

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

ДИПЛОМНА РОБОТА
на тему:
**Планування енергоспоживання
підприємствами в умовах роздрібного ринку
електроенергії**

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання
освітнього ступеня «Магістр», освітньо-
професійної програми «Енергетичний
менеджмент» спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____ **Назар РАПАЦЬКИЙ**

Керівник: **канд. економічних наук, доцент**

_____ **Андрій ПЕЧЕНЮК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

«_____» _____ 2023 р.

Керівник проектної групи (гарант
освітньої програми)

«Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

доктор сільськогосподарських наук,
кандидат технічних наук, доцент

_____ **Олег ТКАЧ**

Кам'янець-Подільський, 2023 р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПІДПРИЄМСТВОМ.....	20
1.1 Сучасний рівень розвитку енергетичної галузі в Україні	20
1.2 Проблема прогнозування обсягів електроенергії електротехнічних комплексів.....	32
1.3 Вимоги до методу прогнозування електроспоживання підприємства	36
Висновки до першого розділу:	45
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ.....	47
2.1 Класифікація методів прогнозування електроспоживання	47
2.2 Огляд методів прогнозування електроспоживання.....	50
2.2.1 Екстраполяція ковзної середньої	50
2.2.2 Регресійні методи.....	52
2.2.3 Метод часових рядів.....	54
2.2.4 Експертні методи	55
2.2.5 Методи з використанням ШНМ.....	56
2.2.6 Метод опорних векторів	57
2.2.7 Техноценоз	60
2.2.8 Гібридні методи	60
2.3 Вибір методу прогнозування часових рядів.....	61
Висновки до другого розділу.....	62
РОЗДІЛ 3 ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	64

3.1 Вимоги для вибору методу для прогнозування електроспоживання підприємства.....	65
3.2 Спектральний аналіз ретроспективних даних електроспоживання підприємства	67
3.3 Підготовка вихідних даних для прогнозування електроспоживання підприємства.....	72
3.4 Модель на основі регресійного аналізу	76
3.5 Модель короткострокового прогнозування електроспоживання, заснована на штучній нейронній мережі	84
3.6 Оцінка очікуваного економічного ефекту.....	94
Висновки до третього розділу	95
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ ТА ПЕРСПЕКТИВА ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ	97
4.1 Головні принципи та опис ідеї впровадження досліджуваної моделі.	97
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	98
4.3 Ринковий аналіз можливостей впровадження проєкту.....	99
4.4 Розробка ринкової стратегії проєкту	107
Висновки до четвертого розділу.....	109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОК	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТОК.....	116

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку електроенергетики в Україні спостерігається подвійне явище. З одного боку, ціни на паливно-енергетичні ресурси, необхідні для виробництва електроенергії, зростають. З іншого боку, вартість будівництва електростанцій підвищується внаслідок застосування більш високотехнологічного обладнання, а також через зростаючу строгість вимог до декарбонізації.

Розвиток роздрібного ринку електроенергії створив додаткові економічні можливості для його учасників, що дозволяють їм більш раціонально використовувати ресурси та забезпечувати баланс між виробництвом електроенергії та її споживанням.

В даний час ринок електричної України має модель лібералізованого ринку, яка включає в себе [1-5]:

1. Ринок на добу наперед;
2. Ринок двосторонніх договорів;
3. Балансуючий ринок.
4. Внутрішньодобовий ринок;

Демонополізація ринку електричної енергії регламентується Законом України «Про ринок електричної енергії» №2022-VII від 01 січня 2021 р та планом заходів енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» №497-р від 6 червня 2021 [7, 8].

Уряд України у Постанові №483 від 5 червня 2020 року «Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії» визначає обсяг та умови виконання спеціальних обов'язків, що покладені на НАЕК «Енергоатом» та ПрАТ «Укргідроенерго», для забезпечення суспільних інтересів під час функціонування ринку електричної енергії. Ці обов'язки включають, зокрема, надання послуг з забезпечення раціональної ціни на електричну енергію для побутових споживачів, забезпечення відповідної якості та доступності електричної енергії, а також підтримку належного рівня безпеки постачання електричної енергії споживачам без загрози першочерговій меті створення повноцінного ринку електричної енергії, заснованого на засадах вільної конкуренції з дотриманням принципів прозорості та недискримінації [9].

Відповідно до Постанови уряду України від 14.03.2021 р. №308 «Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобовому ринку», встановлюються взаємовідносини між суб'єктами ринку та оператором ринку, порядок реєстрації учасників, організація та проведення торгів, визначення ціни на електричну енергію та проведення розрахунків на різних сегментах ринку [1]. Ця практика вже давно закріпилася в країнах Європи, але її відмінність полягає у тому, що всю мережеву інфраструктуру вони належить державі, а на ринку представлені як енергопостачальні підприємства, так і обслуговуючі організації, що працюють безпосередньо зі споживачами.

Основним фактором для енергопостачальних підприємств, при розрахунку кінцевої ціни електроенергії для споживачів, є вартість її придбання на ринку «на добу наперед». У зв'язку з цим, в комерційних інтересах суб'єктів роздрібного ринку електроенергії важливо використовувати й розвивати сучасні методики прогнозування та планування інфраструктури систем автоматизованого комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), а також використовувати сучасне програмне забезпечення з єдиною базою даних, що відображає всі бізнес-процеси компанії.

В Україні ціни на балансуєчому ринку, як правило, відрізняються від цін на ринку «на добу наперед» на 55% у бік зниження. У країнах-лідерах, таких як Канада, Франція, Німеччина, де проблем зі збором інтервальних показань приладів обліку немає, цей показник відрізняється в 5-10 разів, що ставить підвищені вимоги до побудови прогнозних моделей споживання електроенергії.

Модель функціонування роздрібного ринку електроенергії в Україні передбачає купівлю необхідного обсягу електроенергії для суб'єктів за допомогою експертів, які проводять прогнози в режимі «на добу наперед» з використанням вже розроблених методик. Заявки на купівлю електроенергії на наступний день подаються учасникам ринку через оператора ринку, враховуючи обсяги на кожну годину. Вартість перебору або недобору обсягів розраховується за тарифом балансуєчого ринку за формованим ОСП.

Ця схема підвищує важливість короткострокового та середньострокового прогнозування електроенергії для планування виробничих потреб підприємств.

Кожному учаснику ринку необхідно мати базу ретроспективних даних та перевірених методологічних моделей для побудови прогнозів електроспоживання. Це необхідно для купівлі оптимальних обсягів електроенергії на ринках «на добу наперед», «внутрішньодобовому ринку», та «ринку двосторонніх договорів» з мінімізацією відхилень від прогнозованих величин на балансуєчому ринку. На сьогоднішній день відсутні єдина та загальноприйнята методологічна база, тому розробка такої бази для створення прогнозних моделей на ринку «на добу наперед» є актуальним завданням.

Актуальність роботи. Розробка методів прогнозування та планування споживання електричної енергії для підприємств на базі штучних нейронних мереж є складним технічним завданням, що входить у сферу наукових досліджень. Важливість точності таких прогнозів визначається їхнім впливом на економічні, технологічні та соціальні аспекти.

Об'єктом дослідження. Процеси передачі та розподілу електричної енергії для промислових споживачів вимагають розробки моделей та методів прогнозування, які враховують різноманітні фактори, що впливають на економічний та технологічний результат.

Предмет дослідження. Моделі та методи прогнозування і планування електроспоживання підприємства та факторів, впливаючих на економічний та технологічний результат.

Мета роботи: Удосконалення точності прогнозів споживання електроенергії підприємствами здійснюється через створення моделей прогнозування, базованих на штучних нейронних мережах. Ці моделі враховують метеорологічні умови та динаміку споживання електроенергії в умовах роздрібного ринку електроенергії.

Методи дослідження. Дослідження у цій області ґрунтуються на сучасних методах обчислювальної математики, теорії надійності, системного аналізу, прикладного статистичного аналізу, синтезу комплексних систем та використанні сучасних комп'ютерних програм.

Завдання дослідження:

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз роботи електроенергетичного сектору та енергопостачальних підприємств в умовах сучасної моделі ринку електричної

енергії, існуючих методів прогнозування, виробити вимоги для розробки програмного забезпечення, що реалізує метод прогнозування.

2. Провести аналіз процесу споживання електричної енергії промислових споживачів енергопостачального підприємства з метою виявлення в ньому закономірностей і вибору типу методу прогнозування, що забезпечує найбільш високу точність прогнозу.

3. Дослідити методи короткострокового прогнозування процесу споживання промислових споживачів з метою купівлі необхідних обсягів електричної енергії на ринку «двосторонніх договорів».

4. Порівняти прогнозні моделі прогнозування електроспоживання для промислового підприємства з урахуванням факторів впливу .

5. Розробити реалізацію моделі ШНМ та проекту формування навчальної вибірки для методу короткострокового прогнозування електроспоживання промислового підприємства з урахуванням критеріїв інформативності і компактності і виведення результатів прогнозу з урахуванням довірчого інтервалу.

Наукова новизна дослідження.

У магістерській роботі були отримані науково нові результати, які можна сформулювати наступним чином:

1. Розроблено метод короткострокового прогнозування споживання електричної енергії для енергопостачального та виробничого підприємства, який відрізняється використанням ретроспективних даних та реального споживання електроенергії.

2. Розроблено прогнозну модель штучної нейронної мережі для процесу планування споживання електроенергії для виробничого підприємства з урахуванням факторів, що впливають на економічний результат.

3. Розроблено методіку формування навчальної вибірки для методів планування та короткострокового прогнозування споживання електроенергії, що відрізняється використанням кліматичних параметрів та ретроспективних даних про фактичне споживання електроенергії з урахуванням критеріїв інформативності і компактності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОКИ

В ході роботи над магістерською дипломною роботою було виконано наступні поставлені завдання:

1. У першому розділі дипломної роботи було проведено аналіз поточного стану електроенергетичного сектору України, оцінено функціонування ринку електричної енергії та розглянуті основні учасники та об'єкти цього ринку. Були сформульовані вимоги підприємства до даних прогнозування для методу короткострокового прогнозування споживання електричної енергії з урахуванням його специфіки роботи на ринку електроенергії, такі як: конкретні вимоги до моделі, можливість обробки спеціальних випадків, врахування метеоумов, гнучкість моделі, економічна доцільність та можливість інтерактивної реалізації. Крім того, були проаналізовані основні методи оцінки якості функціонування системи прогнозування для виробничого підприємства у випадках, коли йдеться про достовірність прогнозованих даних та їх використання на ринку електричної енергії.

2. У другому розділі дослідження розглянуті сучасні моделі прогнозування споживання електроенергії підприємств, які базуються на статичних методах, і проведена їх класифікація на групи методів. Після аналізу найефективнішим методом було визначено використання моделі штучних нейронних мереж (ШНМ) для короткострокового прогнозування та планування споживання електричної енергії на виробничих підприємствах.

3. У третьому розділі було проведено спектральний аналіз ретроспективних даних хімічного підприємства за два роки. Завдяки цьому аналізу було розроблено модель штучних нейронних мереж (ШНМ) за допомогою програмного продукту STATISTICA trial для прогнозування електроспоживання на прикладі даного підприємства. Модель базується на методі зворотної помилки прогнозування. Також було проведено порівняльне дослідження двох моделей прогнозування: звичайної лінійної регресії та ШНМ. Результати дослідження показали, що модель на основі ШНМ демонструє у 3 рази меншу абсолютну процентну похибку в прогнозуванні обсягів електроенергії на наступний місяць, ніж модель на основі лінійної регресії.

4. У четвертому розділі розроблено проєкт подальшої реалізації впровадження моделі прогнозування на базі ШНМ. Основна ідея полягає в створенні компанії, яка надаватиме послуги з аналітики та прогнозування даних для купівлі-продажу електричної енергії на роздрібному ринку. Цей проєкт передбачає використання розробленої моделі для прогнозування попиту на електроенергію, що дозволить оптимізувати процеси закупівлі та продажу електроенергії на ринку. Компанія буде надавати клієнтам інформацію та аналіз, необхідний для прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації витрат на електроенергію та управління ризиками. Такий підхід сприятиме підвищенню ефективності управління енергетичними ресурсами та забезпечить більш точне та ефективне управління електроенергетичними потоками на ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2021 № 308.

2. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2021 №307.

3. Постанова Національної комісії , що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 312 від 14.03.2021 р.

«Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії»

4. Постанова Національної комісії , що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 307 від 14.03.2021 р.

«Про затвердження Правил ринку»

5. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2021 № 312. Верховна Рада України: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text)

[18#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text)

6. Українська енергетична біржа: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу

<https://www.ueex.com.ua/>

7. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.

8. Закон України "Про ринок електричної енергії" від 13.04.2017 [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради. – 2017.

– Режим доступу до

ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2022-19#Text>.

9. Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків

на учасників ринку електричної енергії для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку електричної енергії від.01.05.21 №483 [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2022-%D0%BF#Text>

10. Енергетика України виклики та ініціативи [Електронний ресурс] // Центр Разумкова. – 2020. – Режим доступу до ресурсу:

https://razumkov.energy/assets/Energy_Initiatives_052020.pdf.

11. Державна служба статистики України. Статистичні дані [Електронний ресурс] / Державна служба статистики України – Режим доступу до ресурсу:

http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/oper_new.html.

12. Сайт НЕК "УКРЕНЕРГО" Графіки споживання та виробництва електричної енергії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnytstva-spozhyvannya-e-e/>.

13. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>.

14. Вольчин І. А. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України (монографія) / І. А. Вольчин. // Київ: ГНОЗІС. –

2016. – С. 308.

15. Праховник А.В. Автоматизация управления электропотреблением/ А.В. Праховник– Вища школа, Киев,-1986,- 76 с

16. Иващенко В.А. Автоматизированное управление электропотреблением промышленных предприятий: концепція и основне задачи/ В.А. Иващенко, А.Ф. Резчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2006.

№3. С. 52-56

17. Закон України Про енергетичну ефективність [Електронний ресурс].

– 2021. – Режим доступу до ресурсу:

http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_2?id=&pf3516=4507&skl=10.

18. Особливості короткострокового прогнозування електричного навантаження енергосистеми із суттєвою складовою промислового електроспоживання / П. О. Черненко, О. В. Мартинюк, В. О. Мірошник // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2016. - Вип. 43.

- С. 24-31.

19. Идиятуллин, Р. Г. Статистические методы исследования при разработке математической модели электропотребления производственного объекта [Текст] / Р. Г. Идиятуллин, Д. В.

20. Park, D.C. Electric load forecasting using an artificial neural network Текст. / D.C. Park, M.A. El-Sharkawi, R.J. Marks II at al. // Transaction on power systems. 1991. - Vol. 6 (no. 2). - P. 442-449.

21. Артемчук Т.О. Ключові фактори успіху завдяки програмі трансформації енергетичної галузі / Т.О. Артемчук // Економічний аналіз ; редкол.: В.А. Дерій (гол. ред.) [та ін.]. – Тернопіль : Економічна думка, 2016. – Том 24. – № 2. – С. 65–70.

22. Перерва П.Г. Формування цінності взаємовідносин енергопостачальних підприємств зі споживачами електроенергії / П.Г. Перерва, Т.В. Омеляненко // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2017. – № 1. – С. 152–

160 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mimi_2017_1_17.

23. Закону України «Про електронні довірчі послуги» №2155-VIII від 13.02.2020 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2155-19#Text>.

24. Anbazhagan S., Kumarappan N. Day-ahead deregulated electricity market price forecasting using neural network input featured by DCT // Energy Conversion and Management. – Vol.78. – 2017. – pp. 711-719

25. Voronin S., Partanen J. Forecasting electricity price and demand using a hybrid approach based on wavelet transform, ARIMA and neural networks // International Journal of Energy Research. – Vol. 38. – 2017. – pp. 626-637.

26. Lidong Zhou; Bo Wang; Zheng Wang; Fei Wang; Minghui Yang Seasonal classification and RBF adaptive weight based parallel combined method for day-ahead electricity price forecasting // Conference Paper. – 2021. – 5 pp.

27. Шараєвський Ф.Ю. Модель і процедури короткострокового прогнозування електроспоживання в оптовому ринку електричної

енергії. // Системні дослідження та комплексні проблеми енергетики. – 2007. – С. 36–40.

28. Системи енергетичного менеджменту: Прогнозування енергетичного попиту: Курсова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г. Г. Стрелкова, О. С. Іщенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 61 с. Режим доступу -

<https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/33652/1/292-1.pdf>

29. Федорова, С. В. Применение техноценологического подхода к анализу электропотребления и энергосбережения предприятий Свердловской области / С. В. Федорова, А. П. Третьяков // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2012. – № 16 (275). – С. 92–97.

30. Праховник А.В., Коцар О.В., Прокопець В.І. Сучасні принципи побудови АСКОВЕ суб'єктів ОРЕ та АСКОВЕ споживачів в умовах енергоринку України // Енерг. и електрифікація, 2006. – №4 – С.2 – 7

31. Методичні вказівки та розрахунково-графічні завдання для самостійної роботи студентів економічних спеціальностей усіх форм навчання з курсу “Економетрика” / Укл. Г.А.Шишканова – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 62 с.

32. Бокс, Дж. Аналіз часових рядів. Прогноз і управління / Дж. Бокс, Г. Дженкінс. - М.: Мир, 1974. - 520 с.

33. Vapnik, V. N. Statistical Learning Theory / V. N. Vapnik, A. Ja. Chervonenkis. – New York : Wiley, 1998. – 736 p.

34. Лещинський, О. Л. Економетрія [Текст] : навч. посіб. / О. Л. Лещинський, В. В. Рязанцев, О. О. Юнькова. — К.: МАУП, 2003. — 208 с.

35. НЕК «Укренерго». Балансуючий ринок та врегулювання
небалансів: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу
[https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-
balansuyuchogo-rynku-2/](https://ua.energy/uchasnikam_rinku/rezultaty-balansuyuchogo-rynku-2/)