний час, коли сонячна генерація є найвищою, виробляється значна кількість електроенергії, часто більше, ніж потрібно для поточного споживання домогосподарства. Якщо в цей час акумуляторні батареї заповнені, надлишок енергії не може бути ефективно використаний або збережений, що призводить до її втрати;
- недостатня генерація в похмурну погоду чи в нічний час. У похмурну погоду обсяг генерації електроенергії є кратно менший, ніж у сонячну, а в нічний час генерація відсутня повністю, тому домогосподарство змушене використовувати енергію, накопичену в акумуляторах протягом дня. Якщо батареї розряджені, може виникнути дефіцит енергії, особливо в умовах підвищеного вечірнього споживання (опалення, освітлення, побутові прилади).

Усунути ці недоліки можна шляхом підвищення ємності систем зберігання електроенергії в поєднанні з використанням систем розумного будинку (Smart Home) для оптимізації споживання електроенергії та її оптимального перерозподілу протягом дня.

Виконання досліджень

Огляд доступних систем розумних будинків, таких як Home Assistant та OpenHAB, показав, що оптимізація споживання електроенергії реалізується користувачем шляхом прописування певних правил та умов, за якими енергосистема будинку змінює свій режим роботи [2; 3]. При цьому ці правила закладаються, виходячи з аналізу обсягу й нерівномірності споживання електроенергії протягом дня, тижня чи місяця. Таким чином, чим достовірніше можна спрогнозувати обсяги споживання та генерації електроенергії в розрізі дня чи тижня, тим ефективніше її можна буде використати й оптимально перерозподілити в зазначеному часовому проміжку.

Аналізуючи часові закономірності, які впливають на величину споживання електроенергії типовим домогосподарством, можемо виділити ключові:

- добова нерівномірність зумовлена закономірностями поведінки споживачів протягом доби (ранкові та вечірні піки споживання, які чергуються з денними й нічними спадами);
 - тижнева нерівномірність. Зазвичай у будні дні сумарне споживання є меншим, оскільки більшість мешканців працює поза домом. У вихідні дні загальний рівень споживання є вищим у зв'язку з більшою активністю використання побутових приладів удома;
 - місячна нерівномірність. Тут насамперед варто виділити сезонність – зимою споживання є більшим через опалення і триваліший період роботи освітлення, літом є зростання споживання через кондиціювання повітря, а весна/осінь має найнижче середнє споживання, оскільки менша потреба в кліматичному обладнанні. Також на зміну патернів споживання впливає наявність святкових днів і канікул.
- Існує й безліч інших факторів, які впливають на обсяг і нерівномірність споживання енергії приватним будинком. Їх вплив і врахування шляхом математичного моделювання є недоцільним, оскільки часто вони мають випадковий характер і не піддаються моделюванню з достатньою вірогідністю.

У роботі пропонується використання нейронних мереж для прогнозування величини споживання електроенергії окремим домогосподарством.

Шляхом досліджень встановлено, що середнє годинне споживання електроенергії протягом дня, залежно від місяця, тижня, дня й години, може бути прогнозовано з високою достовірністю нейронною мережею, яка має конфігурацію, представлену на рисунку 1.

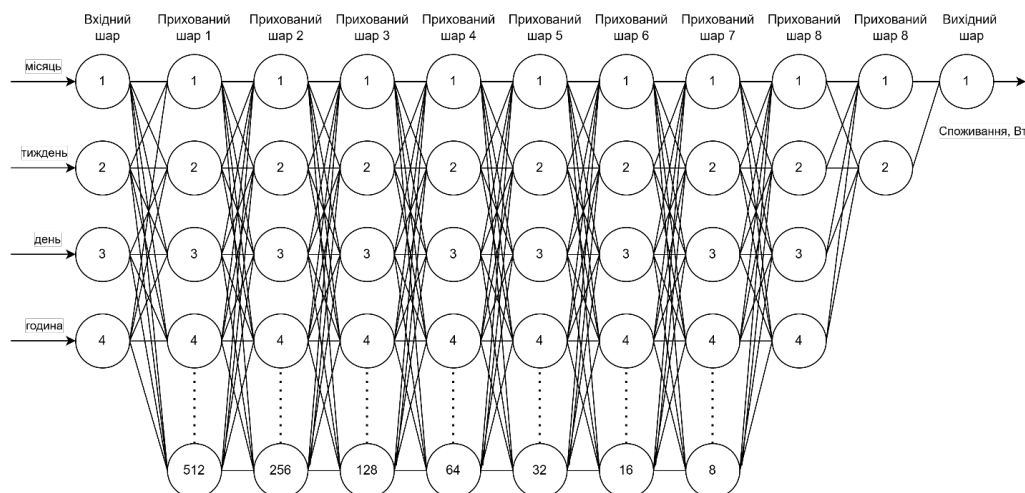


Рис. 1. Конфігурація нейронної мережі для прогнозування добової нерівномірності споживання електроенергії протягом місяця

Нейронна мережа має такі параметри:

- кількість шарів – 11 (вхідний, вихідний, 8 прихованих);
- функція активації для прихованих шарів – relu ;
- алгоритм навчання – метод зворотного поширення помилки;
- кількість епох (циклів) навчання – 50000.

Для реалізації та навчання цієї моделі вибрано бібліотеку Keras, оскільки це високорівнева бібліотека для машинного навчання, яка працює поверх бібліотеки TensorFlow [4]. Вона надає зручний і зрозумілий інтерфейс для створення та тренування нейронних мереж.

Апробація моделі проведена на основі даних споживання реального домогосподарства, обладнаного автономною СЕС і розташованого в м. Івано-Франківську, Україна. За основу взято споживання електроенергії протягом грудня місяця 2024 р.

Закономірність споживання визначено шляхом аналізу й математичного моделювання для трьох варіантів нерівномірності:

- добова нерівномірність порівняно з усередненою добовою протягом місяця;
- добова нерівномірність у розрізі усередненої для певного дня тижня;
- добова нерівномірність у розрізі усередненої для будніх днів (понеділок-п'ятниця) і вихідних (субота-неділя) днів тижня.

Відхилення прогнозування добової нерівномірності визначено шляхом обчислення середньоквадратичної похибки за такою формулою:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2, \quad (1)$$

де n – кількість точок, шт; Y_i – реальне годинне споживання, Вт/год; Y'_i – усереднене споживання, Вт/год.

За результатами дослідження встановлено, що для наведеного домогосподарства найменша квадратична похибка відповідає добовій нерівномірності для певного дня тижня, оскільки вона є найбільш вираженою протягом досліджуваного місяця. Тому саме цей варіант усереднених величин енерговитратності будинку в подальшому використаний для навчання штучної нейронної мережі й наведений графічно на рисунку 2.

Шляхом моделювання та навчання отримано нейронну мережу, яка з високою достовірністю прогнозує середньогодинне споживання електроенергії для досліджуваного домогосподарства. Як приклад, на рисунку 3 подано результати порівняння отриманих значень для одного дня – понеділка.

Як видно з рисунка 3, прогнозоване значення з високою достовірністю збігається з реальним споживанням на всьому часовому проміжку доби, оскільки середньоквадратичне відхилення для цього варіанта становить менше ніж 5 (Вт·год)². Аналогічна картина й для інших днів тижня. Це свідчить про те, що запропонована архітектура нейромережі, методи її навчання й параметри моделі забезпечують високу точність прогнозування добової нерівномірності споживання електроенергії приватним домогосподарством.

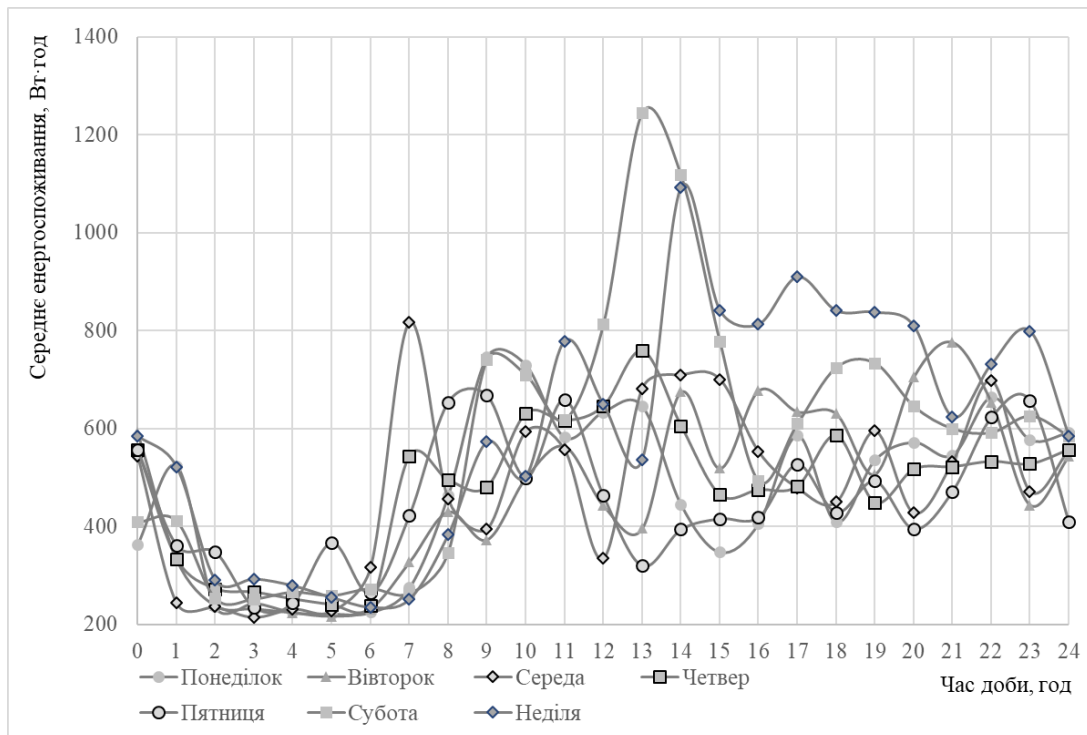


Рис. 2. Результати усередненого енергоспоживання приватного будинку протягом доби в розрізі днів тижня

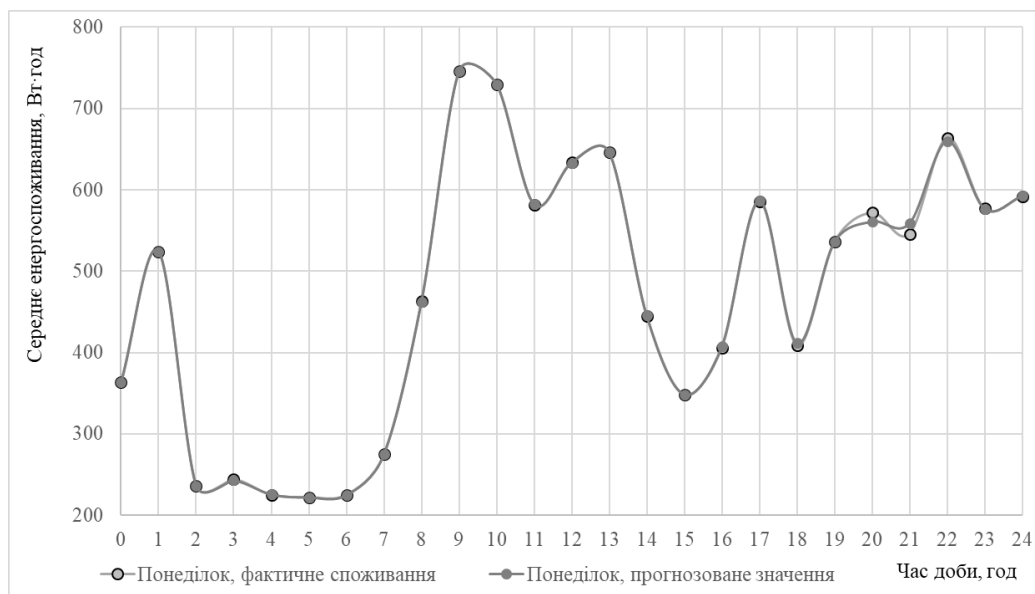


Рис. 3. Результати порівняння фактичних і прогнозованих нейромережею значень середнього енергоспоживання будинку для дня тижня – понеділка

Висновок

У ході дослідження розроблено й апробовано підхід до прогнозування добової нерівномірності енергоспоживання приватного домогосподарства з використанням штучних нейронних мереж. Зокрема, встановлено конфігурацію, методи та параметри навчання штучної нейронної мережі, яка з високою достовірністю прогнозує усереднене споживання електроенергії приватним домогосподарством на основі статистичних даних споживання за минулий час. Найвища точність такого прогнозування досягнута при класифікації споживання в розрізі днів тижня, що свідчить про вплив споживчих

звичок домогосподарств і необхідність урахування цього чинника при розробці моделей. Отримані результати підтвердили ефективність застосування інструментів штучного інтелекту, зокрема бібліотеки Keras, для моделювання складних поведінкових закономірностей енергоспоживання.

Запропонований підхід має практичну значущість в умовах енергетичної нестабільності, зумовленої військовими діями в Україні, і дає змогу більш ефективно інтегрувати автономні сонячні електростанції в енергетичну систему домогосподарств. Достовірне прогнозування споживання дає можливість краще оптимізувати роботу систем накопичення енергії, підвищити рівень енергоефективності й забезпечити безперебійне енергопостачання в критичних умовах.

Література

1. Учасники проєктів Вікімедіа. Європейський зелений курс – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Європейський_зелений_курс (дата звернення: 30.01.2025).
2. Documentation. *Home Assistant*. URL: <https://www.home-assistant.io/docs/> (дата звернення: 30.01.2025).
3. Introduction. *openHAB*. URL: <https://www.openhab.org/docs/> (дата звернення: 30.01.2025).
4. Keras documentation: Keras 3 API documentation. *Keras: Deep Learning for humans*. URL: <https://keras.io/api/> (дата звернення: 30.01.2025).

References

1. Wikimedia project participants. European Green Deal – Wikipedia. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/European_Green_Deal (accessed: 01.30.2025).
2. Documentation. *Home Assistant*. URL: <https://www.home-assistant.io/docs/> (accessed: 01.30.2025).
3. Introduction. *openHAB*. URL: <https://www.openhab.org/docs/> (accessed: 01.30.2025).
4. Keras documentation: Keras 3 API documentation. *Keras: Deep Learning for humans*. URL: <https://keras.io/api/> (accessed: 01.30.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.05.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 10.06.2025
Дата публікації: 25.07.2025