



Світове господарство і міжнародні економічні відносини

УДК 338.27:339.137.2:620.9

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.18164129>

**Прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної
конкурентоспроможності підприємств електроенергетики в умовах
невизначеності**

Гавриш Олег Анатолійович,

доктор технічних наук, професор, професор кафедри міжнародної
економіки, Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-1961-3267>

Зробок Олексій Олегович,

аспірант, Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-8595-8546>

Прийнято: 17.12.2025 | Опубліковано: 31.12.2025

***Анотація:** Метою дослідження є узагальнення науково-методичних засад та проведення прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України в умовах невизначеності. Для досягнення поставленої мети під час проведення дослідження використано такі методи, як огляд наукової літератури, кореляційно-регресійний аналіз, аналіз і прогнозування часових рядів. Також проведено економіко-математичне моделювання та системний аналіз чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності*



підприємств електроенергетики України в умовах невизначеності. За результатами проведеного дослідження встановлено, що основними такими чинниками є рівень спотових цін на РДН (ринку «на добу наперед»), обсяг попиту на електроенергію (заявленого обсягу купівлі), обсяг продажу електроенергії (як індикатор тенденцій її споживання), обсяг виробництва електроенергії в сусідніх країнах (на прикладі Польщі). Дослідження показало, часові ряди погодинних значень перших трьох чинників та чвертьгодинних значень останнього чинника при їх аналізі у річних масштабах демонструють високий ступінь волатильності та варіації, що унеможливорює застосування регресійних моделей для їх прогнозування. Попри це обрані чинники демонструють яскраво виражену сезонність. Результати дослідження продемонстрували, що обрані чинники мають низьке значення відносної ентропії, і останнє було обраховано як від'ємний логарифм добутку коефіцієнтів автокореляції, які для перших та сезонних лагів демонстрували високе значення. При обчисленні коефіцієнтів автокореляції виявлено, що прогнозовані чинники мають перший ступінь невизначеності – достатньо прогнозоване майбутнє. Саме тому для прогнозування в умовах невизначеності було застосовано модель $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$, яка враховує сезонність та автокореляцію. У результаті побудови прогнозів за цією моделлю отримано такі значення MAPE для кожного чинника: 12,3%, 5,8%, 10,1% та 2,5% відповідно. Основним теоретико-методичним внеском дослідження є обґрунтування доцільності застосування моделі SARIMA як оптимальної для прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики в умовах невизначеності з огляду на їхню добову сезонність та наявність в цілому тісної автокореляції з першими трьома лаговими змінними. Науковою новизною дослідження є те, що вперше запропоновано формулу для обчислення відносної ентропії часового ряду як від'ємного двійкового



логарифму добутку коефіцієнтів автокореляції з лаговими змінними з метою використання її як індикатора для вибору оптимальних методів, підходів та моделей для прогнозування в умовах невизначеності.

Ключові слова: міжнародна конкурентоспроможність, РДН (ринок «на добу наперед»), спотові ціни, попит, продаж, виробництво електроенергії, відносна ентропія, SARIMA, сезонність, коефіцієнт автокореляції.

Forecasting factors for increasing the level of international competitiveness of electric power enterprises in conditions of uncertainty

Oleg Gavrysh,

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of International Economics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-1961-3267>

Oleksii Zrobok,

Postgraduate, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-8595-8546>

Abstract: *The purpose of the study is to generalize scientific and methodological principles and forecast the factors of increasing the level of international competitiveness of Ukrainian electric power enterprises in conditions of uncertainty. To achieve the set goal, the following methods were used during the study: review of scientific literature, correlation-regression analysis, analysis and forecasting of time series. Economic and mathematical modelling and systematic analysis of the factors of increasing the level of international competitiveness of Ukrainian electric power enterprises in conditions of uncertainty were also carried out. According to the results of the study, it was found that the main such factors are*



the level of spot prices on the DAM (day-ahead market), the volume of electricity demand (declared purchase volume), the volume of electricity sales (as an indicator of trends in its consumption), the volume of electricity production in neighbouring countries (for example, Poland). The study showed that the time series of hourly values of the first three factors and the quarter-hourly values of the last factor, when analysed on an annual scale, demonstrate a high degree of volatility and variation, which makes it impossible to use regression models for their forecasting. Despite this, the selected factors demonstrate pronounced seasonality. The results of the study showed that the selected factors have a low value of relative entropy, and the latter was calculated as the negative logarithm of the product of the autocorrelation coefficients, which for the first and seasonal lags demonstrated a high value. When calculating the autocorrelation coefficients, it was found that the predicted factors have the first degree of uncertainty – sufficiently predicted future. That is why the $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)s$ model was used for forecasting under uncertainty, which takes into account seasonality and autocorrelation. As a result of building forecasts using this model, the following MAPE values were obtained for each factor: 12.3%, 5.8%, 10.1% and 2.5%, respectively. The main theoretical and methodological contribution of the study is the justification of the feasibility of using the SARIMA model as optimal for forecasting factors for increasing the level of international competitiveness of electric power enterprises under conditions of uncertainty, given their daily seasonality and the presence of a generally close autocorrelation with the first three lag variables. The scientific novelty of the study is that for the first time a formula has been proposed for calculating the relative entropy of a time series as the negative binary logarithm of the product of the autocorrelation coefficients with lag variables in order to use it as an indicator for choosing optimal methods, approaches and models for forecasting under conditions of uncertainty.



Keywords: *international competitiveness, DAM (day-ahead market), spot prices, demand, sales, electricity production, relative entropy, SARIMA, seasonality, autocorrelation coefficient.*

Постановка проблеми. Після приєднання Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ) до ENTSO-E у березні 2022 р. розширилися можливості експорту та імпорту електроенергії між Україною та сусідніми країнами Європи (Польщею, Словаччиною, Угорщиною, Румунією, Молдовою). Однак, через те, що це приєднання співпало з початком повномасштабного російського вторгнення в Україну, підприємства електроенергетики, які задіяні в міжнародній торгівлі електроенергією, зіткнулися з невизначеністю. В її умовах прогнозування стає складним завданням, оскільки невизначеність має прямий взаємозв'язок із непередбачуваністю. Особливо актуальним у контексті інтеграції до ENTSO-E для підприємств електроенергетики є прогнозування чинників підвищення рівня їхньої міжнародної конкурентоспроможності як спроможності конкурувати за розподіл пропускної спроможності міждержавних перетинів для експорту та імпорту електроенергії. Наявність якісної моделі прогнозу, що враховує невизначеність, є необхідною умовою для формування оптимальної конкурентної стратегії підприємств електроенергетики на оптовому ринку розподілу пропускної спроможності міждержавних інтерконекторів щодо експорту та імпорту електроенергії. Її реалізація дозволить їм адаптуватися до умов невизначеності, що має також важливе значення для стійкого розвитку всієї національної економіки, оскільки електроенергетика є її системоутворюючою галуззю, надаючи електроенергію для її функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові праці вчених здебільшого присвячені прогнозуванню таких ключових чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики:



спотових цін на ринку електроенергії; обсягу попиту на електроенергію; обсягів споживання електроенергії; обсягів виробництва електроенергії.

Спочатку проведемо огляд останніх досліджень і публікацій, які присвячені прогнозуванню першого чинника у наведеному вище списку. Так, Ш. Тегерані зі співавторами (S. Tehrani et al.) [1] провели незалежний прогноз для кожного з 24-годинних часових рядів спотових цін на електроенергію, щоб нейтралізувати чинник сезонності та отримати стаціонарні часові ряди. Також зазначені вчені виявили, що моделі GARCH мають значно нижчі похибки прогнозу, ніж модель авторегресивної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA). Ю. Го зі співавторами (Y. Guo et al.) [2] застосували, зокрема, метод сезонної авторегресивної інтегрованої ковзної середньої (SARIMA) разом з методом довгої короткострокової пам'яті (LSTM) для короткострокового прогнозування цін на електроенергію. М. Легна зі співавторами (M. Lehna et al.) [3] для прогнозування цін на електроенергію на ринку «на добу наперед» на додаток до (S)ARIMA(X) та LSTM використали згорткову нейронну мережу LSTM (CNN-LSTM) та розширений двоетапний багатовимірний векторний авторегресивний підхід (VAR) як гібридні моделі. Ц. Сюе зі співавторами (J. Xue et al.) [4] використали модель ARIMA для прогнозування індексу цін на електроенергію. Ц. Лі зі співавторами (J. Li et al.) [5] провели прогноз цін на електроенергію на основі моделі SARIMA з фіксуванням короткострокових та сезонних коливань цін.

Другий чинник підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики, який досліджувався вченими, – обсяг попиту на електроенергію. Зокрема, Р. Лузя зі співавторами (R. Luzia et al.) [6] визначили, що для прогнозування попиту на електроенергію модель ARIMA з перетворенням Фур'є має найкраще наближення для місячних часових рядів, а ARIMA з вейвлет-перетворенням має найкраще наближення для середньо- та довгострокових періодів. Т. Г. Грандón зі співавторами (T. G. Grandón et al.) [7]



застосували регресійну модель, модель ARIMA-LSTM та модель (S)ARMA відповідно для прогнозування довго-, середньо- та короткострокового споживання електроенергії з річною, денною та погодинною роздільною здатністю. Ж. Су зі співавторами (Z. Su et al.) [8] використали модель ARIMA для прогнозування тренду щомісячного попиту на електроенергію в поєднанні з рекурентними нейронними мережами (RNN) для врахування періодичності. Вчені також підкреслили, що запропонована гібридна модель показала кращу точність, ніж модель SARIMA та метод помилок-трендів-сезонів (ETS). Вчені М. Е. Яванмард та С.Ф. Гадері (M. E. Javanmard & S.F. Ghaderi) [9] представили інтегрований підхід до прогнозування попиту на енергію, у т.ч. на електроенергію, із застосуванням різних моделей прогнозування, таких як, зокрема, AR, ARIMA, SARIMA, SARIMAX та LSTM.

Третій чинник підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики – обсяги споживання електроенергії. Так, стосовно цього чинника А.А. П'єр зі співавторами (A. A. Pierre et al.) [10] виявили, що гібридна модель ARIMA-LSTM є більш точною для прогнозування пікового споживання електроенергії, ніж застосування цих моделей окремо. Дослідники Е. Чаглаян-Акай та К. Х. Топал (E. Çağlayan-Akay & K. H. Toral) [11] поєднали для прогнозування обсягів споживання електроенергії як моделі прогнозування часових рядів SARIMA машинного навчання ANN та MLP. Вчені А. Сарандж та М. Золфагарі (A. Saranj & M. Zolfaghari) [12] також використали гібридний метод для прогнозування обсягів споживання електроенергії, який, зокрема, включає модель авторегресивної інтегрованої ковзної середньої з пояснювальною змінною (ARIMAX).

Четвертий чинник підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики – це обсяги виробництва електроенергії. Наведемо аналіз праць декількох дослідників, які досліджували прогнозування цього чинника. С. Ду зі співавторами (X. Du et



al.) [13] для прогнозування щомісячного виробництва електроенергії з вітрової та сонячної енергії в Китаї застосували модель підгонки поверхні – сезонної авторегресивної інтегрованої ковзної середньої – SF-SARIMA (Surface Fitting-Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average). С. Го зі співавторами (X. Guo et al.) [14] представили інноваційну адаптацію методів сірого прогнозування UNAGO-GM для прогнозування виробництва електроенергії з вітру, демонструючи її вищу ефективність порівняно з моделями ARIMA та LSTM. Вчені М. Зольфагарі та М. Р. Голабі (M. Zolfaghari & M. R. Golabi) [15] для оцінки прогностичної сили гібридної моделі прогнозування AWT-LSTM-RF порівняли її результати прогнозування обсягів електроенергії в гідроенергетиці з еталонними моделями, включаючи ARIMA-GARCH.

Зіставлення результатів описаних та проаналізованих вище підходів до прогнозування дозволило виявити, що для погодинних даних, якщо важливо враховувати гетероскедастичність, то перевагу має модель GARCH, а якщо сезонність, то модель SARIMA. При цьому модель ARIMA є релевантнішою для середньодобових та місячних даних, як у Р. Лузія зі співавторами (R. Luzia et al.) [6], Ж. Су зі співавторами (Z. Su et al.) [8] та С. Ду зі співавторами (X. Du et al.) [13]. Т. Г. Грандón зі співавторами (T. G. Grandón et al.) [7] підкреслюють, що модель ARIMA точніша саме для середньострокового прогнозу, тоді як для довгострокового більш придатною є регресійна модель, а для короткострокового – сезонна авторегресивна модель. Основним недоліком наведених вище наукових праць є те, що запропоновані більшістю авторів гібридні моделі з використанням методів машинного навчання на додаток до одиничних авторегресивних потребують значних розрахунків, застосування мов програмування та наявності потужного процесора. Водночас основною науковою прогалиною є те, що наведені вище вчені не запропонували саме оптимального наукового підходу до прогнозування, тобто такого, який при його застосуванні давав би максимальну точність



прогнозування при мінімальних затратах часу та ресурсів на розрахункові операції. Оскільки підприємство прагне до мінімізації витрат при одночасній максимізації прибутку, то використання моделі SARIMA на базі програмного забезпечення MS Excel з огляду на наявність погодинних даних з яскраво вираженою сезонністю для чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності є оптимальним, особливо для малих підприємств.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Можна виділити декілька невирішених питань у межах досліджуваної проблеми. По-перше, зазначеними вище вченими не було кількісно оцінено сам ступінь невизначеності досліджуваних чинників для його врахування при виборі оптимальної прогнозовної моделі, що обумовлює необхідність проведення цього оцінювання через показник відносної ентропії. По-друге, перелічені вище вчені не проводили системне дослідження групи чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є вироблення науково-методичних засад та розробка економіко-математичних моделей прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України в умовах невизначеності. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- 1) сформулювати науково-методичний підхід до прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики;
- 2) здійснити збір статистичних даних, які стосуються обраних чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України;
- 3) оцінити ступінь невизначеності та побудувати економіко-математичні моделі прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України.



Виклад основного матеріалу дослідження. Науково-методичний підхід до прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики базується на використанні моделі SARIMA. Вона базується на моделі ARIMA. Суть моделі $ARIMA(p,d,q)$ (авторегресивної інтегрованої ковзної середньої) полягає у диференціюванні часового ряду (знаходження різниці між наступним та попереднім значеннями) для усунення нестационарності (що виникає внаслідок наявності сезонності та тренду), а також в обчисленні коефіцієнтів автокореляції часового ряду з лаговими змінними. Модель використовує три параметри: p – кількість лагових змінних (часових затримок, авторегресійних членів AR), d – кількість разів віднімання наступного значення з попереднім, або ступінь диференціації I , q – порядок моделі ковзного середнього MA . Модель ARIMA є несезонною. У моделі $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$ додаються ще такі ж аналогічні три параметри, але для врахування сезонних періодів, наприклад, доба для погодинних даних ($s = 24$). У цій моделі додаткові сезонні терміни множаться на несезонні терміни [16].

Для того, щоб побудувати ці моделі, необхідно, щоб часовий ряд був стаціонарним. Для перевірки часового ряду на стаціонарність пропонуємо застосувати розширений тест Дікі-Фуллера (для процесів $AR(p)$). Цей тест має три типи: тип 0 – нульове середнє, немає тренду; тип 1 – є середнє, без тренду; тип 2 – є середнє та тренд. Цей тест можна провести за допомогою функції ADFTEST [17] програмного забезпечення Real Statistics Resource Pack [18], яке інсталується як надбудова в MS Excel. У цій же надбудові є інструменти часових рядів (Time Series Tools).

Другий крок – збір статистичних даних чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України. Його було здійснено за допомогою порталу Energy Map аналітичного центру DiXi Group. На цьому порталі було взято статистичні дані з результатів



торгів на РДН з 24 лютого 2022 року, коли відбулася синхронізація ОЕС-У з ENTSO-E. Ці дані стосуються перших трьох чинників: спотових цін на ринку електроенергії; обсягу попиту на електроенергію (на основі індикатору заявленого обсягу купівлі електроенергії); обсягів споживання електроенергії (на основі індикатору фактичного обсягу купівлі/продажу електроенергії) [19]. Статистичні дані для четвертого чинника – обсягів виробництва електроенергії – взято на онлайн-порталі Energy-Charts. Оскільки дані щодо обсягів виробництва електроенергії в Україні недоступні через військовий стан, було взято 15-ти хвилинні дані за останній рік сусідньої країни – Польщі (адже падіння обсягів виробництва електроенергії в сусідній країні підвищує попит на її імпорт, зокрема з України) [20].

Отже, на рис. 1 представимо динаміку погодинних спотових цін на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р. (у звичайному році, що дорівнює 365 дням, 8760 годин) [19].

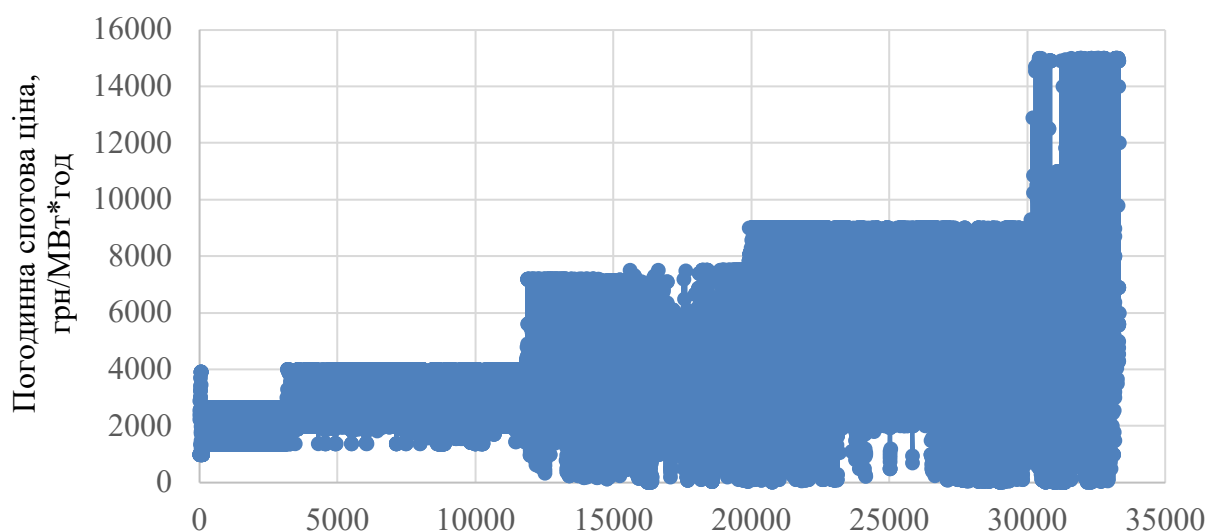


Рис. 1. Динаміка погодинних спотових цін на електроенергію на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р., грн/МВт*год

Джерело: [19]

З рис. 1 видно, що погодинні спотові ціни на електроенергію на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р. демонструвала дуже високу



волатильність, коливаючись від 10 грн/МВт*год, починаючи з 2023 р., до 15000 грн/МВт*год у 2025 р. При середньому значенні вибірки 3994,6 грн/МВт*год різниця між максимальним та мінімальним значеннями перевищує її в 3,8 разів. Коефіцієнт варіації (відношення стандартного відхилення до середнього арифметичного) для цього часового ряду дорівнює 59,7%, що свідчить про високу неоднорідність даних. Окрім цього, для цього часового ряду характерна гетероскедастичність, адже дисперсія значно зросла в др. пол. 2025 р. (3593,0 порівняно з 2386,3 за весь аналізований період).

На рис. 2 зображено динаміку погодинного попиту на електроенергію (заявленого обсягу купівлі) з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р. [19].

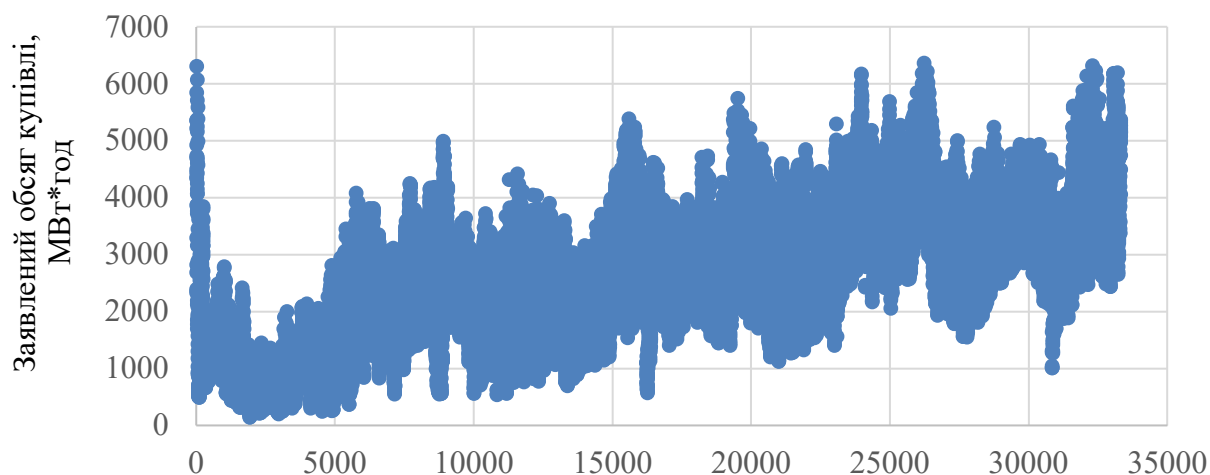


Рис. 2. Динаміка погодинного заявленого обсягу купівлі електроенергії на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р., МВт*год

Джерело: [19]

На рис. 2 також можна також побачити високу волатильність часового ряду, але значно меншу, ніж на рис. 1. Також значно меншою є гетероскедастичність. Коефіцієнт варіації також нижчий (43,4%).

На рис. 3 представлено динаміку погодинного обсягу продажу електроенергії, на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р. [19]. Графік практично повторює попередній, але є певні відмінності в ті години, коли попит перевищував пропозицію (спостерігався дефіцит електроенергії).



Особливо це помітно на двох останніх верхніх піках. Саме по обсягу продажу електроенергії можна визначити тенденції щодо її споживання.

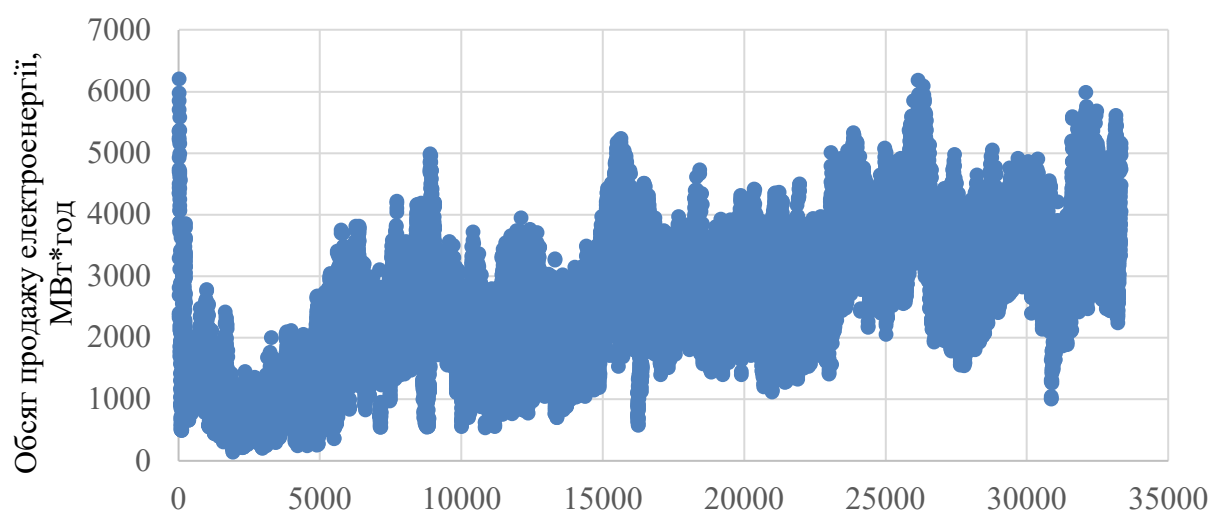


Рис. 3. Динаміка погодинного обсягу продажу електроенергії, на РДН в Україні з 24 лютого 2022 р. по 12 грудня 2025 р., МВт*год

Джерело: [19]

На рис. 4 наведено динаміку обсягів виробництва електроенергії в Польщі з інтервалом 15 хв. у 2025 р. [20].

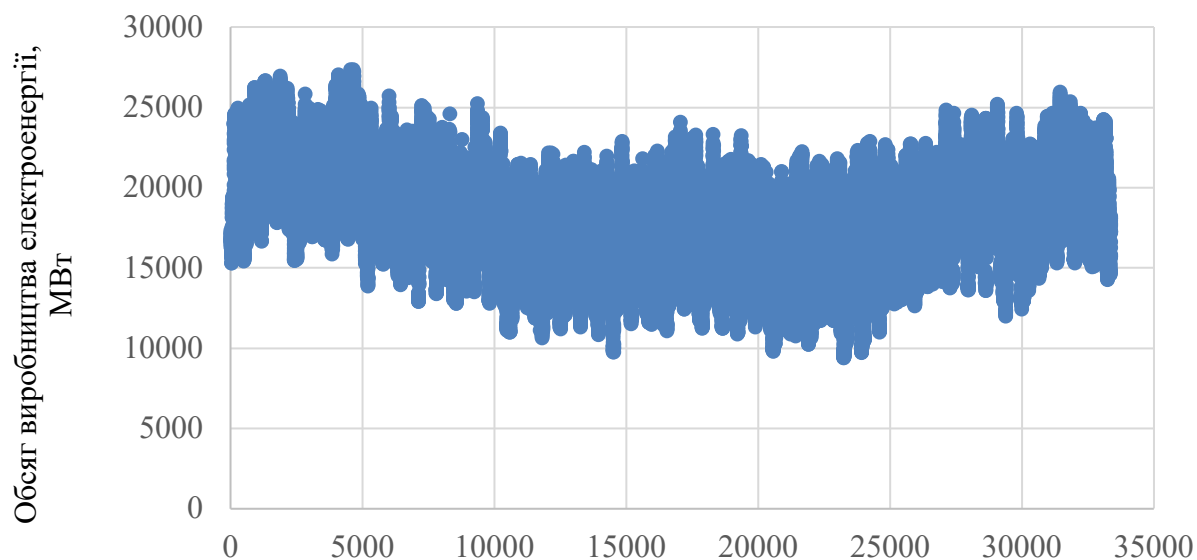


Рис. 4. Динаміка чвертьгодинних обсягів виробництва електроенергії в Польщі за 1 січня – пер. пол. 14 грудня 2025 р.

Джерело: [20]



Як видно з рис. 4, для обсягів виробництва електроенергії в Польщі характерна гомоскедастичність та чітка добова сезонність. Для обсягів виробництва характерний спад, який досяг піку наприкінці літа 2025 р., чим тоді скористалася Україна для нарощування експорту.

В цілому проведений за допомогою програмного забезпечення Real Statistics Resource Pack розширений тест Дікі-Фуллера показав, що всі чотири проаналізованих часових ряди є стаціонарними. Для першого та четвертого часового рядів був застосований I тип тесту (ненульове середнє, без тренду), а для другого та третього – II тип (ненульове середнє та тренд). Саме тому значення d та D в моделі $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s$ приймемо за нуль.

Третій крок – оцінювання ступеню невизначеності та побудова економіко-математичних моделей прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України. Г. Кортні, Дж. Кіркланд та П. Вігері (Н. Courtney, J. Kirkland, P. Viguerie) [21, с. 5-6] виділяють чотири ступені невизначеності майбутнього: достатньо чітке майбутнє, альтернативне майбутнє, діапазонне майбутнє, неоднозначне майбутнє. Пропонуємо формалізувати ступінь невизначеності чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України за виведеною формулою (1):

$$H(f) = -\log_2 \prod_{i=1}^n AR_i, \quad (1)$$

де $H(f)$ – відносна інформаційна ентропія чинників, біт; $\prod$ – символ Похгаммера для позначення оператора добутку; AR_i – коефіцієнти автокореляції кількістю від 1 до n : $n = 3+2$: для 1-го – 3-го лагів відповідно, а також для 24-го та 96-го сезонних лагів.

У табл. 1 представлено результати обчислення значень ступеня невизначеності обраних чинників за формулою (1) [19-20].



Таблиця 1

Ступені невизначеності чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України

Назва чинника	AR_1	AR_2	AR_3	AR_{24}	AR_{96}	$H(f)$, біт
Ціна на РДН	0,89	0,72	0,52	0,9	0,83	2,0
Попит на електроенергію	0,97	0,91	0,84	0,95	0,88	0,69
Обсяги продажу електроенергії	0,97	0,92	0,85	0,95	0,88	0,67
Обсяги виробництва електроенергії в сусідній країні	0,99	0,98	0,97	0,42	0,81	1,63

Джерело: власна розробка авторів на основі [19-20]

Як видно з табл. 1, найвищий ступінь невизначеності має такий чинник, як ціна на РДН, а найнижчий – обсяги продажу електроенергії, за якими опосередковано можна побачити тенденцію до її споживання. У цілому, можна припустити, що значення інформаційної ентропії чинників відповідають першому ступеню невизначеності «Достатньо прогнозоване майбутнє», оскільки більшість коефіцієнтів автокореляції більші за 0,8. Оскільки для усіх чинників сезонні лаги (24 для перших трьох та 96 та четвертого) мають високе значення коефіцієнтів автокореляції, то модель SARIMA оптимально підходить для їхнього прогнозування.

Далі представимо результати короткострокового прогнозування на основі побудованої економіко-математичної моделі SARIMA погодинних спотових цін на електроенергію, заявленого обсяг купівлі електроенергії (попиту), обсягу продажу електроенергії на РДН в Україні на 13-14 грудня 2025 р. (48 год.) та обсягів виробництва електроенергії в Польщі на др. пол. 14 грудня у порівнянні з фактичними значеннями представлено на рис. 5-8 [19-20]. Для обраних чинників було побудовано прогноз за першою лаговою змінною (яка має найвищий коефіцієнт автокореляції), з нульовим порядком моделі ковзного середнього та нульовим ступенем диференціації.

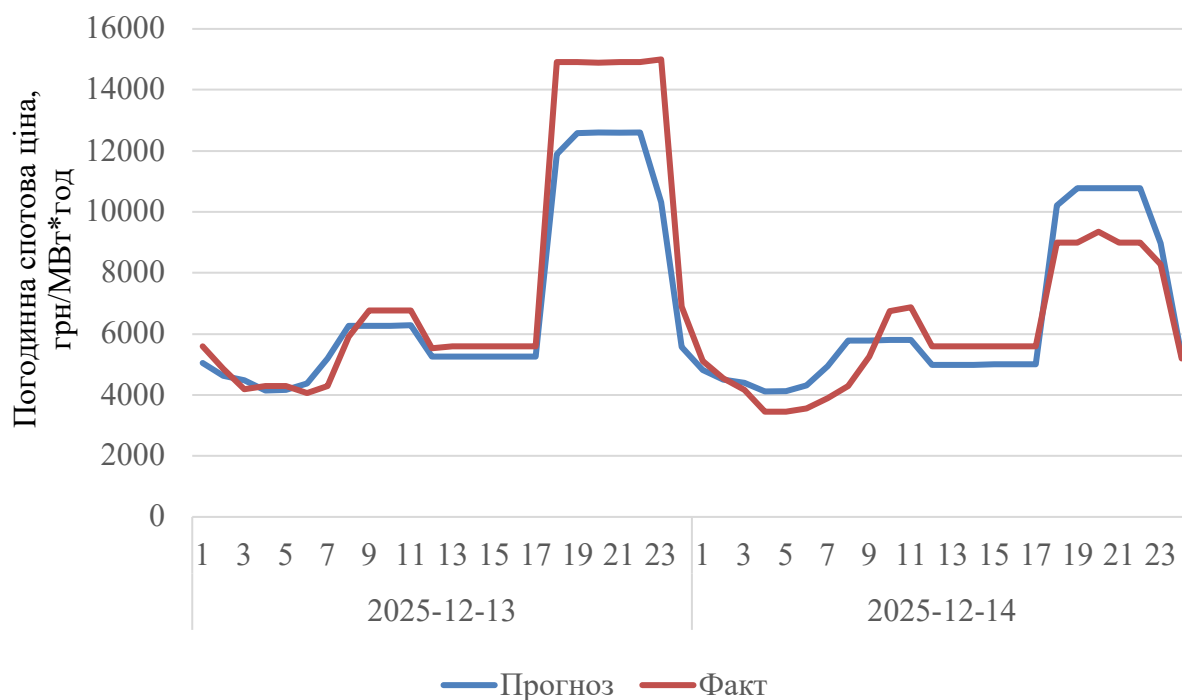


Рис. 5. Прогнозні та фактичні значення погодинних спотових цін на електроенергію на РДН в Україні на 13-14 грудня 2025 р.

Джерело: [19]

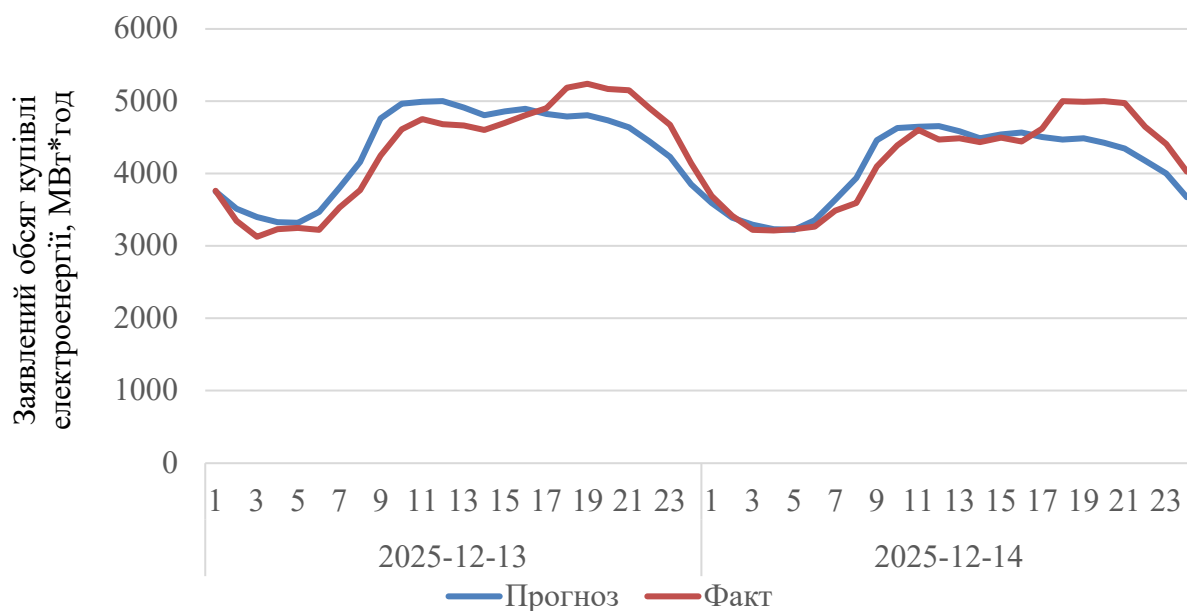


Рис. 6. Прогнозні та фактичні значення погодинних заявлених обсягів купівлі електроенергії (попиту) на РДН в Україні на 13-14 грудня 2025 р.

Джерело: [19]

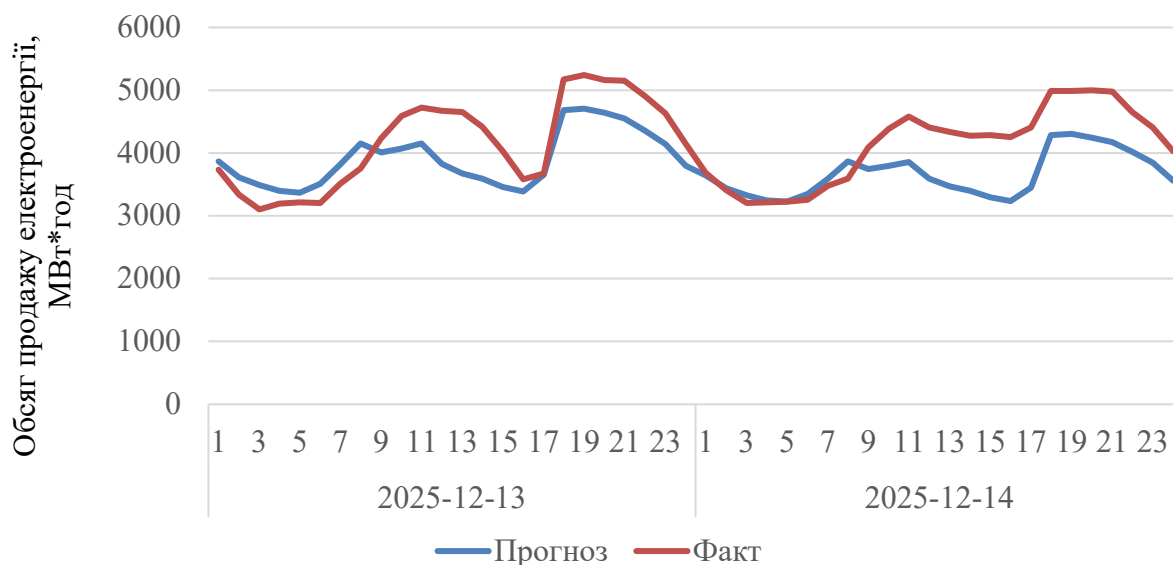


Рис. 7. Прогнозні та фактичні значення погодинних обсягів продажу електроенергії на РДН в Україні на 13-14 грудня 2025 р.

Джерело: [19]

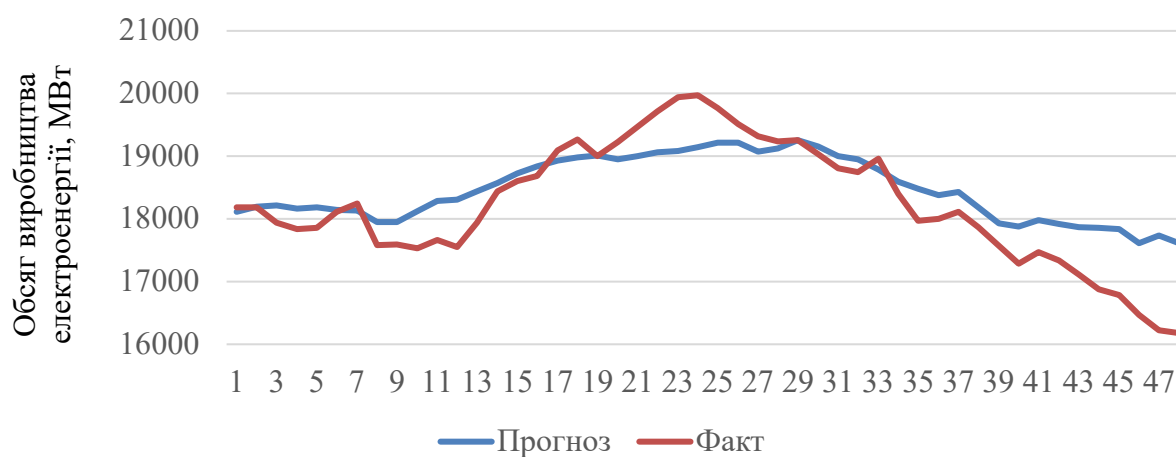


Рис. 8. Прогнозні та фактичні значення чвертьгодинних обсягів виробництва електроенергії в Польщі на др. пол. 14 грудня 2025 р.

Джерело: [20]

Як бачимо з рис. 5-8, побудовані моделі мають високий ступінь точності: МАРЕ дорівнює 12,3%, 5,8%, 10,1% та 2,5% відповідно. Значення менше 15% стали можливими через короткостроковість проведеного



прогнозу. Водночас не виявлено кореляції між значенням відносної ентропії та значенням MAPE, хоча обидва показники лежать у низькому діапазоні. З цього випливає, що результати дослідження демонструють певні методологічні обмеження запропонованого підходу до обчислення відносної ентропії як індикатора для вибору оптимального інструменту прогнозування, а саме: підхід до обрахунку відносної ентропії обмежується декількома лаговими змінними для обчислення коефіцієнтів автокореляції, але збільшення кількості лагових змінних потребуватиме збільшення обсягів розрахунків; обчислення парних коефіцієнтів автокореляції замість часткових не видаляє вплив проміжних лагів, однак для обчислення останніх також потрібен значно більших обсяг розрахунків.

Що стосується можливостей масштабування запропонованої моделі SARIMA на середньо- (місяць) та довгострокові (рік) горизонти, то через відсутність вираженої сезонності на таких часових проміжках застосування цієї моделі є недоцільним, а натомість оптимальним є застосування гібридної моделі ARIMA-LSTM для середньострокового прогнозування та моделей множинної регресії із використанням методів машинного навчання для довгострокового прогнозування.

Висновки. У результаті прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України в умовах невизначеності зроблено такі висновки.

1. У результаті огляду науково-методичних підходів до прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики обрано прогнозну модель SARIMA з урахуванням того, що для динаміки показників функціонування сфери електроенергетики характерний високий рівень сезонності, особливо добової.

2. На основі збору статистичних даних, які стосуються обраних чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств



електроенергетики України, побудовано графіки погодинної динаміки спотових цін на РДН, обсягів попиту та продажу, а також графік чвертьгодинної динаміки обсягів виробництва електроенергії в Польщі. Під час аналізу побудованих графіків зроблено висновок про значний ступінь волатильності та неоднорідності отриманих даних і, водночас, добову сезонність їхньої динаміки, яка значно мінімізує невизначеність.

3. У результаті оцінювання ступеню невизначеності чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України зроблено висновок, що обрані чинники мають низький рівень невизначеності (достатньо прогнозоване майбутнє) завдяки високим значенням коефіцієнтів автокореляції перших трьох та сезонних (24-го та 96-го) лагів. На основі побудови економіко-математичних моделей $SARIMA(1,0,0)(1,0,0)_s$ (s дорівнює 24 для перших трьох чинників та 96 для четвертого відповідно) за допомогою Real Statistics Resource Pack отримано короткостроковий прогноз із 48-ма значеннями із 52-х максимально доступних на 2 доби для перших трьох чинників та на 12 годин для останнього чинника. У результаті порівняння прогнозних значень із фактичними на основі MAPE зроблено висновок про високу точність побудованих прогнозів.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що вперше виражено відносну ентропію часового ряду як від'ємний двійковий логарифм добутку коефіцієнтів автокореляції з лаговими змінними, що дозволяє, на відміну від інших підходів, отримати формалізований індикатор для прийняття рішення щодо вибору релевантної та оптимальної моделі прогнозування чинників середовища функціонування підприємства в умовах невизначеності. Основним теоретичним внеском дослідження є обґрунтування релевантності моделі $SARIMA(1,0,0)(1,0,0)_s$ для короткострокового прогнозування чинників підвищення рівня міжнародної конкурентоспроможності підприємств електроенергетики України в умовах невизначеності на основі погодинних та



чвертьгодинних даних, що демонструють виражену сезонність, високий рівень автокореляції з першою та достатньо тісний з другою та третьою лаговими змінними. Перспективами подальших досліджень є застосування методів машинного навчання та нейромереж у поєднанні з моделлю SARIMA для довгострокового прогнозу. Також перспективним є виявлення взаємозв'язку між відносною ентропією часового ряду та MAPE між прогнозним та фактичним його значеннями на основі врахування більшої кількості лагів та побудови для них матриці часткових коефіцієнтів автокореляції.

Список використаних джерел

1. Tehrani S., Juan J., Caro E. Electricity Spot Price Modeling and Forecasting in European Markets. *Energies*. 2022. Vol. 15. № 16. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15165980>.
2. Guo Y., Du Y., Wang P., Tian X., Xu Z., Yang F., Chen L., Wan J. A hybrid forecasting method considering the long-term dependence of day-ahead electricity price series. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110841>.
3. Lehna M., Scheller F., Herwartz H. Forecasting day-ahead electricity prices: A comparison of time series and neural network models taking external regressors into account. *Energy Economics*. 2022. Vol. 106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105742>.
4. Xue J., Ding J., Zhao L., Zhu D., Li L. An option pricing model based on a renewable energy price index. *Energy*. 2022. Vol. 239(B). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122117>.
5. Li J., Xu X., Karimi H. R., Wu Z. Optimization of electric vehicle charging strategies in residential integrated energy systems: A SARIMA model approach for dynamic electricity prices. *Energy*. 2025. Vol. 330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136600>.



6. Luzia R., Rubio L., Velasquez C. E. Sensitivity analysis for forecasting Brazilian electricity demand using artificial neural networks and hybrid models based on Autoregressive Integrated Moving Average. *Energy*. 2023. Vol. 274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127365>.
7. Grandón T. G., Schwenzer J., Steens T., Breuing J. Electricity demand forecasting with hybrid classical statistical and machine learning algorithms: Case study of Ukraine. *Applied Energy*. 2024. Vol. 355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122249>.
8. Su Z., Zhang J., Yang Z., Ma L. A hybrid monthly electricity demand forecasting model combining an Hodrick-Prescott filter, recurrent neural networks, and autoregressive integrated moving average. *Energy and AI*. 2025. Vol. 22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100600>.
9. Javanmard M. E., Ghaderi S. F. Energy demand forecasting in seven sectors by an optimization model based on machine learning algorithms. *Sustainable Cities and Society*. 2023. Vol. 95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104623>.
10. Pierre A. A., Akim S. A., Semenyio A. K., Babiga B. Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches. *Energies*. 2023. Vol 16. № 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124739>.
11. Çağlayan-Akay E., Topal K. H. Forecasting Turkish electricity consumption: A critical analysis of single and hybrid models. *Energy*. 2024. Vol. 305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132115>.
12. Saranj A., Zolfaghari M. The electricity consumption forecast: Adopting a hybrid approach by deep learning and ARIMAX-GARCH models. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.007>.
13. Du X., Lang Z., Liu M., Wu J. Regression analysis and prediction of monthly wind and solar power generation in China. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.07.027>.



14. Guo X., Dang Y., Ding S., Cai Z., Li Y. A new information priority grey prediction model for forecasting wind electricity generation with targeted regional hierarchy. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124199>.
15. Zolfaghari M., Golabi M. R. Modeling and predicting the electricity production in hydropower using conjunction of wavelet transform, long short-term memory and random forest models. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.017>.
16. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. 9.9 Seasonal ARIMA models. *OTexts* : website. URL: <https://otexts.com/fpp3/seasonal-arima.html> (date of access: 16.10.2025).
17. Augmented Dickey-Fuller Test. *Real statistics using Excel* : website. URL: <https://real-statistics.com/time-series-analysis/autoregressive-processes/augmented-dickey-fuller-test/> (date of access: 16.10.2025).
18. Real Statistics Resource Pack. *Real statistics using Excel* : website. URL: <https://real-statistics.com/free-download/real-statistics-resource-pack/> (date of access: 16.10.2025).
19. Результати торгів на РДН. *Energy Map* : вебсайт. URL: <https://energy-map.info/uk/datasets/5a616fba-fbc9-4073-9532-9161592faca8#description> (дата звернення: 16.10.2025).
20. Public net electricity generation in Poland in 2025. *Energy-Charts* : website. URL: https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=en&c=PL&interval=year&legendItems=2wdw5&year=2025&per_unit_consumption=only_production (date of access: 16.10.2025).
21. Courtney H., Kirkland J., Viguerie P. Strategy under uncertainty. *Harvard business review*. 1997. № 75(6). URL: <https://heller.brandeis.edu/executive-education/pdfs/Strategy-Under-Certain.pdf> (date of access: 16.10.2025).