

УДК 621.311.153
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/38>

Калінчик В.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Буравльова М.Т.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Калінчик В.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скосирев В.Г.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ГЕНЕРАЦІЇ І ВАРТОСТІ ОТРИМАНОЇ ЕНЕРГІЇ

У статті досліджуються методи прогнозування в енергетиці. Показано, що прогнозування в енергетиці є одним із завдань енергетичного моніторингу ефективності енергоспоживання. Також це основний складник для формулювання стратегій і енергетичних законів. Проведено аналіз процесів генерації енергії в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України різними джерелами енергії, як традиційними, так і відновлювальними. Показано, що задача прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового планування, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Проведено огляд та аналіз існуючих методів прогнозування, які застосовуються в енергетиці. Приведена класифікація методів прогнозування. Показано, що основними вимогами, які висувають до прогнозних моделей, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів. Показано, що з точки зору простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги до методу прогнозування на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування.

Обґрунтовано застосування адаптивних моделей Хольта-Вінтерса для прогнозування енергетичних і фінансових показників. Метод заснований на тому, що досліджуваний часовий ряд може бути представлений у вигляді трьох компонентів: базової компоненти, лінії тренду і сезонного ефекту. Приведені результати прогнозування генерації електроенергії в ОЕС України та результати прогнозування генерації електроенергії відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ) України за моделлю Хольта-Вінтерса. Зроблена оцінка та порівняльний аналіз тенденцій розвитку енергетики України.

Ключові слова: об'єднана енергосистема, генерація, електроспоживання, відновлювані джерела енергії, генерація, прогнозування, метод Хольта-Вінтерса.

Постановка проблеми. Ефективне функціонування економіки можливе за умови прогнозування і планування її розвитку й ефективної системи управління народним господарством. Прогнозування в енергетиці є одним із завдань енергетичного моніторингу ефективності енергоспоживання. Також це основний складник для формулювання стратегій і енергетичних законів.

Завдання прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового плану-

вання, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Прогнозування ціни відіграє ключову роль в електроенергетичній галузі, ринкові ціни дуже впливають на рішення про інвестування нових об'єктів генерації в довгостроковій перспективі. Всі гравці ринку повинні знати майбутні ціни на електроенергію, оскільки їх прибутковість залежить від генеруючих компаній, великих промислових споживачів або інвесторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно [1] функціонування економіки буде ефек-

тивним за умови прогнозування і планування її розвитку. Прогнозування в енергетиці є одним із основних завдань. Значна частина (понад 50%) [2] паливних ресурсів використовується саме для виробництва електричної енергії. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває завдання прогнозування розвитку енергетичного комплексу, причому таке прогнозування цікаве не тільки з позиції регіональної економіки, але і з позицій найбільших енергетичних підприємств. Прогнозування майбутніх значень часового ряду на основі його історичних значень в енергетиці є основою для фінансового планування, управління та оптимізації обсягів виробництва енергії і контролю.

Залежно від часу упередження – горизонту часу, на який необхідно визначити значення часового ряду, завдання прогнозування поділяються на такі категорії:

- 1) довгострокове прогнозування;
- 2) середньострокове прогнозування;
- 3) короткострокове прогнозування.

Натепер налічується більше 100 класів моделей прогнозування [3]. При чому частина моделей і відповідних методів належать до окремих підходів прогнозування. Всі методи прогнозування поділяються на дві групи: інтуїтивні та формалізовані [4].

Інтуїтивне прогнозування застосовується в тих завданнях, коли об'єкт прогнозування або занадто простий, або дуже складний, тому не можливо врахувати вплив зовнішніх факторів. Відмінною рисою інтуїтивних методів прогнозування є те, що вони відображають тільки індивідуальні судження фахівців щодо можливих варіантів розвитку процесу і тому не припускають можливості розробки моделей прогнозування. Зазвичай методи цієї групи використовуються для аналізу процесів, розвиток яких не піддається математичній формалізації, для яких важко розробити відповідну прогнозу модель. До інтуїтивних методів належать методи історичних аналогій, експертних оцінок, передбачення за зразком [4].

Формалізовані методи можуть бути розділені на статистичні та структурні моделі прогнозування. Суть статистичних моделей полягає в тому, що аналітично задаються як зовнішні фактори, так і функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду. Статистичні моделі представлені такими групами:

1) *регресійні моделі*. В роботах [5-7] регресійні моделі застосовані для прогнозування електричного навантаження енергосистеми, виробничих об'єктів і будівель;

2) *авторегресійні моделі*. Цей метод використовується для короткострокового прогнозування електроспоживання в оперативному циклі з інтервалом попередження 5÷10 хвилин в роботах [8-9];

3) *моделі експоненціального згладжування*. Ці моделі були розроблені незалежно Хольтом і Брауном всередині ХХ століття [10-12]. Метод експоненціального згладжування використовується в роботах [13; 14] для прогнозування річного електроспоживання промислових підприємств, енергосистем. Завдання прогнозування річного обсягу генерації енергії ВДЕ в роботах [15; 16] також вирішене за допомогою моделі експоненціального згладжування.

Моделі, в яких функціональна залежність між майбутніми та фактичними значеннями часового ряду, як і зовнішніми факторами, задана структурно, належать до групи структурних моделей. Вони представлені такими групами як нейромережеві моделі, моделі на базі ланцюгів Маркова, моделі на базі класифікаційно-регресійних дерев. У роботі [17] модель використовується для оцінки втрат потужності та електроенергії в електричних мережах енергосистеми на основі нейротехнологій. Автор роботи [18] застосовує нейромережеві алгоритми для короткострокового прогнозування навантаження центральної електроенергетичної системи країни. Автори роботи [19] розглядається як короткострокове, так і довгострокове прогнозування навантаження по енергосистемі загалом.

Основними вимогами, які висувають до прогнозних моделей, є досить висока точність прогнозування і простота алгоритмів, що забезпечує мінімальний час вирішення і обсяг пам'яті системи; робота в умовах невизначеної і недостатньої інформації; забезпечення стійкості управління.

Метою роботи є підвищення ефективності енергопостачання регіонів України за рахунок удосконалення методів прогнозування тенденцій розвитку енергетичного комплексу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори проводять аналіз та порівняння розглянутих методів прогнозування. Дані порівняння зведені в таблиці.

Переваги тих чи інших методів прогнозування визначаються в основному часовими характеристиками програм і точністю прогнозів. При цьому можна показати, що експоненціальне згладжування, метод авторегресії для одновимірних процесів зводяться один до іншого і можна знайти відповідні співвідношення між дисперсією шуму динаміки в моделі авторегресії і параметром згладжування в методі експоненціального згладжування. Тому точність названих методів навряд чи буде істотно відрізнятися. Тим часом з точки зору

простоти реалізації, часу розрахунку, з огляду на вимоги, які висуваються до методу прогнозування, на перше місце слід поставити адаптивні методи прогнозування, зокрема модель Хольта-Вінтерса.

Часові ряди енергетичних, економічних показників містять періодичні сезонні коливання. Такі ряди можуть бути описані моделями двох типів – з мультиплікативними (1) та адитивними коефіцієнтами сезонності (2):

$$y_t = a_t \cdot f_t + e_t, \quad (1)$$

$$y_t = a_t \cdot g_t + e_t, \quad (2)$$

де a_t – характеристика тенденції розвитку,
 $g_t, g_{t-1}, \dots, g_{t-e+1}$ – адитивні коефіцієнти сезонності,
 $f_t, f_{t-1}, \dots, f_{t-e+1}$ – мультиплікативні коефіцієнти сезонності,
 e – кількість фаз у повному сезонному циклі,
 e_t – випадкова компонента з нульовим математичним очікуванням [20].

Модель Хольта-Вінтерса [21] або потрійне експоненціальне згладжування застосовується для процесів, які мають тренд і сезонний складник. Метод Хольта-Вінтерса заснований на тому, що досліджуваний часовий ряд може бути представлений у вигляді трьох компонент: базової компоненти, лінії тренду і сезонного ефекту. Алгоритм передбачає, що кожна з цих компонент змінюється в часі. До змінних значень кожної з компонент

застосовується експоненціальне згладжування.

Як і в методі експоненціального згладжування, прогноз на наступний період обчислюється застосуванням до поточного значення прогнозу коефіцієнтів α, β, γ . Такі коефіцієнти визначаються параметрами моделі і можуть приймати значення в межах від 0 до 1. При більш високих значеннях коефіцієнтів минулі значення компоненти враховуються більше, ніж поточні, а при більш низьких найбільший вплив на прогноз справляють поточні значення компонент [22]. Прогноз є сумою всіх трьох компонент:

$$\hat{y}_{t+1} = a_t + b_t + c_{t+1-m}, \quad (3)$$

де a_t – базова компонента,
 b_t – лінія тренду,
 c_t – сезонний ефект,
 m – період сезону (цикл).

Нова оцінка базового компоненту є її поточне значення скориговані з урахуванням значення сезонного коефіцієнту. Оскільки нове значення базової компоненти залежить від змін лінії тренду, прогноз тренду додається до коефіцієнта базової лінії:

$$a_t = \alpha(y_t - c_{t-m}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}), \quad (4)$$

Нова оцінка тренду є різницею між новим і старим значеннями базової компоненти:

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}, \quad (5)$$

Таблиця 1

Порівняння методів прогнозування

Моделі	Врахування тренду	Прозорість	Здатність моделювати нелінійні процеси	Адаптивність	Гнучкість
Лінійна регресійна	+ -	+	-	-	+
Множинна регресійна	+ -	+	-	-	+
Нелінійна регресійна	+ -	+	-	-	+
Групового врахування аргументів	+ +	-	+	+	+
Авторегресійна ковзного середнього	+ -	+	-	-	+
Експоненціального згладжування	-	+	+	+	-
Хольта	+ -	+	+	+	-
Хольта-Вінтерса	+ +	+	+	+	-

Нова оцінка сезонного компонента є різницею між його поточним значенням і базовою компонентою:

$$c_t = \gamma(y_t - a_t) + (1 - \gamma)b_{t-m}, \quad (6)$$

Формули (4) – (6) використовуються тільки для отримання поточних значень компонент на один часовий інтервал, оскільки ці збережені значення перераховуються кожної ітерації [22].

В першій точці ряду значення базової компоненти і тренду не розраховуються, оскільки для їх розрахунку не існує попередніх експериментальних значень. В другій точці ряду згладжені значення базової компоненти приймається рівним її значенням, а мікротренд за цей період вважається лінійним і розраховується як різниця між поточним і минулим значеннями відгуку [22].

Починаючи з третьої точки, використовуються формули (4) – (6): розраховується згладжені значення базової компоненти по згладженому значенню і мікротренду для минулої точки ряду і відгуку для поточної точки, а потім розраховується новий мікротренд за попереднім значенням і різницею між минулим і тільки що оціненим згладженим значенням. Потім описана процедура повторюється для всіх подальших точок часового ряду.

Прогноз по методу Хольта-Вінтерса на p періодів вперед визначається як [22]:

$$\hat{y}_{t+p} = (a_{t+p} \cdot b_t) \cdot c_{t+p-m}, \quad (7)$$

де \hat{y}_{t+p} – прогноз по методу Хольта-Вінтерса на p періодів вперед,

a_t – базова компонента (експоненціально згладжена величина за останній період),

p – порядковий номер періоду, на який робиться прогноз,

b_t – тренд за останній період,

c_{t+p-m} – коефіцієнт сезонності за цей же період в останньому сезоні.

Прогнозування набору показників ОЕС України. Прогноз генерації електроенергії в ОЕС України

Розрахунки проводилися на підставі даних по електрогенерації, зафіксованих за період січень 2010-грудень 2019 року для Об'єднаної Енергосистеми України.

Використовуючи модель Хольта-Вінтерса розраховані показники експоненціально згладженого ряду, значення тренда, коефіцієнти сезонності, прогноз на 2011-2022 роки, а також помилку моделі, відхилення помилки моделі від прогнозної моделі і точність прогнозу. Помилка прогнозної моделі не перевищує 6%, що підтверджує її адекватність і вказує на доцільність використання методу і розрахунку прогнозних показників.

Прогноз генерації електроенергії в ОЕС України до 2022 року наведений на рисунку 1.

Прогноз генерації відновлювальними (альтернативними) джерелами енергії

За аналогічною схемою складена модель і розраховані прогнозні значення для перерахованих вище показників відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Розрахунки проводилися на підставі даних по енергогенерації відновлювальними джерелами енергії (вітер, сонце та інші) за 2013-2022 роки. Потенціал відновлюваних джерел

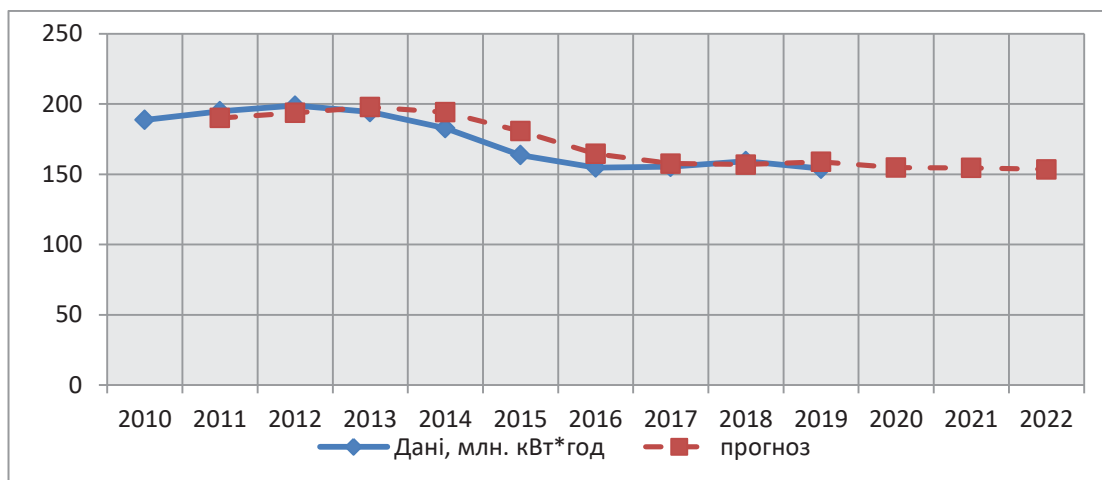


Рис. 1. Результати прогнозування генерації електроенергії в ОЕС України за моделлю Хольта-Вінтерса



Рис. 2. Результати прогнозування генерації електроенергії ВДЕ в Україні за моделлю Хольта-Вінтерса

в Україні дуже великий. Розвиток технологій відновлюваної енергетики та як результат зменшення ціни на установки і вартість отриманої енергії призведе до стійкого зростання використання ВДЕ. Прогноз генерації електроенергії ВДЕ в Україні до 2022 року наведений на рисунку 2.

З огляду на збільшення вартості первинних джерел енергії, фінансову політику країни вартість енергії буде зростати, що підтверджують результати прогнозування вартості енергії для споживачів. Результати дослідження підтверджують світові тенденції розвитку енергетичної галузі: збільшення споживання вторинної енергії, зростання генерації з відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії, скорочення використання викопних видів енергії, а також зростання вартості енергії.

Такі потужні і довгострокові тенденції як індустріалізація, урбанізація і автомобілізація продовжують формувати сучасну економіку енергетичної галузі. Ці тенденції пов'язані з:

- 1) збільшенням обсягу споживаної енергії;
- 2) підвищенням ефективності видобутку і споживання енергії;
- 3) зростаючою диверсифікацією джерел енергії;

4) зростанням споживчого попиту на чисту і зручну енергію.

Світові тенденції вказують, що паливний баланс буде змінюватися повільно через тривалість життєвого циклу активів, але частка природного газу і невикопного палива буде зростати за рахунок вугілля і нафти. Найшвидше зростання буде спостерігатися у відновлюваних джерел енергії [23]. Загалом збільшення споживання буде обмежено зростанням цін на енергоресурси (як і останніми роками), а також триваючим поступовим зниженням субсидій.

Висновки. Основним двигуном розвитку відновлюваної енергетики є реалізація політичних заходів зі скорочення викидів парникових газів, що ґрунтуються на цінах на вуглець і низьковуглецевих технологій. Конкретні аспекти політики визначатимуть енергобаланси.

Результати дослідження показують, що прогнози генерації енергії з вугілля і природного газу мають загальну тенденцію до зменшення, що пов'язано з ростом вартості первинної енергії, впровадженням енергоефективних та енергозберігаючих технологій, а також реалізацією політик, спрямованих на пом'якшення впливу змін клімату та адаптації до цього впливу.

Список літератури:

1. Каменев В.В. Научно-методические подходы к совершенствованию механизмов экономического развития регионов / В.В. Каменев // Культура народов Причерноморья. 2006. № 86. С. 27–30.
2. Енергетичний баланс України за 2011 рік [Електронний ресурс] // Державна служба статистики України. Режим доступу до статистичних даних: www.ukrstat.gov.ua.
3. Тихонов Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка : учебное пособие / Э.Е. Тихонов. Невинномысск : Северо-Кавказский ГТУ, 2006. 221 с. ISBN 5895710778.

4. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия : дис. канд. тех. наук: 05.13.18 / Чучуева И.А. Москва, 2012. 153 с.
5. Винославский В.Н. Прогнозирование электропотребления производственных объектов / В.Н. Винославский, А.В. Праховник, А.Ф. Бондаренко // Энергетика и электрификация. 1974. № 5. С. 30–31.
6. Лапинский Г.С. Однофакторные регрессионные модели прогнозирования электропотребления промышленных предприятий / Г.С. Лапинский, З.Р. Майрансаев // Известия ЮФУ, 2013. № 5. С. 241–246.
7. Freire R.Z. Development of regression equations for predicting energy and hygrothermal performance of buildings / Roberto Z. Freire, Gustavo H.C. Oliveira, Nathan Mendes // Energy and Buildings. 2008. № 40. P. 810–820.
8. Валь П.В. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода / П.В. Валь, А.С. Торопов // Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск : ТПУ, 2010. С. 23–24.
9. Праховник А.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий / А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев. М. : Недра, 1985. 232 с.
10. Brown R.G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series / R.G. Brown // Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
11. Brown R.G. The fundamental theorem of exponential smoothing / R.G. Brown, R.F. Meyer // Operation research. 1961. Vol. 9. № 5. P. 673–685.
12. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages / C.C. Holt // O.N.R. Memorandum 52, Carnegie Inst. of Technology. 1957. № 2.
13. Надтока И.И. Развитие теории и методов моделирования и прогнозирования электропотребления на основе данных средств автоматизации учета и телеизмерений : дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Надтока И.И. Новочеркасск, 1998. 346 с.
14. Bindiu R. Day-Ahead Load Forecasting Using Exponential Smoothing / R. Bindiu, Dr. Eng. M. Chindri, G.V. Pop // Scientific Bulletin of the Petru Maior University of Tirgu Mures. Vol. 6. 2009. P. 89–93.
15. Прогнозирование показателей энергопотребления, генерации и стоимости полученной энергии / Калинин В.П., Кокорина М.Т. НТУУ «КПИ» Н.-й ин-т автоматики и энергетики «Энергия». Киев, 2013. 14 с.
16. Fatema Tuz Jhohura An Assessment of Renewable Energy in Bangladesh through ARIMA, Holt's, ARCHGARCH Models / Fatema Tuz Jhohura and Md. Israt Rayhan // Dhaka University Journal of Science, 2012. vol. 60. № 2. P. 159–162.
17. Заиграева Ю.Б. Нейросетевые модели оценки и планирования потерь электроэнергии в электрических системах : автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. тех. наук: спец. 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы» / Заиграева Юлия Борисовна; Новосибирский гос. тех. ун-т. Новосибирск, 2008. 20 с.
18. Сухбаатарын Мунхжаргал. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования нагрузки центральной электроэнергетической системы Монголии : дис. канд. тех. наук: 05.14.02 / Сухбаатарын Мунхжаргал. Новосибирск, 2004. 177 с.
19. Шумилова Г.П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Старцева. Сыктывкар : КНЦ УрО РАН, 2008. 78 с.
20. Дуброва Т.А. Статистические методы прогнозирования в экономике / Дуброва Т.А. Моск. гос. ун-т экономики, статистики и информатики. М., 2001. 50 с.
21. Уинтерс П.Р. Прогноз продаж с помощью экспоненциально взвешенных скользящих средних / Уинтерс П.Р. Пер. статьи с англ. из журнала Management Science. 1960. Vol. 6, № 3. С. 324–342.
22. Исхаков С.Ю. Прогнозирование в системе мониторинга локальных сетей / Исхаков С.Ю., Шелупанов А.А., Тимченко С.В. Доклады ТУСУРа, № 1(25), Ч. 2, июнь 2012. С. 101–104.
23. Международное энергетическое агентство. Прогноз развития мировой энергетики. Париж, 2010.

Kalinchyk V.P., Buravlova M.T., Kalinchyk V.V., Skosyrev V.H. FORECASTING OF ENERGY CONSUMPTION, ENERGY GENERATION AND VALUE OF ENERGY RECEIVED

The article explores methods of forecasting in energy industry. It is shown that energy forecasting is one of the tasks of energy monitoring of energy efficiency. It is also a key component in formulating strategies and energy laws. The analysis of energy generation processes in the unified energy system (UES) of Ukraine by different sources of energy, both traditional and renewable. It is shown that the task of forecasting the time series future values based on its past values in the energy sector is the basis for the financial planning, management and optimization of energy production and control.

The review and analysis of the existing forecasting methods used in the energy sector are carried out. The classification of forecasting methods is given. It is shown that the basic requirements for forecasting models are rather high prediction accuracy and simplicity of algorithms. It is shown that, from the point of view of simplicity of realization, time of calculation, in view of the requirements to the forecasting method, adaptive forecasting methods should be put first.

The use of adaptive Holt-Winters models for forecasting energy and financial performance is substantiated. The method is based on the fact that the investigated time series can be represented as three components: the base component, the trend line and the seasonal effect. The results of electricity generation forecasting in the United Energy System of Ukraine and the results of RES generations forecasting in Ukraine by the Holt-Winters model are presented. The estimation and comparative analysis of tendencies of development of energy of Ukraine are made.

Key words: *United Energy System, energy generation, energy consumption, renewable energy, forecasting, Holt-Winters method.*