

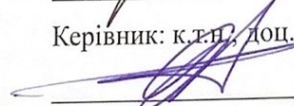
Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра системного аналізу та інформаційних технологій

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІННИЦЬКОЇ
ОБЛАСТІ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ»

Виконала: студентка 4 курсу, групи СА-216
спеціальності 124 – «Системний аналіз»

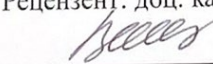
 Валентина ПАЛАМАРЧУК

Керівник: к.т.н., доц. каф. САІТ

 Дмитро ПРОЦЕНКО

«08» 06 2025 р.

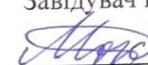
Рецензент: доц. каф. КН

 Валерій ДЕНИСЮК

«12» 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри САІТ

 д.т.н., проф. Віталій МОКІН

«09» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра системного аналізу та інформаційних технологій
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Галузь знань – 12 Інформаційні технології
Спеціальність 124 – «Системний аналіз»
Освітньо-професійна програма – Системний аналіз

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри САІТ

 д.т.н., проф. Віталій МОКІН

“28” 05 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Паламарчук Валентині Юріївні

1. Тема роботи: «Системний аналіз інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлювальної енергетики»
керівник роботи: Проценко Д. П., к.т.н., доц. каф. САІТ
затверджені наказом ВНТУ від «20» 05 2025 року № 92
2. Строк подання студентом роботи «31» 05 2025 року
3. Вихідні дані до роботи:
 - 1) Кліматичні дані (інсоляція, швидкість вітру, температура) для території Вінницької області, отримані через API NASA POWER.
 - 2) Географічна сітка координат, що охоплює ключові міста Вінницької області та обласні центри інших регіонів України.
 - 3) Дані про вітрову та сонячну генерацію, отримані шляхом розрахунків на основі фізичних моделей.
 - 4) Фінансові параметри інвестиційних проєктів (NPV, IRR, LCOE).
4. Зміст текстової частини:
 - 1) Аналіз сучасного стану та проблематики розвитку ВДЕ у Вінницькій області.
 - 2) Вибір оптимальних методів системного аналізу.
 - 3) Розроблення інформаційної системи для оцінки інвестиційного потенціалу ВДЕ.
5. Перелік ілюстративного матеріалу:

- 1) Графіки сезонної динаміки сонячної та вітрової генерації для міст і регіонів;
- 2) Температурні графіки та тренди кліматичних змін по Вінницькій області;
- 3) Графіки порівняння прогнозованих і реальних значень генерації та температури (діаграми "факт vs прогноз");
- 4) Графіки залишків моделей прогнозування (аналіз похибок);
- 5) Теплові карти температури та розподілу енергетичних показників;
- 6) Фінансові графіки: дискontовані грошові потоки, порівняння тарифів.
6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 28 » 05 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Аналіз предметної області	01.04	15.04	Вик
2	Порівняльний аналіз проблематики	15.04	30.04	Вик
3	Вибір оптимальних інформаційних технологій	01.05	10.05	Вик
4	Розроблення інформаційної системи автоматизації роботи користувачів	10.05	20.05	Вик
5	Оформлення матеріалів до захисту БКР	20.05	30.05	Вик

Студентка



Валентина ПАЛАМАРЧУК

Керівник роботи



Дмитро ПРОЦЕНКО

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 95 сторінок формату А4, на яких є 35 рисунка, список використаних джерел містить 20 найменувань.

Метою роботи є підвищення ефективності прийняття інвестиційних рішень у сфері відновлюваної енергетики Вінницької області за рахунок розробки складної інформаційної системи системного аналізу інвестиційного потенціалу з використанням платформи Kaggle та моделей прогнозування.

В роботі проведено аналіз природно-кліматичного потенціалу Вінницької області, обґрунтовано методи оцінки інвестиційної доцільності (АНР, NPV, IRR, LCOE), побудовано моделі прогнозування сонячної й вітрової генерації та температури на основі машинного навчання (Random Forest, XGBoost, MLP, Linear Regression). Реалізовано складну інформаційну систему на базі платформи Kaggle для збору, обробки, моделювання та візуалізації даних. Розроблена система забезпечує якісну оцінку потенціалу інвестування у ВДЕ-проекти Вінниччини.

Ключові слова: системний аналіз, інвестиційний потенціал, відновлювальна енергетика, прогнозування, Kaggle, машинне навчання, Вінницька область.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work consists of 95 pages of A4 format, which contains 35 figures, the list of references contains 20 titles.

The aim of the work is to increase the efficiency of investment decision-making in the field of renewable energy in Vinnytsia region by developing a complex information system for systematic analysis of investment potential using the Kaggle platform and forecasting models.

The paper analyzes the natural and climatic potential of Vinnytsia region, substantiates methods for assessing investment feasibility (AHP, NPV, IRR, LCOE), and builds models for forecasting solar and wind generation and temperature based on machine learning (Random Forest, XGBoost, MLP, Linear Regression). A complex information system based on the Kaggle platform for data collection, processing, modeling, and visualization was implemented. The developed system provides a qualitative assessment of the potential for investing in renewable energy projects in Vinnytsia region.

Keywords: system analysis, investment potential, renewable energy, forecasting, Kaggle, machine learning, Vinnytsia region.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА СТАНУ ПРОБЛЕМАТИКИ ІНВЕСТИЦІЙ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНУ ЕНЕРГЕТИКУ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	6
1.1 Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та Вінницькій області	6
1.2 Поняття та критерії оцінки інвестиційного потенціалу регіону	10
1.3 Кліматичні та природні ресурси як база для ВДЕ-проектів	14
1.4 Висновки	18
2 МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА АНАЛІТИЧНІ ПЛАТФОРМИ	20
2.1 Огляд методів системного аналізу та багатокритеріального прийняття рішень (АНР).....	20
2.2 Інформаційно-аналітичні платформи та практики моніторингу даних у ВДЕ проектах	22
2.3 Вибір середовища для аналізу даних: обґрунтування використання Kaggle як аналітичної платформи	25
2.4 Висновки	30
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ	32
3.1. Підготовка даних для системного аналізу: збір, валідація та очищення	32
3.2. Розробка моделей прогнозування та оцінки інвестиційного потенціалу	37
3.3. Фінансова оцінка інвестиційного потенціалу та візуалізація економічних показників	62
3.4 Висновки	70
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
Додаток А (обов’язковий). Технічне завдання	79
Додаток Б (обов’язковий). Протокол перевірки БКР на наявність текстових запозичень.....	82

Додаток В (довідниковий). Фрагмент лістингу системи	83
Додаток Г (обов'язковий). Ілюстративна частина	90

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах зростання енергетичних викликів та необхідності забезпечення енергетичної безпеки України відновлювана енергетика набуває стратегічного значення. Перехід до використання екологічно чистих джерел енергії є не лише вимогою часу, а й важливим кроком до сталого розвитку економіки.

Вінницька область має суттєвий природно-кліматичний потенціал для впровадження проєктів у сфері сонячної та вітрової енергетики, однак його ефективна реалізація вимагає обґрунтованого підходу до планування інвестицій. Традиційні методи оцінки недостатньо враховують складність факторів, таких як зміна кліматичних умов, фінансові ризики та просторову неоднорідність території.

У зв'язку з цим зростає потреба у створенні складної інформаційної системи, яка дозволяє поєднати дані про ресурси, ризики та економічну ефективність у єдину аналітичну платформу. Використання системного аналізу, методів машинного навчання та відкритих джерел даних забезпечує підвищення точності оцінок і обґрунтованість управлінських рішень.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності прийняття інвестиційних рішень у сфері відновлюваної енергетики Вінницької області за рахунок розробки складної інформаційної системи системного аналізу інвестиційного потенціалу з використанням платформи Kaggle та моделей прогнозування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати поточний стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики у Вінницькій області;
2. Сформулювати поняття інвестиційного потенціалу у контексті ВДЕ та адаптувати критерії його оцінки до особливостей регіону;

3. Здійснити збір і попередню обробку кліматичних даних за допомогою відкритого API NASA POWER;
4. Розробити моделі прогнозування генерації сонячної та вітрової енергії з використанням методів машинного навчання (Random Forest, XGBoost, MLPRegressor);
5. Провести фінансову оцінку інвестиційних проєктів на основі показників NPV, IRR, LCOE;
6. Застосувати метод аналізу ієрархій (АНР) для обґрунтування вибору оптимальних проєктів у межах області;
7. Реалізувати інтегровану складну інформаційну систему на базі Kaggle як аналітичної платформи.

Об'єктом дослідження є процес системного аналізу інвестиційного потенціалу регіону у сфері відновлюваної енергетики.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та інформаційні технології, що забезпечують реалізацію складної інформаційної системи для оцінки інвестиційної привабливості Вінницької області у сфері ВДЕ.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА СТАНУ ПРОБЛЕМАТИКИ ІНВЕСТИЦІЙ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНУ ЕНЕРГЕТИКУ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Сучасний стан відновлюваної енергетики в Україні та Вінницькій області

Сектор відновлюваної енергетики в Україні протягом останніх десяти років демонстрував стрімке зростання, формуючи важливу складову енергетичного переходу країни до більш сталої та екологічно безпечної моделі. До початку повномасштабного вторгнення (2022 р.) загальна встановлена потужність ВДЕ в Україні перевищувала 9,9 ГВт, із домінуванням сонячної енергетики, яка охоплювала понад 60% цього обсягу. Позитивну динаміку підтверджувала як зростаюча частка «зеленої» електроенергії в загальній генерації, так і значний обсяг залучених інвестицій — понад 12 млрд дол. США.

Сприятлива інсоляція, вітрові умови в південних регіонах, аграрний потенціал для біоенергетики створили передумови для диверсифікованого розвитку ВДЕ в більшості областей України. Вінницька область, розташована в центральній частині країни, також була серед регіонів, де цей процес набував помітної динаміки. Основними драйверами тут виступали кліматичні умови, доступні земельні ресурси, підтримка з боку місцевих громад, а також активність малого й середнього бізнесу в напрямку енергетичної автономії.

Водночас із 2022 року галузь зіткнулася з безпрецедентними викликами. Воєнні дії, спрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру, нестабільність ринку, коливання політики державної підтримки (зокрема умов «зеленого» тарифу) — усе це призвело до часткової втрати потужностей, призупинення ряду інвестиційних проєктів, а також зниження темпів впровадження нових об'єктів. Проте, попри складний безпековий та макроекономічний контекст, ВДЕ в Україні не зупинилася. Станом на кінець 2023 року зареєстровано понад 1400 нових

підключень сонячних і вітрових установок, значна частина з яких — маломасштабні об'єкти приватного сектору. Для подальшого стимулювання індивідуальних інвестицій у «зелену» генерацію Верховна Рада України прийняла Закон № 3220-IX від 30 червня 2023 р. «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та ‘зеленої’ трансформації енергетичної системи України», що запроваджує механізм Net Billing і дозволяє фізособам встановлювати генерацію до 30 кВт без ліцензії та продавати надлишок електроенергії за «зеленим» тарифом [1].

У цьому контексті Вінницька область продовжує зберігати позитивні позиції. Рівень середньорічної сонячної радіації в регіоні становить близько 1200–1300 кВт·год/м², що робить її придатною для ефективної експлуатації сонячних установок як побутового, так і промислового масштабу. Високий рівень інсоляції у Вінницькій області підтверджується картою середньорічного розподілу глобальної сонячної радіації на території України, де область потрапляє до зони з потенціалом понад 1200 кВт·год/м² (рис. 1.1). Це підтверджується зростаючою кількістю малих сонячних станцій, що встановлюються приватними домогосподарствами та агропідприємствами. Такий тренд не лише свідчить про поширення «зеленої» генерації, а й формує новий сегмент енергетичних споживачів — проактивних і зацікавлених у стабільному забезпеченні власних потреб.

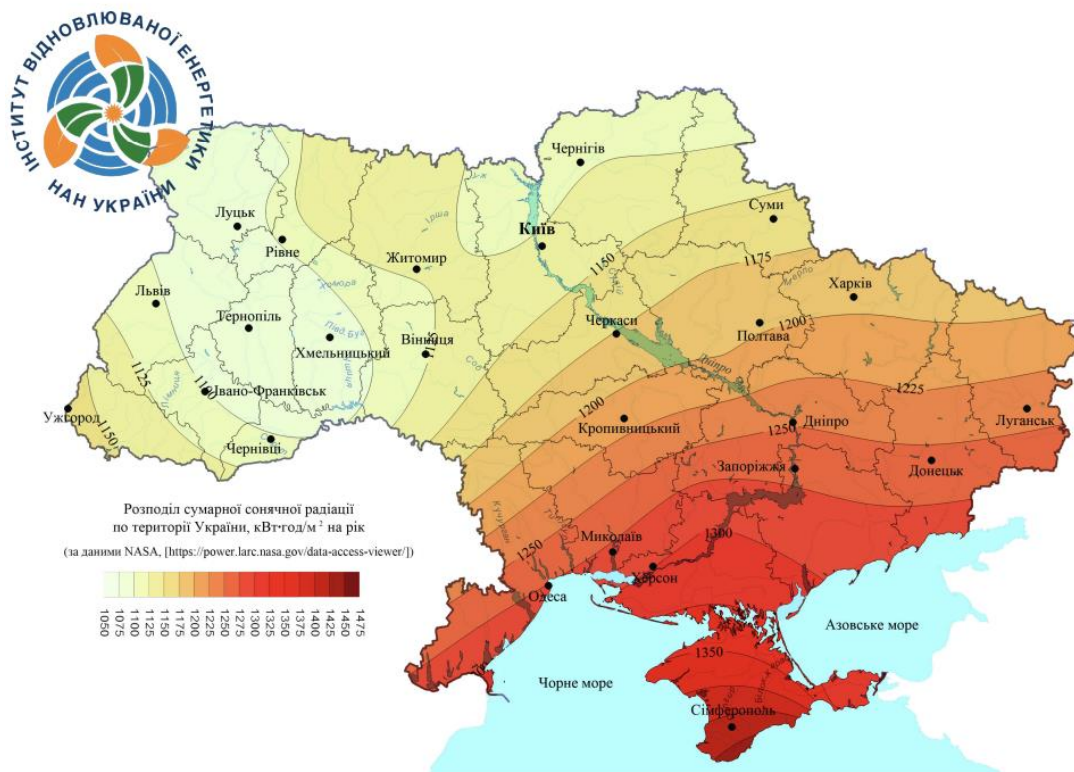


Рисунок 1.1 - Середньорічний рівень сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню (GHI) по території України, кВт·год/м² на рік [2]

Крім сонячної енергетики, область має значний потенціал у сфері біоенергетики, зокрема через велику кількість аграрних підприємств і доступність біомаси. Це дає змогу реалізовувати проекти з виробництва біогазу, твердого біопалива та енергії з відходів сільськогосподарської діяльності. Основними бар'єрами залишаються логістика, сезонність сировини та потреба в більш ефективному механізмі стимулювання таких ініціатив.

Щодо вітрової енергетики, то середня швидкість вітру у Вінницькій області (близько 5,5–6,2 м/с на висоті 100 м) є нижчою, ніж у південних регіонах, однак на окремих підвищених ділянках можливе розгортання проєктів середньої потужності. Наявність сучасних моделей турбін, здатних ефективно працювати в умовах помірної вітрової активності, а також тенденція до локалізації

компонентів обладнання в Україні можуть зменшити бар'єри для розвитку цього сегмента.

Важливо також зазначити, що наявна енергетична інфраструктура в регіоні вже зараз дозволяє здійснювати підключення нових ВДЕ-об'єктів. Хоча її модернізація залишається актуальною задачею, особливо в контексті зростання частки нестабільної генерації, об'єктивно Вінницька область має перевагу в тому, що частина мереж і підстанцій зберегли працездатність, а віддаленість від зони активних бойових дій дозволяє планувати середньо- та довгострокові інвестиційні ініціативи

Серед ключових переваг регіону:

- Високий рівень сонячної інсоляції та помірний вітровий ресурс;
- аграрна база, що підтримує розвиток біоенергетики;
- активність приватного сектору в розбудові малої генерації;
- відносна безпекова стабільність;
- розвинена логістична інфраструктура й вигідне географічне положення;
- доступ до відкритих кліматичних даних (NASA POWER), що дозволяє проводити якісне прогнозування генерації.

Поряд з оптимізмом важливо зберігати об'єктивність у баченні майбутнього ВДЕ в регіоні. Існують виклики: інфраструктурні, фінансові, регуляторні, що потребують системного підходу. Але ці виклики не є критичними і можуть бути пом'якшені завдяки ефективному використанню сучасних методів аналізу (прогнозне моделювання, фінансова оцінка, мультикритеріальний вибір), а також через послідовну регіональну політику з орієнтацією на сталість і безпеку.

Таким чином, Вінницька область має всі шанси посісти лідерські позиції серед регіонів України у сфері відновлюваної енергетики. Комплексне використання її кліматичних, аграрних та інфраструктурних переваг, поєднане з сучасними підходами до аналізу, дає змогу не лише реалізовувати ефективні

енергетичні проекти, а й формувати привабливе інвестиційне середовище. Саме в умовах турбулентності проявляється справжній потенціал регіону — здатність розвиватися, адаптуватися та бути прикладом стійкого «зеленого» переходу на регіональному рівні.

1.2 Поняття та критерії оцінки інвестиційного потенціалу регіону

Інвестиційний потенціал регіону є багатовимірним поняттям, що охоплює сукупність ресурсів, умов, інституційних передумов і можливостей для залучення та ефективного використання інвестицій. У випадку ВДЕ - це не лише питання наявності природних ресурсів, таких як інсоляція чи швидкість вітру, а й загальний інвестиційний клімат, інфраструктурна готовність, регуляторне середовище та здатність регіону адаптуватися до викликів енергетичного переходу.

Традиційно інвестиційний потенціал регіонів аналізується за такими складовими як: природно-ресурсний потенціал, інфраструктурна розвиненість, кадровий та науково-технічний потенціал, інституційна якість (прозорість, спрощені процедури, підтримка місцевої влади), рівень розвитку фінансової системи, та соціально-економічна стабільність. Для сектору ВДЕ ці показники адаптуються до галузевих особливостей. Наприклад, під природним потенціалом розуміється наявність сприятливих кліматичних умов, наявність вільних земель та водних ресурсів для розміщення об'єктів, а також метеорологічна стабільність, яка дозволяє прогнозувати виробництво енергії з прийнятною точністю.

Оцінка інфраструктурного потенціалу у ВДЕ передбачає наявність та стан електричних мереж, підстанцій, можливість підключення до об'єднаної енергосистеми України, розвиненість логістики для транспортування обладнання та сировини (в контексті біоенергетики). Немаловажним є й наявність місцевих

підприємств, що спеціалізуються на монтажі, сервісі та виробництві елементів ВДЕ-систем, адже це впливає на строки реалізації проєктів та зниження витрат.

Фінансово-економічна складова інвестиційного потенціалу аналізується через критерії вартості капіталу (відсоткові ставки), наявності грантових, кредитних або лізингових програм, доступності страхування ризиків, стабільності валютного курсу, макроекономічної волатильності. В Україні з 2022 року ці чинники зазнали суттєвих змін, проте низка програм міжнародної технічної допомоги, кредитних ліній від Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР), а також програм відновлення дозволяють зберігати відносну привабливість ВДЕ-проєктів, особливо в регіонах з нижчою конкуренцією та наявними перевагами.

Одним із ключових підходів до кількісної оцінки інвестиційного потенціалу є багатокритеріальний аналіз, що включає вагове ранжування пріоритетів (економічна ефективність, екологічна безпека, соціальна користь, технічна реалізованість). Серед інструментів, які все частіше використовуються у практиці енергетичного планування, варто виділити АНР, що дозволяє формалізовано оцінити альтернативи за низкою якісних та кількісних параметрів. Він дає змогу враховувати не лише прямі економічні вигоди (наприклад, чистий приведений дохід — NPV, внутрішню норму рентабельності — IRR), а й соціальні, регіональні, екологічні фактори, які зазвичай складно інкорпорувати в стандартні фінансові моделі[3].

Для інвестиційної оцінки проєктів ВДЕ, особливо в умовах обмеженої прогнозованості ринку, важливу роль відіграють також такі показники, як LCOE (levelized cost of electricity) - питомі витрати на виробництво одиниці електроенергії впродовж життєвого циклу проєкту, період окупності, ризики незбалансованості генерації тощо. Наявність високоякісних кліматичних даних, локальних метеоданих, демографічних трендів, інформації про доступну інфраструктуру суттєво підвищує якість аналітики. У сучасних умовах важливо

не лише оцінити поточну привабливість регіону, а й враховувати його адаптивний потенціал - здатність швидко реагувати на зміни у світовій енергетиці, локальні виклики або нові регуляторні умови.

Вінницька область у цьому контексті вирізняється позитивними характеристиками. По-перше, вона має сприятливі кліматичні умови для ВДЕ та високий рівень аграрного виробництва, що забезпечує доступ до біомаси. По-друге, наявність кваліфікованих кадрів у технічних університетах, активність малого бізнесу у сфері енергетичних сервісів, відносна близькість до великих логістичних хабів, таких як Київ та Житомир, забезпечують стратегічну перевагу у порівнянні з віддаленішими регіонами. Крім того, регіон уже має досвід реалізації ВДЕ-проектів, що формує довіру інвесторів і спрощує процес проходження погоджень. Ці переваги відображаються й на загальній карті потенціалу середньорічного виробітку електроенергії з ВДЕ, де Вінниччина демонструє одні з кращих показників серед центральних областей України (рис. 1.2).

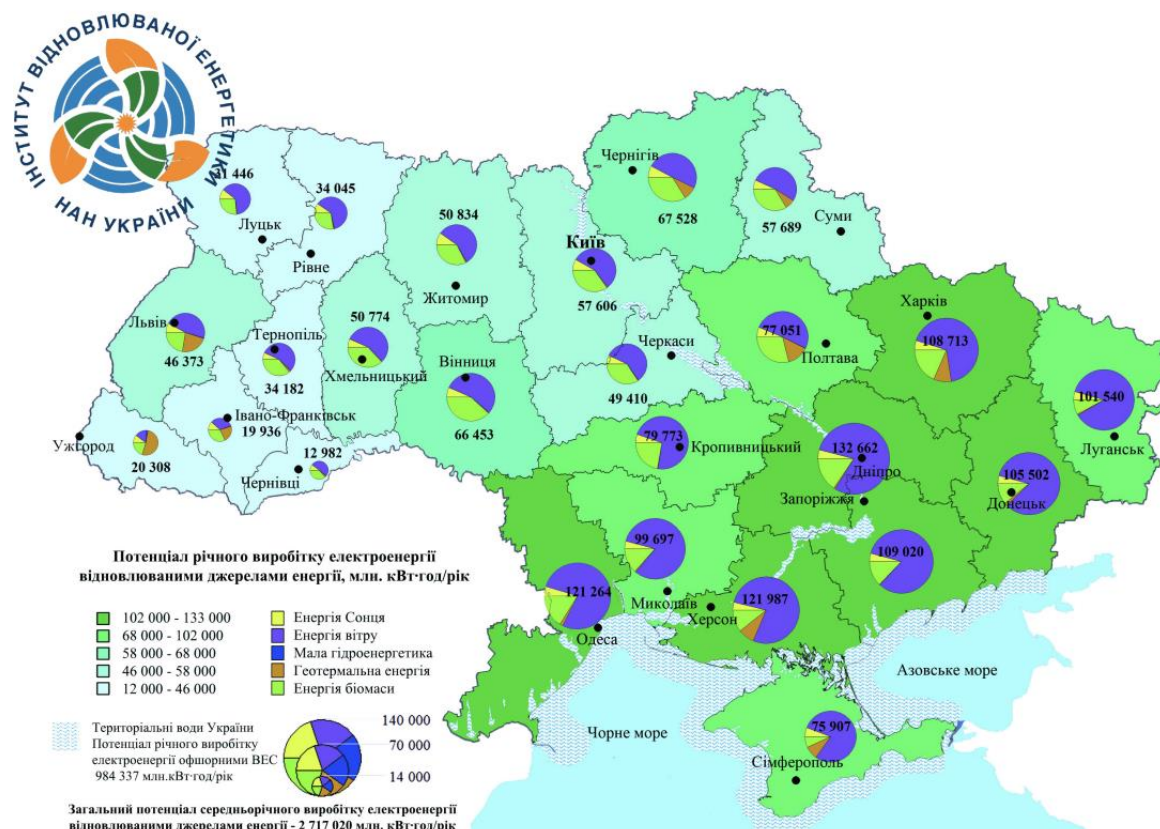


Рисунок 1.2 - Потенціал середньорічного виробітку електроенергії з відновлюваних джерел енергії по регіонах України, млрд кВт·год/рік [4]

Об'єктивно слід визнати, що оцінка інвестиційного потенціалу в умовах війни залишається складним завданням. Однак саме тому системна аналітика, багатокритеріальні методи оцінки, інтеграція з даними відкритих джерел, а також використання сучасних інструментів моделювання створюють можливість зменшити невизначеність. Це дозволяє ухвалювати більш зважені рішення, формувати довгострокові стратегії й реалізовувати проекти, що залишаються життєздатними в різних сценаріях розвитку енергетичного ринку.

Таким чином, інвестиційний потенціал Вінницької області у сфері ВДЕ є не лише достатнім, а й перспективним. За умови поєднання природних переваг із розумним інституційним та технологічним підходом, регіон здатен не лише

залучити нові інвестиції, але й перетворити їх на стійкі, масштабовані та соціально-корисні енергетичні рішення.

1.3 Кліматичні та природні ресурси як база для ВДЕ-проектів

Успішна реалізація проектів у сфері відновлюваної енергетики значною мірою залежить від об'єктивних природних передумов. Кліматичних та географічних характеристик, які визначають ефективність генерації, стабільність виробництва енергії та можливості масштабування. Саме ці чинники формують основу для техніко-економічної оцінки ВДЕ-проектів і значною мірою впливають на рівень зацікавленості інвесторів у конкретному регіоні.

У контексті сонячної енергетики ключовим показником є рівень сонячної радіації – інсоляції. Вінницька область розташована в регіоні з помірно-континентальним кліматом, що характеризується стабільними показниками сонячного освітлення упродовж року. За даними супутникових кліматичних систем, таких як NASA POWER, середньорічний рівень глобальної горизонтальної радіації (GHI) у регіоні становить приблизно 1200–1300 кВт·год/м² [5]. Це дозволяє ефективно працювати як малим побутовим фотоелектричним установкам, так і промисловим сонячним електростанціям, які проєктуються з розрахунком на LCOE у межах економічної доцільності навіть в умовах зростання вартості обладнання. Важливо також зазначити, що сезонна стабільність і достатній рівень сонячного випромінювання в літній період співпадає з піками споживання, що додатково посилює ефективність використання сонячної генерації.

Окрім інсоляції, Вінниччина має значні аграрні ресурси, що становлять основу для розвитку біоенергетики. Область стабільно входить до числа лідерів України за обсягами вирощування кукурудзи, пшениці, соняшника, а також

продукції тваринництва. Це створює сталий потік аграрних залишків, які можуть бути перероблені у біогаз, твердопаливні брикети або використані у комбінованих когенераційних установках. Біоенергетика, на відміну від сонячної та вітрової, володіє перевагою керованої генерації — енергію можна виробляти в обраний період доби або року, що критично важливо в умовах децентралізації енергосистеми та дефіциту балансуючих потужностей. Потенціал Вінниччини в контексті біоенергетики наочно представлений на карті технічно-досяжного потенціалу біомаси (рис. 1.3), де область демонструє високі значення завдяки розвиненому аграрному сектору та наявності доступної сировини.

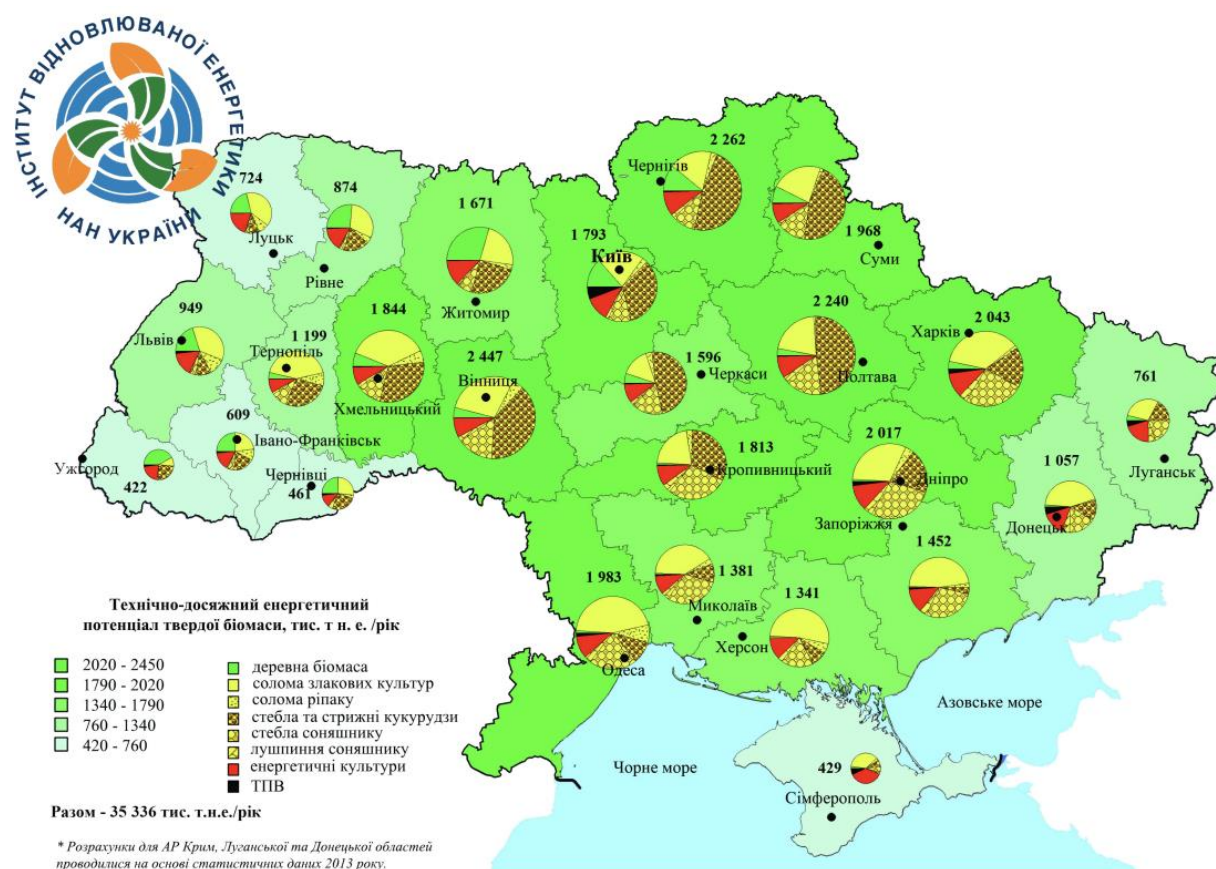


Рисунок 1.3 – Технічно-досяжний енергетичний потенціал біомаси в Україні [6]

Вітровий потенціал області менш виражений у порівнянні з південними регіонами України, однак аналіз даних показує, що середні річні швидкості вітру у низці районів області досягають 5,5–6,5 м/с на висоті 100 м, що є гранично допустимим для рентабельної роботи сучасних вітротурбін. З урахуванням розвитку нових поколінь турбін із низькою стартовою швидкістю та гібридних схем підключення, окремі локації Вінниччини можуть бути розглянуті як перспективні для встановлення вітроелектростанцій середнього масштабу, особливо в межах мікромереж або локальних кооперативів. Вітровий потенціал у межах регіону можна оцінити на основі карти середньорічної швидкості вітру на висоті 10 м, де окремі ділянки Вінниччини досягають гранично допустимих показників для використання сучасних турбін (рис. 1.4).

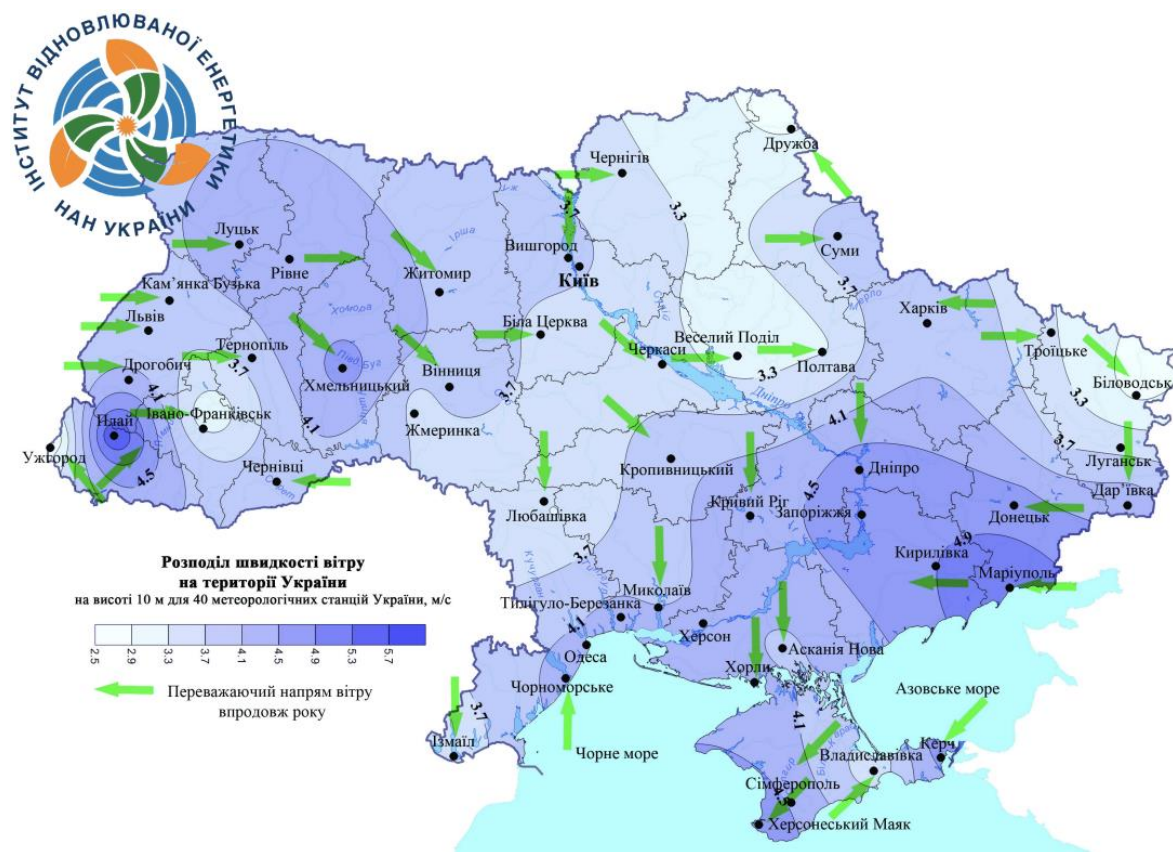


Рисунок 1.4 – Середньорічна швидкість вітру на висоті 10 м по території України, м/с [7]

Також слід відзначити наявність вільних придатних земель, що не задіяні в активному сільському господарстві — наприклад, деградовані ґрунти, малопродуктивні території або земельні ділянки в межах санітарно-захисних зон, уздовж доріг та інфраструктурних коридорів. Такі ділянки можуть використовуватись для розміщення сонячних або гібридних електростанцій без конкуренції з агросектором, а у разі застосування технології агрофотовольтаїки, навіть, паралельно з вирощуванням певних культур. Це підсилює інвестиційну привабливість проєктів, адже зменшує витрати на узгодження та компенсаторні заходи.

Окрім основних ресурсів, важливе значення має наявність гідрологічних та ґрунтових умов, які впливають на можливості встановлення систем накопичення енергії. Зростання ролі накопичувачів, у тому числі завдяки міжнародним програмам підтримки, відкриває перспективи глибшого використання відновлюваних ресурсів, навіть у разі їх нестабільного виробництва протягом доби. У цьому контексті метеорологічна передбачуваність регіону, зокрема відносна стабільність сезонного розподілу опадів і температур, сприяє побудові точних моделей генерації, що значно знижує інвестиційні ризики.

Усі ці фактори свідчать, що природно-кліматичний профіль Вінницької області є сприятливим для розвитку ВДЕ, причому в декількох напрямках одночасно. Така диверсифікованість природних ресурсів дозволяє створювати комбіновані проєкти з гнучким графіком генерації, адаптовані до потреб місцевого споживання та здатні забезпечити часткову енергетичну автономію окремих громад або підприємств.

Загалом, наявна база природних ресурсів створює передумови не лише для реалізації окремих проєктів, а й для стратегічного позиціонування регіону як майданчика для пілотних рішень, експериментів із енергоефективними технологіями та інтеграції розподіленої генерації у локальні енергетичні системи.

Оптимальне поєднання кліматичних, земельних і аграрних ресурсів, з урахуванням сучасних інструментів аналізу, моделювання та міжнародної підтримки, дає підстави розглядати Вінницьку область як одну з найбільш перспективних на карті «зеленої» трансформації України.

1.4 Висновки

У першому розділі даної роботи було обґрунтовано стратегічну важливість розвитку відновлюваної енергетики в Україні та у Вінницькій області зокрема. Проаналізовано тенденції зростання встановлених потужностей ВДЕ за останнє десятиліття, визначено роль «зеленого» переходу у забезпеченні енергетичної безпеки й екологічної стійкості країни. Було акцентовано увагу на специфіці Вінницького регіону. Важливими є сприятливі кліматичні умови, високий рівень сонячної інсоляції, достатній аграрний ресурс для біоенергетики та наявність логістичної й інфраструктурної бази, які разом формують потужний потенціал для диверсифікованого розвитку ВДЕ-проектів.

У розділі також було розкрито поняття «інвестиційного потенціалу регіону» в контексті ВДЕ. Описано методологічні підходи до кількісної й якісної оцінки, зокрема багатокритеріальні методи та АНР, які здатні адекватно врахувати широкий спектр факторів (від кліматичної стабільності й доступності земель до регуляторних умов та фінансових ризиків).

Накопичені в цьому розділі знання задають концептуальну основу для подальшої розробки інформаційної системи. Вони визначають набір вхідних даних, критерії оцінки, послідовність аналітичних кроків і характер інтеграції моделей прогнозування енергогенерації. Встановлені в розділі рамки та критерії оцінки інвестиційного потенціалу забезпечують цілісне бачення проблеми і

створюють передумови для побудови гнучкого, масштабованого інструменту аналітики.

Таким чином, перший розділ виконує функцію теоретично-методологічного фундаменту роботи. Він обґрунтовує актуальність досліджуваної теми, формулює поняття та критерії, узагальнює ключові ресурси регіону й визначає загальні підходи до їх оцінки. Це дозволяє переходити до наступної частини виконання даної роботи.

2 МЕТОДОЛОГІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА АНАЛІТИЧНІ ПЛАТФОРМИ

2.1 Огляд методів системного аналізу та багатокритеріального прийняття рішень (АНР)

Сучасна енергетична трансформація, особливо у сфері ВДЕ, вимагає прийняття рішень, що охоплюють широкий спектр технічних, економічних, екологічних і соціальних чинників. В умовах такої складності, стандартні підходи до планування або оцінки інвестицій втрачають ефективність, поступаючись місцем системному аналізу та методам багатокритеріального прийняття рішень (МПП). Ці підходи дозволяють інтегрувати як кількісні показники (рентабельність, вартість капіталу, обсяги генерації), так і якісні параметри (прийнятність для громади, екологічний вплив, стратегічна значущість).

Системний аналіз — це підхід, що розглядає об'єкт або проблему як частину більш широкої системи з численними взаємозв'язками. У сфері ВДЕ це означає врахування не лише локальних параметрів (інсоляція, вітер, доступ до мережі), але й взаємодії з енергетичним ринком, регуляторними змінами, кліматичними сценаріями, технологічними інноваціями. Саме системний підхід дозволяє уникнути фрагментарності в оцінці проєктів та переходити від точкових рішень до цілісних стратегій. У практичному плані це реалізується через використання математичних моделей, сценарного аналізу, GIS-технологій, і багатокритеріальних методів.

Одним із найбільш визнаних у світі інструментів МПП у сфері енергетики є метод АНР, запропонований Томасом Сааті. Його перевага полягає в тому, що він дозволяє структурувати складне завдання у вигляді ієрархії. Від головної мети (наприклад, вибір найкращого регіону для ВДЕ-проєкту), до критеріїв і підкритеріїв (економічні, екологічні, технічні, соціальні), а далі до конкретних

альтернатив. Кожному рівню ієрархії надається відносна вага, що визначається через попарне порівняння. Такий підхід забезпечує прозорість і логічність у прийнятті рішень, зменшує вплив суб'єктивності та дозволяє враховувати багатофакторність.

У контексті оцінки інвестиційного потенціалу регіонів для ВДЕ АНР дозволяє:

- враховувати не лише рівень інсоляції чи вітру, але й рівень готовності інфраструктури, наявність підтримки з боку місцевої влади, економічну стабільність регіону;

- адаптувати модель до мінливих умов;

- інтегрувати експертну думку, тобто рішення приймаються не лише на основі формальної статистики, а й шляхом опитування фахівців, інвесторів, місцевих жителів;

- оцінювати альтернативи не у відриві, а з урахуванням їх взаємозв'язку.

У практичній частині цієї роботи метод АНР використовується для ранжування альтернативних джерел енергії та типів проєктів у Вінницькій області. Зокрема, враховано такі критерії як: середня річна генерація, NPV, екологічне навантаження (викиди, вплив на ґрунти та біорізноманіття), доступність ресурсів, стабільність виробництва, складність реалізації (підключення до мережі, логістика, строки реалізації) та соціальна підтримка. Визначення вагових коефіцієнтів здійснюється за допомогою експертного опитування або агрегованих статистичних показників, що забезпечує об'єктивність аналізу.

Вінницька область, як об'єкт дослідження, особливо виграє від застосування методів АНР завдяки багатовекторному потенціалу. Вона не є лідером по жодному окремому ресурсу (наприклад, не має найвищої інсоляції чи вітру), однак демонструє високі бали за поєднанням критеріїв. Доступність агросировини для біоенергетики, рівень технічної освіти населення, динаміка

встановлення нових СЕС у приватному секторі, наявність вільних земель і політична підтримка на місцевому рівні. У результаті, саме завдяки системному аналізу та АНР можна обґрунтовано стверджувати, що Вінниччина має не лише наявні ресурси, а й структуровану здатність до їх ефективного використання.

Застосування методів АНР і системного аналізу також дозволяє сформувати адаптивну дорожню карту для реалізації ВДЕ-проектів від визначення пріоритетів до поетапного впровадження. Це особливо важливо в перехідний період, коли інституційні рамки змінюються, а інвесторам потрібна аналітична впевненість у доцільності проекту. Таким чином, поєднання глибокого кліматичного та ресурсного аналізу з інструментами системного оцінювання дозволяє перейти від декларацій до дій — із прозорими, вимірюваними та стратегічно обґрунтованими рішеннями.

2.2 Інформаційно-аналітичні платформи та практики моніторингу даних у ВДЕ проєктах

У сучасних умовах інформаційної відкритості та технологічного прогресу ефективне планування, реалізація та контроль проєктів у сфері відновлюваної енергетики неможливі без якісної аналітики, моніторингу та візуалізації даних. З огляду на високу чутливість ВДЕ-проектів до кліматичних, регуляторних, ринкових та інфраструктурних змін, використання інформаційно-аналітичних платформ перетворилося з допоміжного інструменту на стратегічну необхідність.

Насамперед слід згадати про глобальні відкриті системи, які забезпечують надійні кліматичні дані для моделювання потенціалу ВДЕ. Однією з найвідоміших є NASA POWER — платформа, що надає історичні погодні й атмосферні дані з високою просторовою роздільністю (рис. 2.1). Вона дозволяє отримати інформацію про інсоляцію, температуру, вологість, швидкість вітру, опади тощо, як у щоденному, так і в річному розрізі. Ці дані широко

використовуються в прогнозуванні сонячної генерації, оцінці сезонних коливань продуктивності, аналізі кліматичних ризиків. Для Вінницької області, де відсутня надщільна мережа метеостанцій, можливість доступу до репрезентативних супутникових даних відіграє ключову роль у підвищенні точності енергетичних моделей.

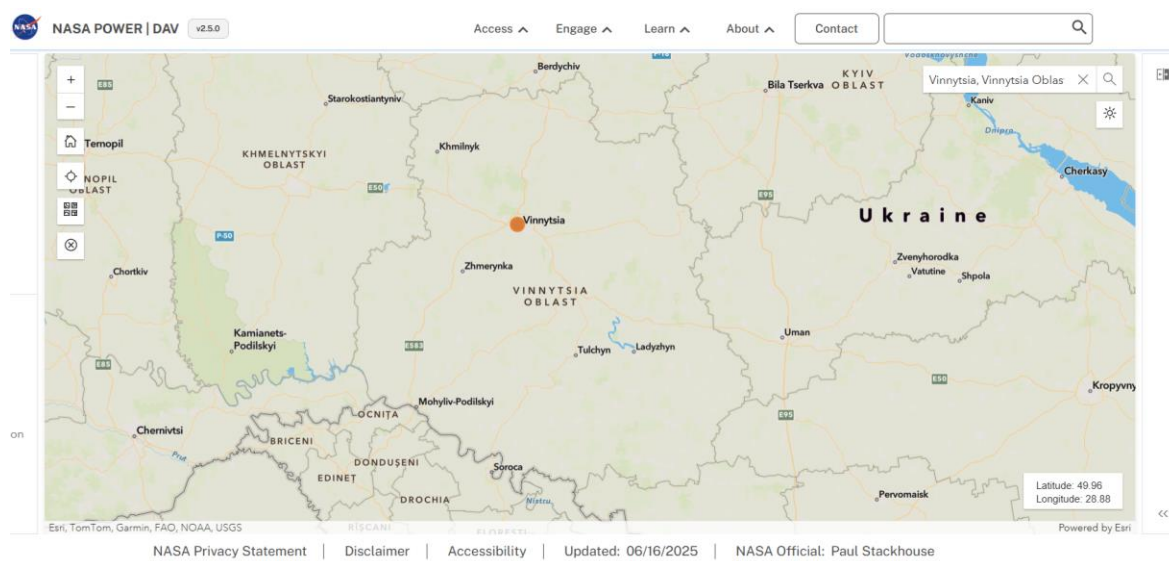


Рисунок 2.1 - Геопросторове розташування області дослідження на платформі NASA POWER [8]

В межах України активно розвиваються національні інформаційні ресурси, зокрема:

- Система «Енергетичний баланс України» (Держстат, Укренерго) — дає змогу аналізувати структуру генерації та споживання енергії, частку ВДЕ, регіональні дисбаланси;
- Енергетичний портал НКРЕКП — містить дані про ліцензовані об'єкти, тарифну політику, а також статистику введення нових потужностей;
- Відкриті карти Opendatabot, Prozorro, Geoportal.gov.ua — дозволяють відстежувати об'єкти енергетичної інфраструктури, стан земельних ділянок, тендери, дозволи;

- DIXI Group та Low Carbon Ukraine — аналітичні центри, які надають регулярні звіти, аналітичні огляди та оцінки політичних ризиків.

Окремої уваги заслуговує практика використання Kaggle-середовища, яке дедалі частіше застосовується не лише для змагань з машинного навчання, а й для публікації аналітичних досліджень у сфері енергетики. Це середовище об'єднує експертні знання, відкриті дані та приклади використання сучасних алгоритмів прогнозування (Random Forest, XGBoost, MLP тощо). У рамках проєкту для Вінницької області Kaggle використано як інтерактивне середовище для обробки, моделювання та візуалізації кліматичних та фінансових даних, що дозволяє об'єктивно оцінити потенціал та інвестиційну привабливість регіону.

Особливої ваги набувають інструменти візуального моніторингу, серед яких: теплові карти просторової інсоляції, графіки сезонних коливань генерації, порівняння «факт vs прогноз». Завдяки їм можливо не лише оцінити ефективність проєктів постфактум, а й виявляти ризики на етапі проєктування: наприклад, виявити локальні метеозони з аномальною хмарністю або зниженою швидкістю вітру.

Однак важливо зазначити, що сам доступ до інформації не гарантує якісного рішення, адже критичну роль відіграє компетентність в інтерпретації даних та вміння інтегрувати результати у стратегічне планування. Саме тому практики моніторингу мають поєднуватися з освітніми та аналітичними компонентами, включаючи підготовку місцевих спеціалістів, підвищення цифрової грамотності, створення локальних енергетичних хабів із доступом до інструментів аналізу.

Для Вінницької області це відкриває низку переваг. По-перше, доступ до платформи NASA POWER забезпечує точну оцінку потенціалу навіть у сільських районах без власних метеостанцій. По-друге, інструменти візуалізації та аналітики дозволяють підвищити прозорість проєктів і залучити громади до обговорення. По-третє, платформи типу Kaggle дають змогу швидко будувати та

перевіряти моделі прогнозування генерації, оцінювати ризики, аналізувати фінансові сценарії з використанням реальних кліматичних даних.

Таким чином, інформаційно-аналітичні платформи стають не лише технічним, а й стратегічним ресурсом розвитку ВДЕ. Їх правильне використання дозволяє значно знизити інвестиційні ризики, прискорити реалізацію проєктів, підвищити прозорість і адаптивність планування. У результаті, це формує конкурентну перевагу регіону й створює надійну основу для розбудови сталої, «розумної» енергетики нового покоління — саме тієї, яка базується на даних, знаннях і довірі.

2.3 Вибір середовища для аналізу даних: обґрунтування використання Kaggle як аналітичної платформи

Вибір платформи для аналітичного дослідження інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлювальної енергетики визначатимемо низкою технологічних, методологічних та організаційних вимог. Оскільки дослідження охоплює складні типи даних (кліматичні часові ряди, фінансові параметри, просторові карти), ключовим є доступ до гнучкого й потужного середовища, яке підтримує не лише попередню обробку даних, але й моделювання, прогнозування, документування та спільну роботу над проєктом.

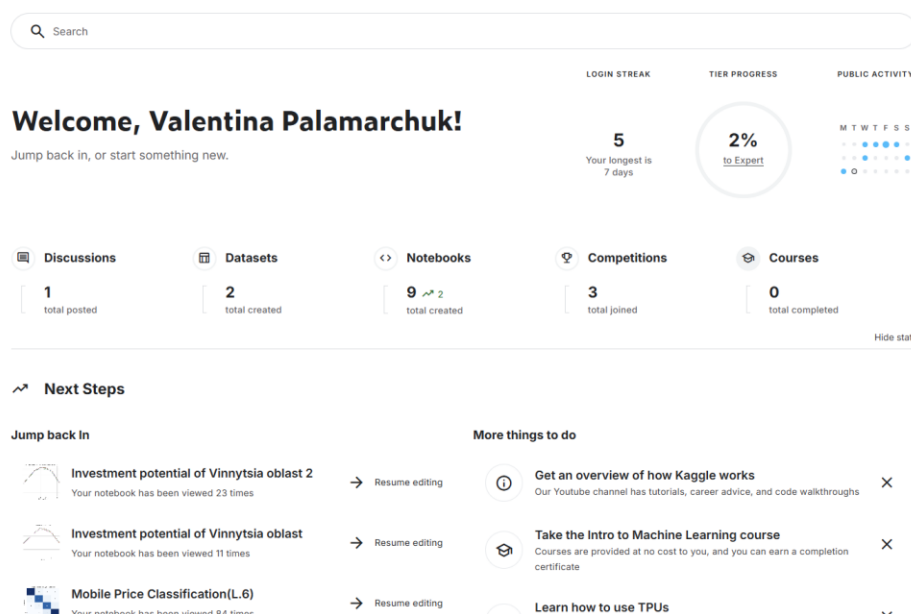


Рисунок 2. 2 - Головна сторінка облікового запису на платформі Kaggle

Kaggle обрано як найоптимальніше середовище, оскільки воно задовольняє такі потреби, як:

1. Необхідно мати можливість завантаження, збереження та обробки великих масивів кліматичних даних у форматі щоденних часових рядів. Kaggle забезпечує прямий доступ до зовнішніх API, включно з можливістю кешування відповідей, що особливо важливо для роботи з нестабільними джерелами даних або при багатократних запусках одного ноутбука. Середовище підтримує стабільну інтеграцію з Python-бібліотеками для HTTP-запитів (requests, aiohttp), що дозволяє реалізувати повноцінний інтерфейс до NASA POWER API та автоматизувати процес отримання кліматичних показників у координатній сітці Вінницької області.

2. Для дослідження інвестиційної доцільності ВДЕ важливо проводити складний аналіз часових рядів: виділення сезонності, обчислення ковзних середніх, створення лагових ознак, нормалізація даних тощо. Kaggle дозволяє швидко реалізувати ці операції завдяки інтегрованим бібліотекам pandas, statsmodels, scikit-learn, NumPy. Особливу роль відіграють побудова ознак для

тренування моделей прогнозування (Random Forest, XGBoost), створення на основі кількох ознак агрегованих предикторів та використання GridSearchCV для добору гіперпараметрів.

3. Практична перевага Kaggle — це можливість швидкої візуалізації результатів без необхідності експорту графіків до зовнішніх середовищ. Вбудована підтримка matplotlib, seaborn, plotly дозволяє будувати аналітичні графіки прямо у ноутбучі: теплові карти, діаграми сезонних коливань, графіки трендів та залишків моделей. Це критично важливо для валідації якості прогнозу (наприклад, аналіз похибок між прогнозованими та фактичними значеннями інсоляції чи вітру), а також для візуального порівняння різних підходів до оцінки потенціалу (наприклад, методи зі згладжуванням чи без).

4. Kaggle — це не просто середовище виконання, а повноцінна екосистема для створення науково-аналітичних проєктів. Завдяки підтримці Markdown у ноутбуках, є можливість документувати кожен етап. Починаючи з формування гіпотез до вибору критеріїв ефективності інвестицій (NPV, IRR), опису методологій (наприклад, АНР-аналіз для просторового оцінювання), реалізації аналізу невизначеностей через сценарне моделювання, та збереження як єдине інтегроване середовище.

5. Важливим чинником є підтримка централізованих сховищ даних (Datasets), що дозволяє не лише структурувати та розміщувати окремі CSV-файли (наприклад, щоденні дані інсоляції по кожному населеному пункту), але й забезпечувати спільний доступ до них. Таким чином, можна централізовано оновлювати базу даних і не дублювати файли в різних частинах роботи.

6. Версіонування — ще одна ключова перевага Kaggle. Кожне збереження змін ноутбука або Dataset створює окремий знімок, що дає змогу відстежувати історію аналітичного прогресу. Це дозволяє швидко порівняти вплив нових моделей на загальну точність прогнозу, аналізувати похибки, відновлювати попередні експерименти у випадку погіршення якості результатів.

7. Колабораційні можливості платформи є незамінними при взаємодії з науковим керівником і потенційними колегами. Можливість надавати доступ до ноутбуків у режимі «тільки для перегляду» або «з правами редагування» дозволяє ефективно отримувати фідбек, обговорювати результати в реальному часі, виявляти помилки й покращувати логіку моделі. Крім того, завдяки вбудованим засобам коментування можна залишати пояснення прямо біля коду або результатів.

8. Економічна доцільність використання Kaggle також є важливим фактором. Безкоштовний доступ до обчислювальних ресурсів (до 9 годин роботи CPU/GPU на сесію) дозволяє уникнути витрат на хмарні сервіси або оренду серверів, зберігаючи водночас продуктивність та ефективність процесу аналізу.

Використання інструментів візуального моніторингу відіграє ключову роль у рамках системного аналізу інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлювальної енергетики. У середовищі Kaggle під час реалізації проєкту активно застосовуватимемо сучасні методи побудови графіків і візуалізацій, які відповідатимуть практичним потребам моніторингу кліматичних і фінансових показників. Зокрема, графіки сезонних коливань інсоляції, швидкості вітру та температури будуть використовуватись для оцінки змін цих параметрів у різних часових масштабах (щоденно, щомісячно та щорічно). Такий підхід дозволить відокремити довгострокові кліматичні тренди від короточасних аномалій, що, своєю чергою, забезпечуватиме точніше формування прогнозних моделей генерації енергії.

Для просторового аналізу створюватимемо теплові карти рівня інсоляції з географічною прив'язкою до ключових координат Вінницької області. Це дасть змогу візуально оцінити внутрішньорегіональні відмінності, виокремити зони з підвищеним або зниженим сонячним потенціалом. Це критично важливо для вибору оптимальних ділянок під розміщення сонячних електростанцій. Аналогічно, мапи просторового розподілу середньої швидкості вітру, побудовані

із використанням бібліотек для роботи з геоданими (зокрема, `geopandas` у поєднанні з `matplotlib`), даватимуть змогу виявляти локальні осередки з перспективним вітровим потенціалом без необхідності в зовнішніх ГІС-інструментах. Всі ці геовізуалізації реалізовуватимемо в межах єдиного середовища, що забезпечить інтегрованість і прозорість дослідження.

Окрему увагу приділимо аналізу відповідності між прогнозованими та фактичними обсягами генерації енергії. У рамках цієї роботи створюватимемо лінійні графіки для порівняння прогнозів і реальних значень, а також додаткові графіки залишків, які виявлятимуть тенденції систематичної похибки, зокрема, сезонні недооцінки або переоцінки. Для підвищення надійності моделей використовуватимемо техніку `TimeSeriesSplit` у крос-валідації, а результати валідації візуалізуватимемо через `boxplot`, що дозволить більш точно і наочно оцінити стабільність прогнозів. Такі діаграми сприятимуть аргументованому вибору найбільш ефективних моделей машинного навчання.

Фінансову частину моніторингу реалізовуватимемо як невід’ємну складову аналітичного середовища. Показники чистої теперішньої вартості (NPV), внутрішньої норми дохідності (IRR) та собівартості виробленої електроенергії (LCOE) обчислюватимемо для різних сценаріїв інвестування з урахуванням варіацій у тарифах, вартості капіталу та експлуатаційних витрат. Для кожного сценарію створюватимемо графіки чутливості, де по осях відображатимуться ключові змінні (наприклад, ставка дисконту, рівень сонячної генерації), а на самих графіках — реакція фінансових показників. Це дозволить визначити найбільш критичні параметри для досягнення інвестиційної привабливості та вчасно скорегувати припущення щодо ризиків або ринкових умов.

Кожну побудовану візуалізацію супроводжуватимемо коротким аналітичним коментарем, що міститиме опис мети графіка, головні висновки, які варто зробити. Для цього активно використовуватимемо можливості `Markdown`,

що сприятиме більшій прозорості дослідження і зменшить ризик втрати контексту при повторному перегляді результатів.

Для забезпечення ефективності виконання тривалих обчислень, особливо під час масового завантаження кліматичних даних з API, у межах середовища Kaggle передбачатимемо збереження проміжних результатів у вигляді кешованих DataFrame-файлів. Це дозволить уникати повторних запитів та зекономить обчислювальні ресурси. Поступовий прогрес обробки даних і результати попередньої валідації виводитимемо у вигляді простих текстових повідомлень або візуальних графіків.

Таким чином, усі згадані інструменти візуалізації й моніторингу будуть активно використовуватись у межах реалізації даної роботи. Вони сприятимуть вчасному виявленню аномалій, оперативному реагуванню на виклики під час обробки даних, формуванню обґрунтованих висновків та підвищенню достовірності аналітичних результатів щодо інвестиційного потенціалу регіону.

2.4 Висновки

В результаті виконання другого розділу було визначено методологічні та технічні основи побудови інформаційної системи для системного аналізу інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлюваної енергетики.

По-перше, системний аналіз та АНР були обрані як ключові інструменти багатокритеріального прийняття рішень, оскільки дозволяють формалізувати взаємозв'язки між технічними, економічними, екологічними та соціальними факторами, знизити суб'єктивність оцінок та забезпечити прозору ранжировку альтернатив. Використання АНР на етапі вибору пріоритетних напрямів ВДЕ-проектів у регіоні дає змогу врахувати не лише ресурсний потенціал Вінниччини, але й інституційну готовність, рівень підтримки з боку громад і реальні логістичні обмеження.

По-друге, огляд інформаційно-аналітичних платформ підкреслив важливість доступу до високоякісних кліматичних і фінансових даних та можливість їх інтеграції у єдине середовище. Платформа NASA POWER забезпечує репрезентативні метеодані для регіонального моделювання, національні портали та відкриті картографічні сервіси дозволяють відстежувати інфраструктурні й регуляторні зміни, а екосистема Kaggle виступає універсальним простором для обробки, аналізу, прогнозування та візуалізації даних.

По-третє, детальне обґрунтування використання Kaggle продемонструвало його переваги. Простота інтеграції з API NASA POWER, потужний інструментарій для роботи з часовими рядами та геоданими, можливості версіонування й спільної роботи, а також вбудовані засоби для створення аналітичних звітів із графіками та картами. Завдяки цьому середовищу вдасться швидко генерувати теплові карти інсоляції, візуалізувати сезонні коливання ресурсів, порівнювати прогнози з реальними даними й аналізувати фінансові сценарії через діаграми чутливості.

Отже, другий розділ окреслює цілісну методологічну архітектуру даної роботи. Починаючи від вибору аналітичних методів і побудови ієрархії критеріїв до впровадження ефективної цифрової платформи для моніторингу та підтримки прийняття інвестиційних рішень. Вироблені тут підходи й технічні рішення закладають міцний фундамент для практичної реалізації наступних етапів роботи, спрямованих на створення масштабованої та адаптивної інформаційної системи у межах платформи Kaggle.

3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

3.1. Підготовка даних для системного аналізу: збір, валідація та очищення

У цьому підрозділі реалізуємо повноцінний цикл підготовки даних, необхідних для подальшого аналізу та моделювання інвестиційного потенціалу відновлюваної енергетики у Вінницькій області. Збір інформації здійснюватимемо автоматизовано через NASA POWER API, що дозволяє отримати щомісячні метеорологічні показники (інсоляцію, швидкість вітру та температуру) за координатною сіткою Вінницької області, ключовими містами Вінниччини та обласними центрами інших регіонів України для порівняння. Після того проведемо над отриманими даними процедуру об'єднання, очищення від пропущених або аномальних значень, перетворення типів, а також збагачення шляхом генерації додаткових ознак — лагових, сезонних, географічних тощо.

Особливу увагу приділимо стандартизації ознак та приведенню їх до формату, зручного для машинного навчання. Конкретно, реалізуємо переведення метеорологічних величин до енергетичних одиниць, сформуємо календарні компоненти (синус і косинус місяця), розрахуємо показники генерації, додамо геокоординати та виконаємо конверсію швидкості вітру на висоту 80 м — стандартну для вітрових турбін. Такий підхід дозволяє створити єдину, структуровану базу даних, яка є надійною основою для точного прогнозування генерації енергії та проведення фінансового аналізу потенціалу інвестування у ВДЕ-рішення.

Детальніше ознайомитися з реалізацією даної система можна у лістингу коду (Додаток В.)

Спочатку створюємо блок 1, у якому імпортуємо всі необхідні бібліотеки. Після вставлення цього блоку в ноутбук і його виконання переконуємося, що середовище готове до подальшої роботи без помилок імпорту.

Після підтвердження успішного імпорту пакетів створюємо блок 2, в якому налаштовуємо середовище, визначаючи стиль графіків, а також оголошуємо допоміжні функції для фінансових розрахунків та роботи з API NASA POWER.

Далі переходимо до блоку 3, де здійснюємо завантаження кліматичних даних. Спочатку формуємо сітку точок по межах Вінницької області, після цього виконуємо ітераційний запит із показом прогресу і одразу аналізуємо отриману структуру. Бачимо, що для кожної пари координат запускається `fetch_nasa_data`, а помилки логуються й не зупиняють виконання.

Одразу після отримання даних по Вінницькій області створюємо блок 4, в якому задаємо словник із ключовими містами Вінницької області, виконуємо завантаження для кожного міста й спостерігаємо прогрес (рис. 3.1).

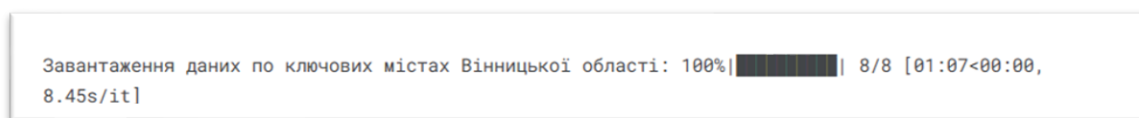
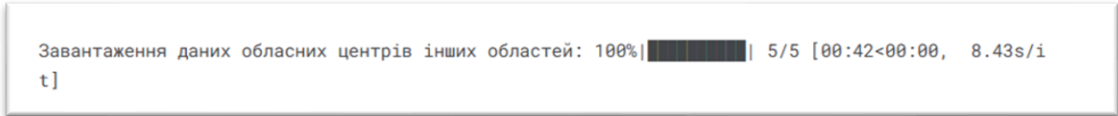


Рисунок 3.1 – Вигляд прогресу завантаження даних по ключових містах Вінницької області

Переходимо до блоку 5 і реалізовуємо в ньому завантаження даних обласних центрів інших областей задля порівняння кліматичних умов (рис. 3.2).



Завантаження даних обласних центрів інших областей: 100%| 5/5 [00:42<00:00, 8.43s/it]

Рисунок 3.2 – Вигляд прогресу завантаження даних обласних центрів інших областей

Далі у блоці 6 об'єднуємо списки у єдиний DataFrame і проводимо попередню очистку. Усуваємо записи з пропусками в ключових стовпцях, перетворюємо Year і Month у числовий тип, відкидаємо некоректні місяці, формуємо стовпець Date та додаємо синусо- і косинус-компоненти місяця для врахування циклічності сезонності.

У блоці 7 додаємо числові координати для кожного запису, викликаючи `extract_lat_lon`, яка розпізнає назву локації та повертає відповідні широту й довготу.

На наступному кроці в блоці 8 здійснюємо підняття швидкості вітру з висоти 2 м до 80 м за степеневим профілем із параметром $\alpha = 0.2$. Впроваджуємо новий стовпець `WindSpeed_80m` і оглядаємо описові статистики, порівнюючи з вихідною швидкістю.

У блоці 9 сортуємо DataFrame за City і Date, щоб коректно створити лагові ознаки, і формуємо лаги за 1 та за 12 місяців для `Temperature`, `SolarRadiation_MJ` та `WindSpeed_80m`. Після цього видаляємо записи, у яких з'явилися NA через зсув.

Після цього етапу отримуємо остаточно очищений і збагачений набір даних із усіма необхідними ознаками, а саме: вихідними кліматичними показниками, координатами, сезонними ознаками, піднятою швидкістю вітру, лагами.

У результаті весь процес підготовки даних реалізовано послідовно в одному ноутбукі з чітким відстеженням результатів після кожного кроку, що забезпечує

прозорість, відтворюваність і надійну основу для подальших підрозділів моделювання прогнозів генерації і фінансових розрахунків.

Після завершення всіх етапів підготовки даних виконуємо фінальний крок, який дозволяє зберегти отриманий DataFrame у зручному форматі для подальшого використання в моделях або зовнішньому аналізі. Для цього формуємо окремий блок 10, у якому задаємо назву вихідного файлу та зберігаємо дані у форматі CSV. Також реалізовуємо зручний HTML-вивід посилання на файл прямо у середовищі Kaggle чи Jupyter Notebook, що дозволяє одразу його завантажити (рис. 3.3).

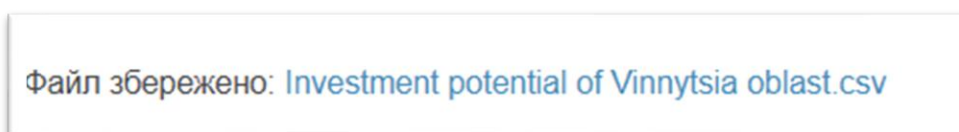


Рисунок 3.3 – Вигляд посилання на файл прямо у середовищі

Отримані дані підтверджують, що очищені й структуровані дані, які були отримані за результатами попередніх 10-ти блоків, успішно збережені у форматі .csv. Цей файл є повністю готовим для подальшої обробки (рис. 3.4). Зокрема, для навчання моделей прогнозування, проведення фінансових розрахунків, побудови візуалізацій, а також розповсюдження чи використання в інших програмних компонентах системи оцінки інвестиційного потенціалу.

Investment potential of Vinnytsia oblast.csv (920.2 kB) ↓ <

City	Year	Month	SolarRadiation_MJ	WindSpeed_2m	Temperature	Date
Bar	2014	1	0.76	4.02	-5.03	2014-01-01
Bar	2014	2	1.66	3.1	-2.46	2014-02-01
Bar	2014	3	3.04	3.61	5.0	2014-03-01
Bar	2014	4	4.0	2.76	9.0	2014-04-01
Bar	2014	5	5.5	2.58	15.28	2014-05-01
Bar	2014	6	5.93	2.56	16.9	2014-06-01
Bar	2014	7	5.74	2.4	20.2	2014-07-01
Bar	2014	8	5.05	2.16	20.15	2014-08-01
Bar	2014	9	4.31	2.47	14.93	2014-09-01
Bar	2014	10	2.56	2.76	6.76	2014-10-01
Bar	2014	11	0.94	2.52	-0.53	2014-11-01
Bar	2014	12	0.69	3.14	-3.82	2014-12-01
Bar	2015	1	0.77	3.77	-1.93	2015-01-01
Bar	2015	2	1.57	2.77	-1.96	2015-02-01

Рисунок 3.4 – Фрагмент готових даних для подальшої обробки

Таким чином, підрозділ 3.1 «Підготовка даних для системного аналізу: збір, валідація та очищення» послідовно реалізували через блоки:

1. Імпорт необхідних бібліотек
2. Налаштування
3. Завантаження даних по координатній сітці Вінницької області
4. Завантаження даних по ключових містах Вінницької області
5. Завантаження даних обласних центрів інших областей
6. Об'єднання та попередня обробка даних
7. Додавання Latitude, Longitude як числові ознаки
8. Конвертація швидкості вітру з 2 м до 80 м (степеневий профіль $\alpha = 0.2$)
9. Додаткові ознаки: лаги та ковзні середні для Temperature, SolarRadiation, WindSpeed
10. Збереження оброблених даних у CSV

Таким чином, завершення підготовки даних є логічно завершеним, і весь процес зведено до чіткої, модульної та автоматизованої послідовності.

3.2. Розробка моделей прогнозування та оцінки інвестиційного потенціалу

У цьому підрозділі реалізуємо побудову моделей прогнозування ключових кліматичних та енергетичних показників, що формують основу для оцінки інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлюваної енергетики. На основі підготовлених і очищених даних здійснимо розрахунок фактичної генерації сонячної та вітрової енергії для кожного місяця, виконаємо просторову та часову агрегацію даних на рівні області й регіонів для побудови узагальнених профілів. Далі проведемо комплексну візуалізацію — від сезонної динаміки до міжрегіональних порівнянь — з метою виявлення закономірностей у зміні генерації та температури.

Окрему увагу приділимо аналізу температури, яка виконує подвійну функцію. З одного боку, як незалежна змінна, що безпосередньо впливає на ефективність відновлюваних джерел енергії (особливо вітрової генерації), а з іншого — як цільова змінна, прогнозування якої важливе для довгострокового планування і врахування кліматичних трендів у проєктуванні ВДЕ-інфраструктури. Ретельний аналіз температури включатиме теплові карти, міжрічні тренди, розподіли та сезонні коливання, що дозволяє не лише зрозуміти поточні умови, а й виявити ознаки зміни клімату.

На завершення побудуємо моделі машинного навчання (Random Forest, XGBoost, MLP(нейронна мережа) та лінійна регресія) для прогнозування трьох основних змінних: сонячної генерації, вітрової генерації та температури. В рамках моделювання виконуватиметься підбір параметрів, оцінка якості прогнозів (MAE, RMSE, R^2), побудова графіків “реальне vs прогноз”, а також

аналіз залишків для виявлення потенційних системних похибок. Отримані результати моделювання є критично важливими для побудови фінансових сценаріїв, оцінки ризиків та визначення доцільності інвестицій у ВДЕ-проекти на рівні Вінницької області.

Спочатку переходимо до розрахунку фактичної генерації з урахуванням кліматичних показників. У блоці 11 перетворюємо щомісячну інсоляцію і швидкість вітру на прогнозовану генерацію сонячної та вітрової енергії для одиниці встановленої потужності.

Після виконання цього блоку, для кожного запису додано колонки `SolarRadiation_kWh`, `DaysInMonth`, `SolarGen_kWh_per_kW`, `SolarGen`, `HoursInMonth`, `WindGen_kWh_per_kW`, `WindGen`, а також відфільтровано негативні значення у двох ключових стовпцях. Зазначимо, що спочатку конвертуємо MJ в kWh, потім множимо на кількість днів і площу панелі за ефективності 18% з урахуванням коефіцієнта втрат 0.90, а для вітру застосовуємо класичну формулу $0.5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p \cdot A \cdot \text{години}$, ділимо на 1000 для отримання кВт·год. Далі фільтруємо аномалії, щоб у моделях не було негативної генерації.

У блоці 12 додаємо у `DataFrame` україномовні назви міст і регіонів, створюємо словник `name_map` і додаємо колонку `City-UA`.

Далі переходимо до блоку 13, де послідовно будуємо три графіки та тренд, а саме: 1. графік сезонної динаміки сонячної генерації (рис. 3.5).

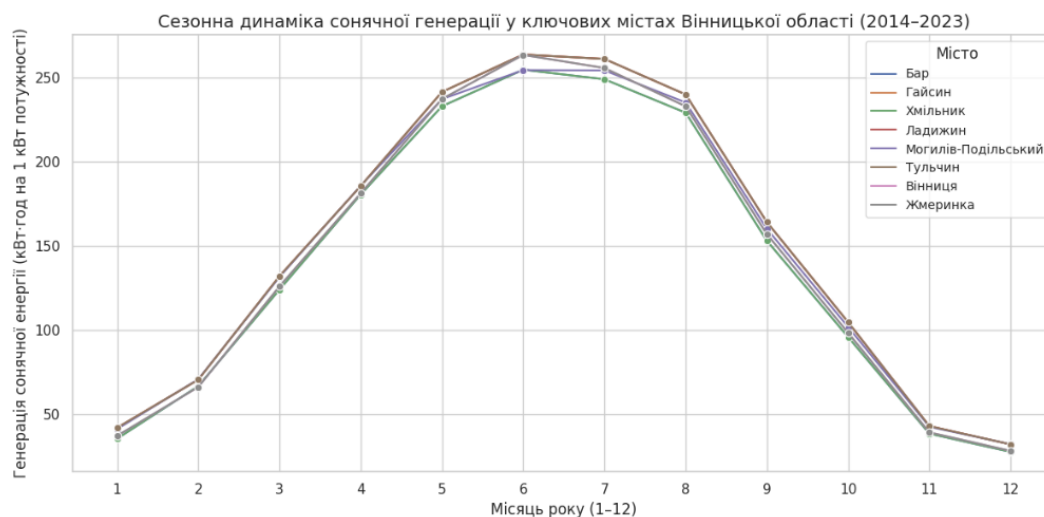


Рисунок 3.5 – Графік сезонної динаміки сонячної генерації у містах Вінницької області

На даному графіку бачимо, що зими характеризуються низькими показниками ($\approx 35 - 45$ кВт·год/1 кВт), весна починається з $\approx 65 - 75$ у лютому і $\approx 120 - 135$ у березні, далі стрімке зростання до піку в червні й липні ($\approx 230 - 270$). Пізніше трохи нижчий рівень у серпні ($\approx 230 - 260$), потім спад у вересені ($\approx 150 - 170$), жовтень $\approx 90 - 110$, і низькі значення в листопаді та грудні. Просторові відмінності між містами залишаються відносно невеликими (до $\approx 10 - 15\%$), але фіксуємо дещо вищі пікові показники влітку у Вінниці та Ладижині порівняно з Могилів-Подільським.

Отже, робимо висновок, що Вінницька область демонструє чітку річну циклічність сонячної генерації, з високою прогнозованістю та невеликими просторовими відмінностями. Таким чином, аналіз підтверджує стабільний потенціал сонячної енергії з перевагою в окремих містах за рахунок локальних умов. Це дає змогу аргументовано вибирати локації для СЕС, оцінювати їх окупність та стратегічно формувати портфель проектів із урахуванням локальних переваг.

2. Графік сезонної динаміки вітрової генерації (рис. 3.6).

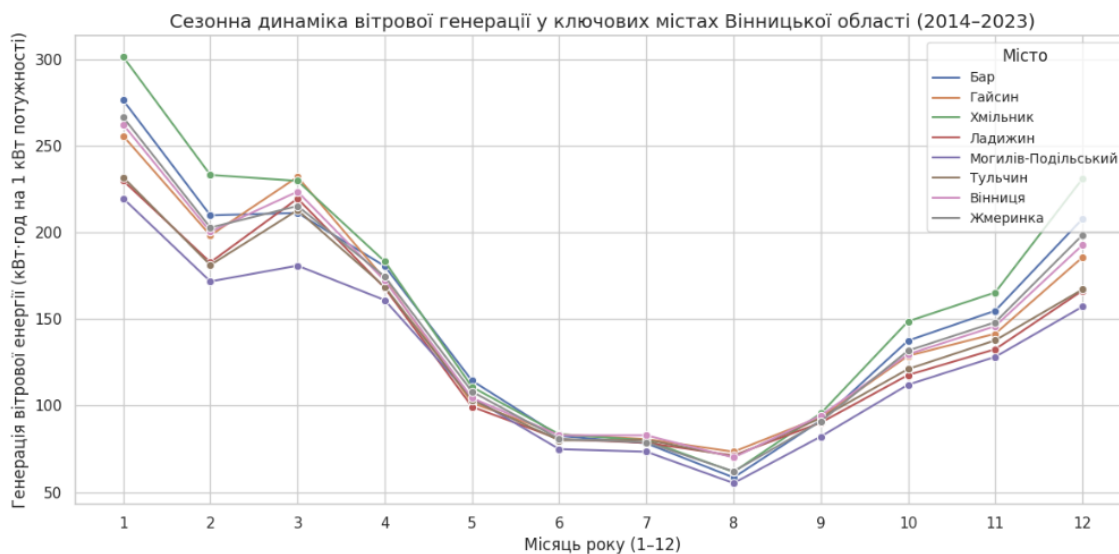


Рисунок 3.6 – Графік сезонної динаміки вітрової генерації у містах Вінницької області

На даному графіку бачимо чітку форму з піком у січні та лютому (до ≈ 250 – 300 кВт·год/1 кВт), поступовим зниженням у березні й квітні (до ≈ 180 – 220), різким падінням у травні та червні (до ≈ 100 – 120) та мінімумом у липні й серпні (≈ 55 – 80). Після цього відновлення восени, вересень (≈ 85 – 95), жовтень (≈ 120 – 140), листопад (≈ 130 – 155) і підйом у грудні (≈ 180 – 230). Просторові відмінності між містами невеликі (до ≈ 10 – 15 %), але фіксуємо трохи вищі зимові та осінні показники у Хмільнику та Вінниці порівняно з Могилів-Подільським.

Отже, робимо висновок про стабільну і передбачувану сезонну динаміку вітрової генерації з незначними локальними варіаціями з урахуванням топографії чи мікроклімату. Таким чином, регіон демонструє передбачувані періоди високої й низької генерації вітру. З позиції системного аналізу це дозволяє планувати встановлення потужностей ВЕС у певних містах чи районах, визначати стратегічні локації та синергетичні ефекти від мережевих зв'язків і зберігання енергії в періоди мінімуму.

3. Графік сезонної зміни середньомісячної температури (рис.3.7).

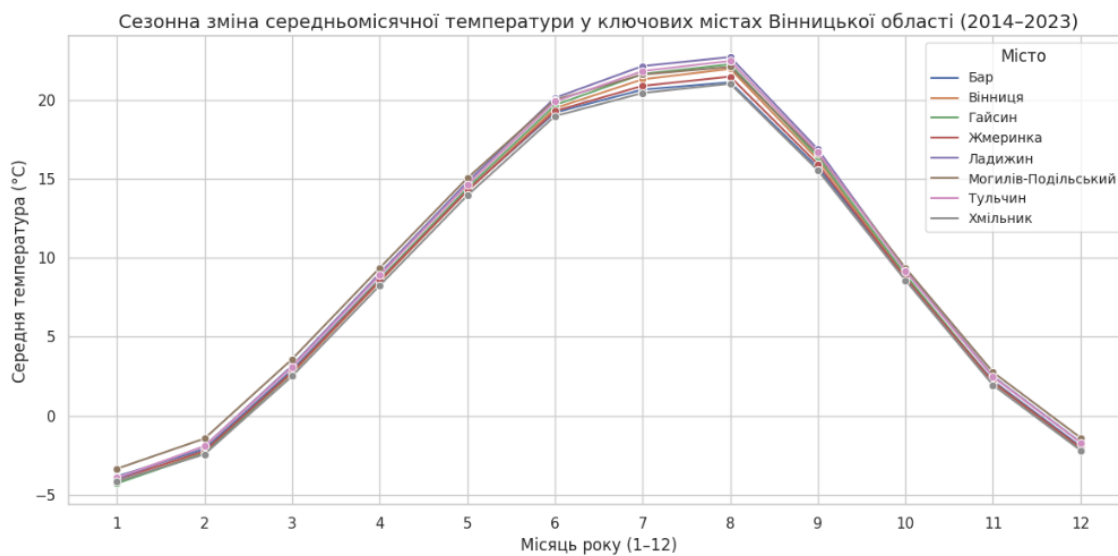


Рисунок 3.7 – Графік сезонної зміни середньомісячної температури у містах Вінницької області

На даному графіку бачимо, що зими характеризуються низькими показниками ($\approx 35\text{--}45$ кВт·год/1 кВт), весна починається з $\approx 65\text{--}75$ у лютому і $\approx 120\text{--}135$ у березні. Далі стрімке зростання до піку в червні–липні ($\approx 230\text{--}270$), трохи нижчий рівень у серпні $\approx 230\text{--}260$, потім спад, вересень $\approx 150\text{--}170$, жовтень $\approx 90\text{--}110$, і низькі значення в листопаді–грудні $\approx 35\text{--}45$. Просторові відмінності між містами залишаються відносно невеликими (до $\approx 10\text{--}15\%$), але фіксуємо дещо вищі пікові показники влітку у Вінниці та Ладизині порівняно з Могилів-Подільським.

Отже, робимо висновок, що Вінницька область демонструє чітку річну циклічність сонячної генерації, з високою прогнозованістю та невеликими просторовими відмінностями. Таким чином, аналіз підтверджує стабільний потенціал сонячної енергії з перевагою в окремих містах за рахунок локальних умов. З позиції системного аналізу це дає змогу аргументовано вибирати локації

для СЕС, оцінювати їх окупність та стратегічно формувати портфель проектів із урахуванням локальних переваг.

4. Тренд зміни середньої температури у чотирьох ключових місяцях (січень, квітень, липень, жовтень) (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Тренд зміни середньої температури у ключових місяцях по роках

На даному графіку бачимо окремі лінії для січня, квітня, липня та жовтня. Січеві значення змінюються від ≈ -5 °C у 2014 до ≈ -0.5 °C у 2023 із коливаннями та найнижчими точками близько -8 °C у 2016–2017, після чого поступове підвищення. Квітень демонструє коливальний тренд від ≈ 9 °C у 2014 до ≈ 8 °C у 2023 із піком ≈ 11.5 °C у 2016 і провалами в 2017 та 2021. Липень зберігає стабільність на рівні ≈ 21 °C у 2014–2023 із деякими піками до ≈ 23 °C у 2015 і 2021 та трохи нижчими значеннями в 2017–2018. Жовтень показує підйом від ≈ 7 °C у 2014 до ≈ 12 °C у 2023 із помірним зростанням після 2017 і піком ≈ 12 °C у 2020. Просторові відмінності між роками демонструють загальний тренд потепління січня і жовтня, стабільність літнього місяця та коливання квітня.

Отже, робимо висновок про кліматичні зміни, а саме: зимово-осінні місяці мають тенденцію до потепління, літня температура залишається стабільно високою, а весняний місяць демонструє більшу мінливість. Таким чином, трендовий аналіз ключових місяців підкреслює важливі аспекти зміни клімату, які слід враховувати у довгострокових стратегіях розвитку ВДЕ та адаптації інфраструктури. З позиції системного аналізу це показує, що необхідно проєктувати стратегії з урахуванням поступового потепління на початку й кінці року, яке може впливати на сезонність попиту, зимову ефективність обладнання та потребу в адаптаційних заходах.

Перш ніж перейти до моделювання, агрегуємо дані по Вінницькій області загалом. У блоці 14 створюємо новий стовпець `Region`, присвоюючи `"Vinnytsia_Region"` для записів з комірок сітки, групуємо по `Year` і `Month`, обчислюючи середні значення ключових ознак, а потім додаємо колонки `City` і `City_UA`, а також `Date`.

У блоці 15 аналогічно агрегуємо дані для інших областей (на основі їхніх обласних центрів), використовуючи словник `oblast_centers`. Для кожного регіону групуємо по `Year`, `Month`, обчислюємо ті ж середні ознаки, додаємо `City`, `City_UA` і `Date`, а потім об'єднуємо всі результати в `all_regions_df`. Після цього ми можемо виконувати порівняльні аналізи між регіонами.

Наступним кроком, у блоці 16, будуємо порівняльні графіки сезонності сонячної генерації (рис. 3.9), сезонності вітрової генерації (рис. 3.10), сезонності сезонної температури (рис. 3.11) у кількох регіонах, а також середньорічну генерацію сонячної та вітрової енергії (рис. 3.12).

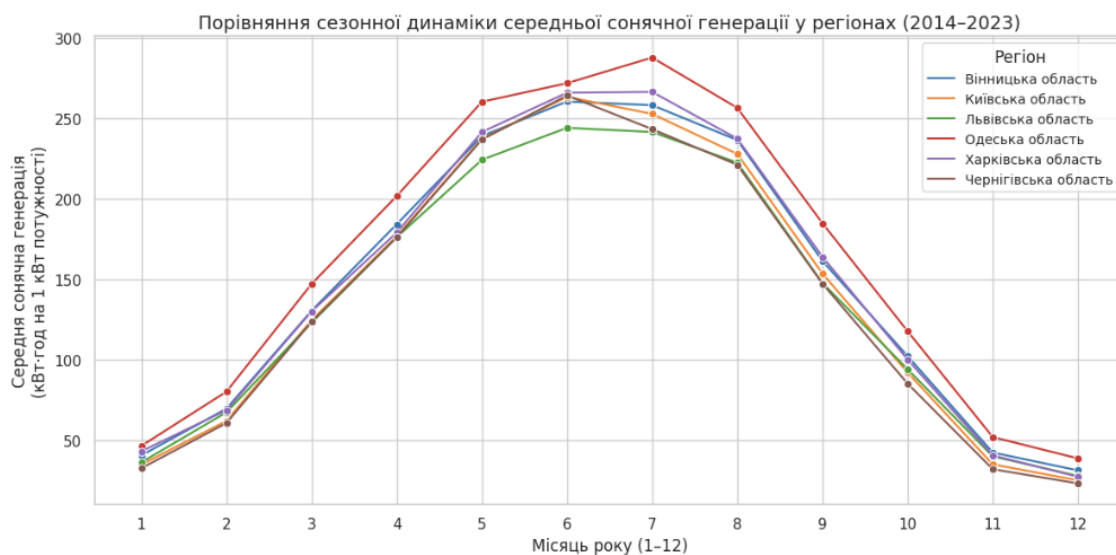


Рисунок 3.9 – Графік порівняння сезонної динаміки середньої сонячної генерації у регіонах

На даному графіку чітко спостерігаємо зростання навесні від низьких показників взимку до піку в червні–липні, потім спад до кінця року. Деякі регіони мають вищу середню генерацію в ті ж місяці, інші — трохи нижчу, але форма циклу ідентична.

Отже, робимо висновок про передбачуване повторення сезонної кривої сонячної генерації і регіональні варіації абсолютних значень. Таким чином, кожен регіон може використовувати цю інформацію для оцінки потенціалу та порівняння ефективності систем. У контексті Вінницької області це підкреслює, наскільки її сонячний потенціал відповідає або відрізняється від інших регіонів, що є важливим при розробці масштабних програм підтримки чи залучення інвесторів.

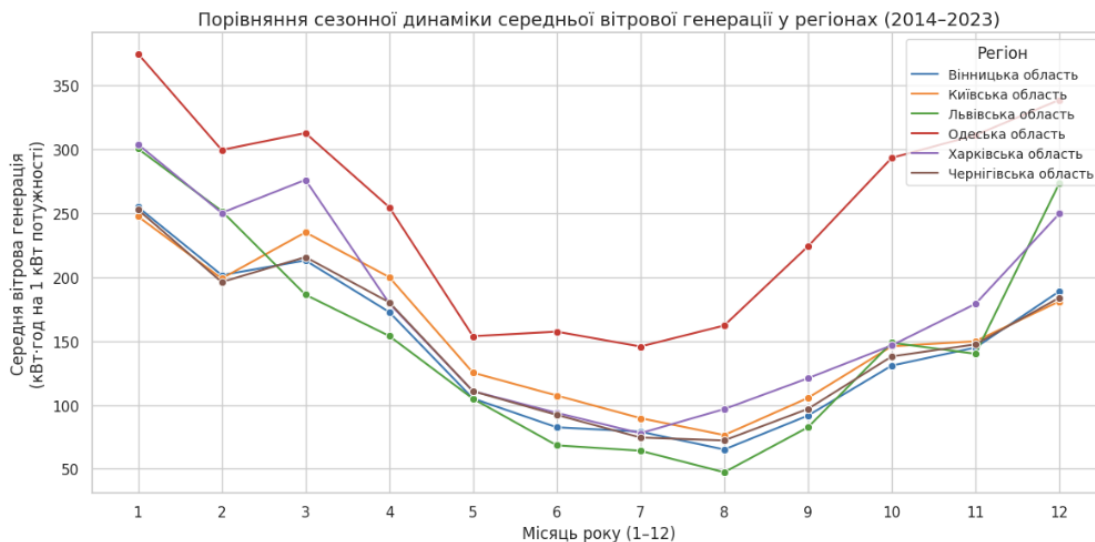


Рисунок 3.10 – Графік порівняння сезонної динаміки середньої вітрової генерації у регіонах

На даному графіку бачимо, що в усіх регіонах присутні чіткі піки в весняні (березень–травень) та осінні (жовтень–листопад) місяці, а мінімум припадає на липень–серпень. Спостерігаємо, що одні регіони мають значно вищі середні показники, інші — нижчі, але форма сезонної кривої універсальна.

Отже, робимо висновок про сталість сезонного патерну вітрової генерації і важливість міжсезоння для ВЕС. Таким чином, регіональні особливості потенціалу вітру полягають у величині піків, але загальна форма циклу відтворюється в усіх областях. З позиції системного аналізу це дозволяє порівняти Вінницьку область з іншими регіонами, оцінити конкурентоспроможність ВЕС-проектів і вирішити, чи варто об'єднувати ресурси або диверсифікувати портфель проектів за географією.

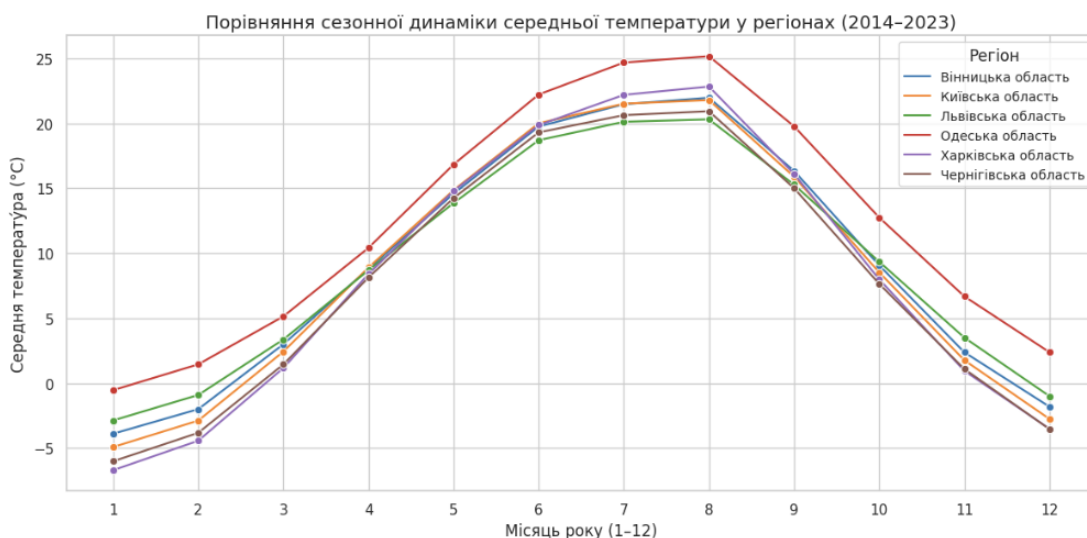


Рисунок 3.11 – Графік порівняння сезонної динаміки середньої температури у регіонах

На даному графіку бачимо плавну синусоїдальну зміну з мінімумом у січні та максимумом у липні–серпні, з незначним розсіюванням навколо середньої. Просторові відмінності між регіонами мінімальні, адже температурні умови схожі, і сезонні форми майже ідентичні.

Отже, робимо висновок про кліматичну однорідність і стабільну сезонну структуру температури, що спрощує порівняння регіонів з точки зору впливу температури на ВДЕ. Таким чином, температура не створює значних бар'єрів у різних регіонах з огляду на сезонні зміни. З позиції системного аналізу це означає, що Вінницька область має подібні температурні умови до сусідніх регіонів, отже можна моделювати вплив температури на продуктивність ВДЕ аналогічно, не потребуючи значних локальних коригувань.

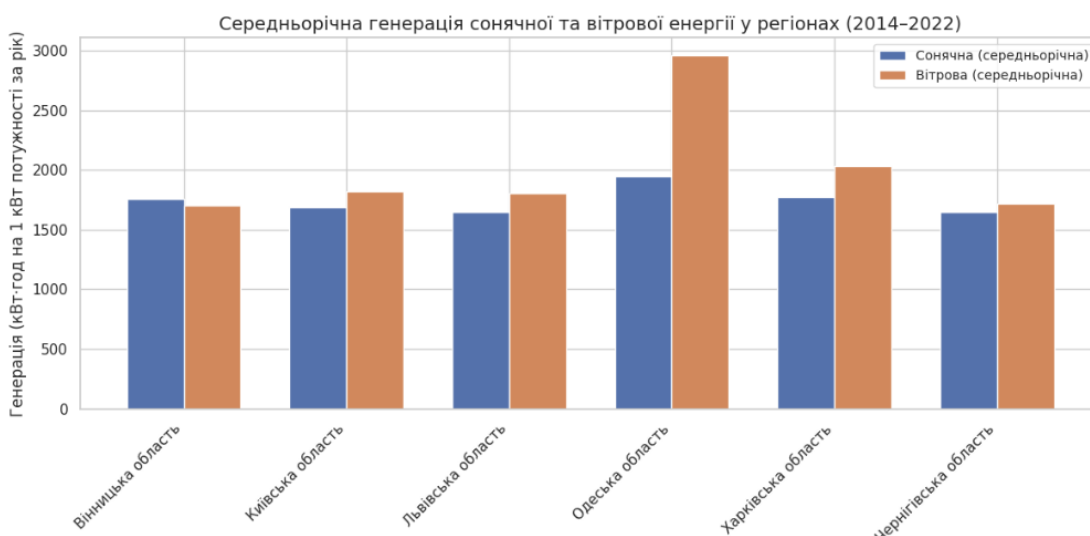


Рисунок 3.12 – Графік середньорічної генерації сонячної та вітрової енергії у регіонах

На даному графіку бачимо, що Вінницька область має середньорічну сонячну генерацію ≈ 1750 кВт·год/1 кВт та вітрову ≈ 1700 кВт·год/1 кВт, Київська область — сонячну ≈ 1680 , вітрову ≈ 1800 , Львівська — сонячну ≈ 1650 , вітрову ≈ 1800 , Одеська — сонячну ≈ 1950 , вітрову ≈ 2950 , Харківська — сонячну ≈ 1780 , вітрову ≈ 2050 , Чернігівська — сонячну ≈ 1650 , вітрову ≈ 1750 . Одеська область вирізняється значно більшим вітровим потенціалом і високим сонячним, тоді як Вінницька область демонструє збалансований потенціал сонця та вітру.

Отже, робимо висновок про різні профілі ВДЕ в регіонах. Одеса з перевагою ВЕС, Вінниця з рівномірним потенціалом. Таким чином, стратегія розвитку ВДЕ має враховувати регіональні особливості потенціалу обох технологій. Системний аналіз інвестиційного потенціалу потребує порівняльного погляду на регіони, щоб виявити конкурентні переваги Вінницької області та її місце у загальнодержавній чи міжнародній стратегії розвитку ВДЕ.

Після цих графіків маємо порівняльне уявлення про сезонну та середньорічну генерацію в різних регіонах (рис. 3.9–3.12). Ці візуалізації використовуємо для оцінки конкурентоспроможності регіонів і визначення,

наскільки інвестиції в сонячну чи вітрову енергетику можуть бути ефективними у Вінницькій області порівняно з іншими.

Переходимо до підготовки даних для моделювання і оцінки показників якості. У блоці 17 обираємо дані Вінницької області (`region_df_vin`), визначаємо списки ознак для моделей прогнозування генерації та температури, сортуємо за часом, додаємо індекс дати і розбиваємо на `train/test`. Обираємо тестовий рік — 2023, а тренувальні — усі попередні.

Наступним кроком у цьому ж блоці запускаємо цикл по цільових змінних, у якому для кожної обираємо відповідні ознаки, масштабуємо їх через `StandardScaler`, застосовуємо `TimeSeriesSplit` для крос-валідації, перебираємо моделі `Random Forest`, `XGBoost`, `MLPRegressor` (із різними налаштуваннями для `SolarGen` та `WindGen`), а також лінійну регресію. Після навчання кожної моделі на тренувальних даних прогнозуємо для тестових, обчислюємо `MAE`, `RMSE`, `R2` і зберігаємо результати.

Після виконання цього циклу спостерігаємо таблиці з оцінками кожної моделі на 2023 рік для генерації сонячної енергії (рис. 3.13), генерації вітрової енергії (рис. 3.14) і генерації температури (рис. 3.15). `Random Forest` і `XGBoost` підбираємо через `GridSearchCV` із `TimeSeriesSplit`, `MLPRegressor` навчаємо з різними архітектурами, а також порівнюємо з простою лінійною регресією. Після навчання кожної моделі дивимося `MAE`, `RMSE`, `R2`, аналізуємо, яка модель найкраща.

Порівняння моделей для цільової змінної:

SolarGen_kWh_per_kW

	Модель	MAE	RMSE	R ²
3	Лінійна регресія	13.830	20.926	0.943
0	Random Forest	19.662	28.343	0.895
1	XGBoost	21.056	28.369	0.895
2	MLP (Нейромережа)	22.843	31.065	0.874

Рисунок 3.13 – Результат навчання моделей для генерації сонячної енергії

В отриманих результатах бачимо, що для SolarGen_kWh_per_kW найкращі показники продемонструвала Лінійна регресія (MAE = 13.83, RMSE = 20.93, R² = 0.943), тоді як складніші моделі, як Random Forest, XGBoost і MLP, показали гірші результати, де R² = 0.895 для Random Forest та XGBoost і лише 0.874 для MLP із вищими MAE та RMSE.

Отже, робимо висновок про те, що залежність SolarGen_kWh_per_kW у наявних даних виявляється досить лінійною або добре описується простішим підходом, і складніші нелінійні моделі можуть «перемодельовати» або недостатньо додавати інформативності порівняно з лінійною регресією. Висока точність лінійної моделі вказує на те, що ознаки (такі як кількість сонячних годин, температури, інсоляція тощо) взаємодіють із цільовою змінною досить прямо, без потреби в надскладних представленнях. У контексті прогнозування генерації сонячної енергії це означає, що можемо віддавати перевагу простим моделям, які легше інтерпретувати, швидше тренувати та надійніше впроваджувати в автоматизовані системи оцінки потенціалу.

Порівняння моделей для цільової змінної:
WindGen_kWh_per_kW

	Модель	MAE	RMSE	R ²
2	MLP (Нейромережа)	3.950	5.764	0.996
1	XGBoost	6.623	10.302	0.986
3	Лінійна регресія	10.672	11.938	0.981
0	Random Forest	12.036	23.452	0.928

Рисунок 3.14 – Результат навчання моделей для генерації вітрової енергії

В отриманих результатах бачимо, що для WindGen_kWh_per_kW зовсім інша картина. Найкращий результат показала MLP (MAE = 3.95, RMSE = 5.76, R² = 0.996), потім XGBoost (MAE = 6.62, RMSE = 10.30, R² = 0.986), Лінійна регресія демонструє гідний, але менш точний рівень (MAE = 10.67, RMSE = 11.94, R² = 0.981), а Random Forest має найгірші показники (MAE = 12.04, RMSE = 23.45, R² = 0.928). Надзвичайно високий R² для MLP і дуже низькі MAE/RMSE вказують на те, що нейромережа змогла «виловити» складну нелінійну структуру у даних вітрової генерації, ймовірно, враховуючи взаємодії багатьох ознак, які впливають на потужність вітру (атмосферні умови, швидкість вітру на різних висотах, часові лаги тощо).

Отже, дійшли висновку, що для прогнозу вітрової генерації потрібно фокусуватися на MLP та/або XGBoost, водночас уважно контролювати ризик перенавчання через правильне розбиття даних і регуляризацию. Аналіз показує, що хоч і вітрова генерація загалом мінливіша, та вдало налаштована нейромережа здатна до високої точності прогнозу.

Порівняння моделей для цільової змінної:

Temperature

	Модель	MAE	RMSE	R ²
1	XGBoost	1.123	1.371	0.975
0	Random Forest	1.245	1.579	0.967
3	Лінійна регресія	1.468	1.951	0.949
2	MLP (Нейромережа)	1.960	2.503	0.917

Рисунок 3.15 – Результат навчання моделей для середньої температури

В отриманих результатах бачимо, що для Temperature найкращий результат має XGBoost (MAE = 1.123, RMSE = 1.371, $R^2 = 0.975$), потім Random Forest (MAE = 1.245, RMSE = 1.579, $R^2 = 0.967$), далі Лінійна регресія (MAE = 1.468, RMSE = 1.951, $R^2 = 0.949$), а MLP показує найгірші результати (MAE = 1.960, RMSE = 2.503, $R^2 = 0.917$). Це свідчить, що для температурних рядів найкраще підходять градієнтні бустингові моделі, які можуть уловлювати як тренди, так і невеликі нелінійності, пов'язані зі складними кліматичними взаємодіями. Random Forest теж демонструє високу точність, але трохи нижчу від XGBoost, а простіша Лінійна регресія забезпечує гідний, проте менш точний прогноз. MLP, ймовірно, недостатньо ефективно навчається на цих даних без особливої архітектури або через недостатній обсяг/характер ознак, що вказує на необхідність ретельного налаштування нейромережових підходів або їх обмежену доцільність для температурного прогнозу в даному контексті.

Отже, робимо висновок, що для Temperature першочергово потрібно використовувати XGBoost як баланс між точністю і інтерпретованістю та потужністю моделі. Лінійна регресія може використовуватися як базова перевірка, а Random Forest — як додатковий метод для перевірки стабільності результатів.

У блоці 18 будемо графіки «Прогнози vs Реальні значення» за місяцями 2023 року для генерації сонячної енергії (рис. 3.16), генерації вітрової енергії (рис. 3.17) і генерації температури (рис. 3.18).

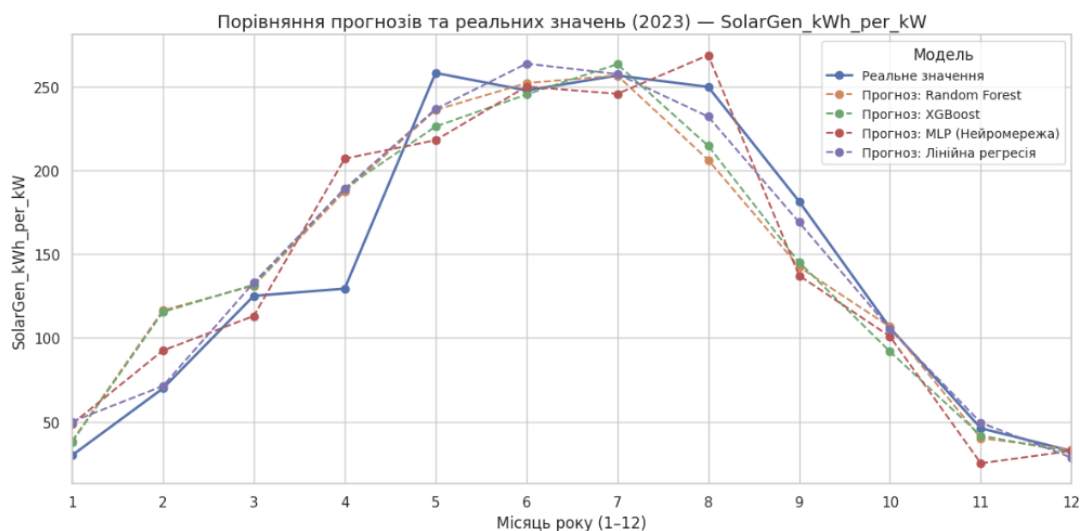


Рисунок 3.16 – Графік порівняння прогнозів та реальних значень для сонячної енергії

На даному графіку бачимо, що лінійна регресія найточніше відображає реальну сезонну криву. Пікові значення в червні–липні і мінімум у зимові місяці практично накладаються, з незначними відхиленнями у перехідні місяці (невелике недопрогнозування в березні та вересні). Це корелює з тим, що лінійна модель показує найкращі метрики ($MAE = 13.83$, $RMSE = 20.93$, $R^2 = 0.943$), у той час як складніші моделі дають гірші результати.

Отже, робимо висновок, що прогноз від лінійної регресії повторює форму фактичних даних зі сталою точністю, підтверджуючи лінійний характер впливу ключових ознак (сонячні години, температура, інсоляція) на генерацію. У практичному застосуванні це означає, що для оцінки потенціалу сонячної енергетики можна використовувати просту, інтерпретовану та швидко треновану модель без втрати якості прогнозу.

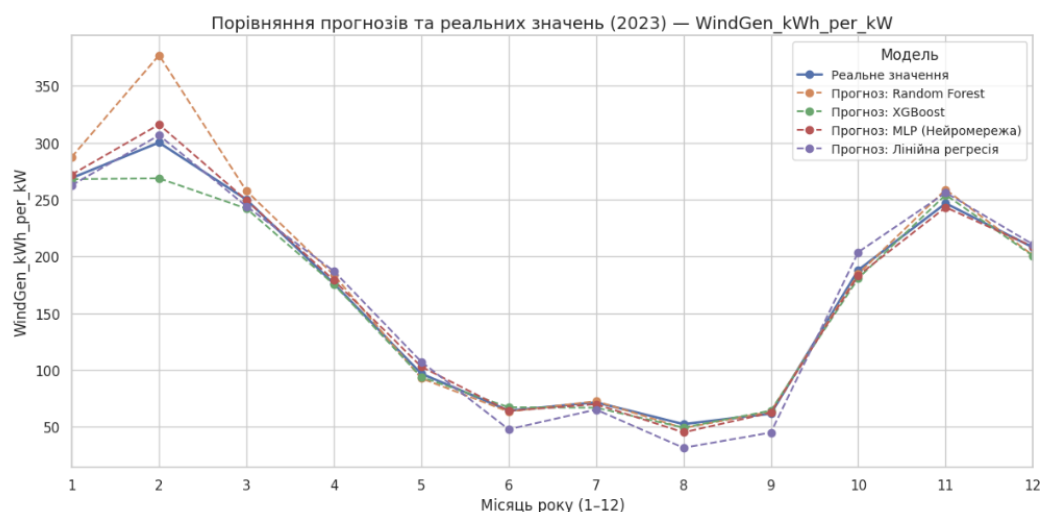


Рисунок 3.17 – Графік порівняння прогнозів та реальних значень для вітрової енергії

На даному графіку бачимо, що моделі загалом відтворюють сезонну криву (піки навесні/восени, спад влітку), проте в пікові моменти присутні помітні розбіжності між прогнозом і фактом. З огляду на навчання моделей найкращі результати показала MLP ($MAE = 3.95$, $RMSE = 5.76$, $R^2 = 0.996$), далі XGBoost, тоді як Лінійна регресія і Random Forest мають вищі похибки.

Отже, робимо висновок, що хоч і прогнозна модель дозволяє відтворити загальну форму коливань вітрової генерації, та все ж найточніші передбачення досягаються складнішими нелінійними підходами (MLP або XGBoost), що враховують складну взаємодію погодних ознак. Водночас навіть вони іноді недооцінюють або переоцінюють піки, тож у практичних застосунках слід ретельно контролювати валідацію моделі, щоб знизити вплив залишкових помилок на фінансові оцінки проектів ВЕС.

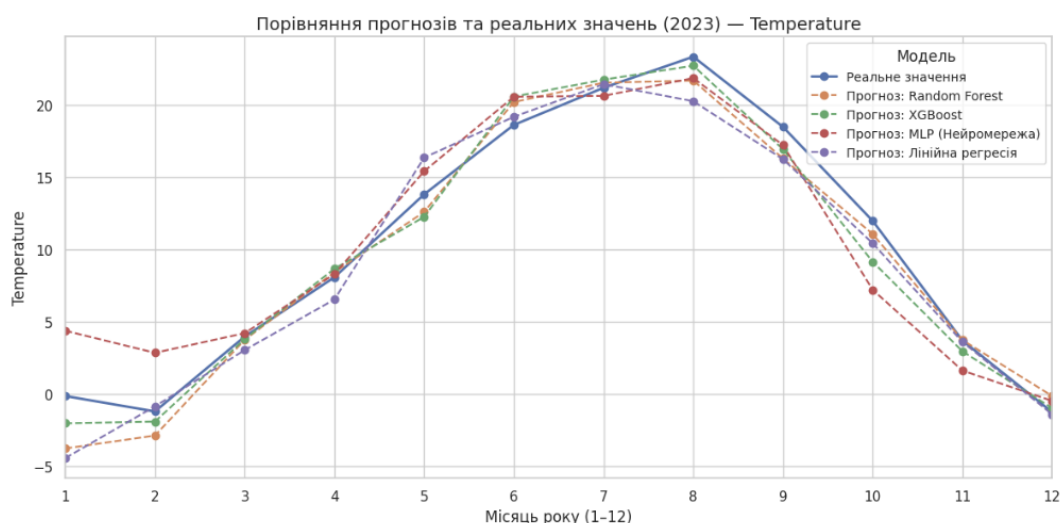


Рисунок 3.18 - Графік порівняння прогнозів та реальних значень для температури

На даному графіку бачимо високу відповідність між реальними спостереженнями та результатами моделі XGBoost. Візуально лінії практично збігаються, що підтверджує отриманий раніше високий рівень точності ($MAE = 1.12$, $RMSE = 1.37$ та $R^2 = 0.975$). Це свідчить про те, що модель ефективно врахувала сезонність, тренди й коливання температури без перенавчання.

Отже, робимо висновок, що температурний ряд добре піддається прогнозуванню за допомогою градієнтного бустингу. Така модель може застосовуватись як допоміжний компонент у прогнозах сонячної та вітрової генерації, а також в енергетичному моделюванні, де температура є однією з ключових змінних.

Після виконання цього блоку бачимо три графіки, де лінія реальних середніх значень по місяцях 2023 порівнюється з прогнозами різних моделей (рис. 3.16 – рис. 3.18). Ці графіки допомагають зрозуміти, наскільки моделі відтворюють сезонну форму в 2023 році, в яких місяцях є недоопрацювання або переоцінка.

Далі переходимо до оцінки залишків моделей. У блоці 19 обчислюємо залишки (різницю реального і прогнозу) по місяцях для кожної моделі і будуємо лінійні графіки залишків, щоб побачити системні зсуви.

Після виконання отримуємо окремі графіки залишків прогнозу генерації сонячної енергії (рис. 3.19), генерації вітрової енергії (рис. 3.20) і генерації температури (рис. 3.21), де бачимо середню місячну помилку моделей, що допомагає оцінити, чи є систематичні зсуви в певні місяці, а це важливо для аналізу ризиків інвестицій.

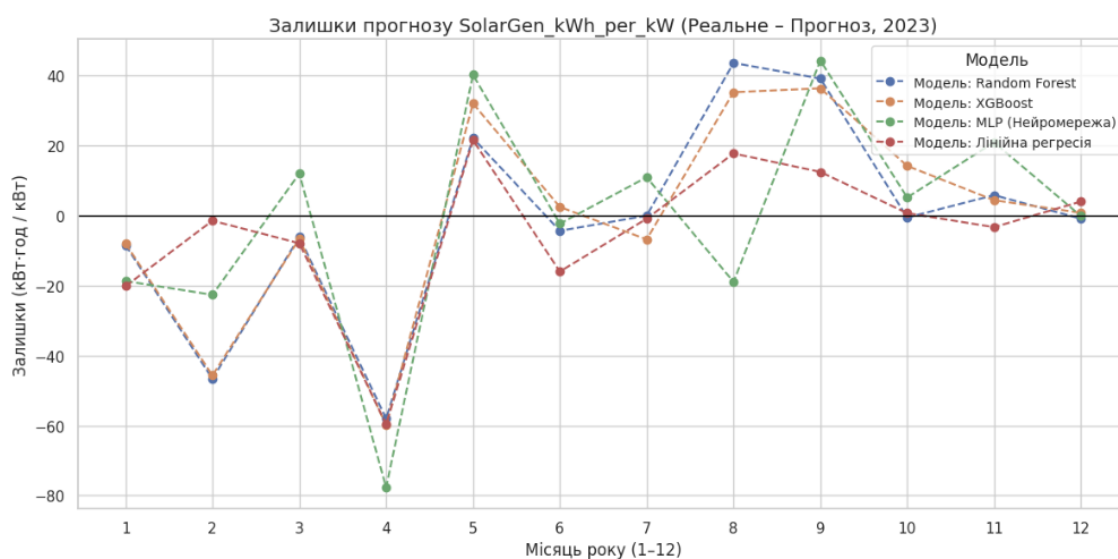


Рисунок 3.19 – Графік залишків прогнозів для генерації сонячної енергії

На даному графіку бачимо, що для лінійної регресії залишки мають найменшу дисперсію та розподілені доволі рівномірно навколо нуля, без систематичних зміщень. Це свідчить про високу якість прогнозу і коректне охоплення трендів у даних. Для Random Forest та XGBoost залишки мають дещо ширше розсіювання, а для MLP простежуємо як більші амплітуди відхилень, так і окремі періоди з вираженими недооцінками або переоцінками.

Отже, робимо висновок, що це підтверджує результати з метрик якості про те, що найменш зміщену та найстабільнішу поведінку демонструє саме Лінійна регресія. У контексті прогнозування генерації це особливо важливо, адже низька варіативність залишків забезпечує вищу довіру до прогнозів та спрощує розрахунок фінансових ризиків. Таким чином, залишки підкріплюють вибір лінійної моделі як найнадійнішої для оцінки потенціалу сонячної енергетики у Вінницькій області.

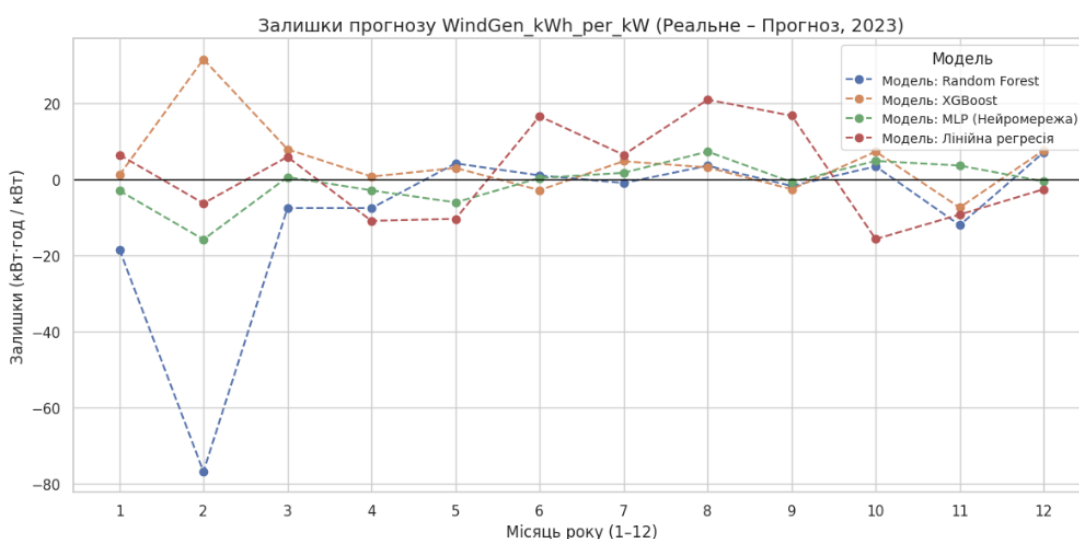


Рисунок 3.20 – Графік залишків прогнозів для генерації вітрової енергії

На даному графіку бачимо, що похибки моделі здебільшого розподілені навколо нуля, що свідчить про відсутність систематичного зсуву в передбаченнях. Водночас спостерігаємо помітне розширення діапазону залишків у пікові періоди генерації, навесні та восени, коли сплески вітрової активності складніше точно спрогнозувати через більшу варіативність погодних умов. У літні місяці залишки є найменшими, що узгоджується з відносно низькою і стабільною вітровою генерацією в цей час. Також не бачимо явної асиметрії, а це означає, що модель не схильна постійно завищувати чи занижувати прогнози.

Отже, робимо висновок, що це підтверджує високий рівень точності обраної моделі (MLP), особливо з огляду на її коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.996$. Такий розподіл залишків є прийнятним для застосування моделі в інвестиційних розрахунках, однак наявність вищих відхилень у пікові моменти наголошує на потребі врахування потенційної похибки під час моделювання прибутковості проєктів, особливо у високогірних або відкритих місцевостях. У підсумку, аналіз залишків показує якісну надійність передбачень.

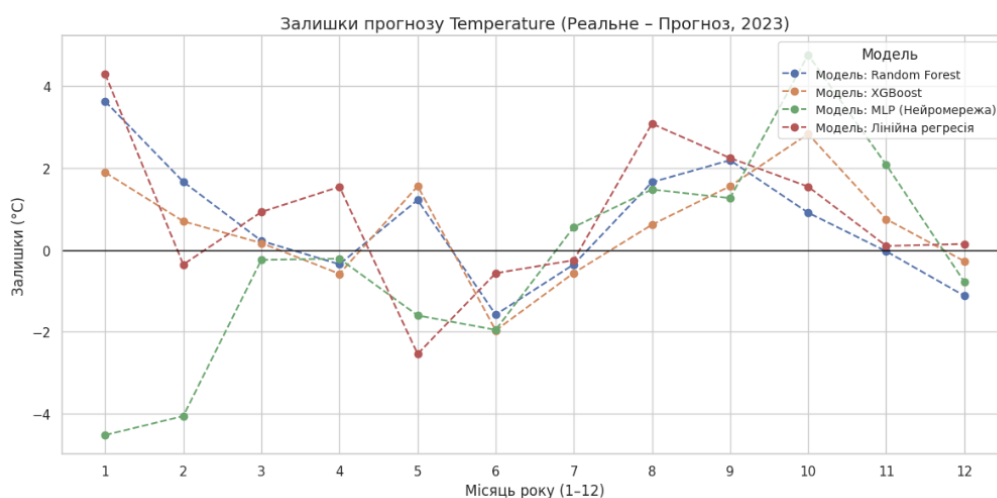


Рисунок 3.21 – Графік залишків прогнозів для температури

На даному графіку бачимо, що похибки моделі є рівномірно розподіленими навколо нуля без чітко вираженого тренду чи сезонної систематичності. Це вказує на відсутність суттєвого зміщення моделі та свідчить про її здатність коректно відтворювати як середні значення, так і крайні температурні значення протягом року. Розкид залишків не виходить за межі ± 3 °C у більшості випадків, що підтверджується й чисельними метриками, де найкраща модель XGBoost досягла $R^2 = 0.975$, тоді як інші моделі, зокрема MLP і Лінійна регресія, поступаються за точністю.

Отже, робимо висновок, що модель добре справляється з прогнозуванням температури, забезпечуючи високу точність без систематичних помилок. Така стабільність у прогнозуванні температури є критично важливою в контексті оцінки інвестиційного потенціалу, оскільки температура безпосередньо впливає як на сонячну генерацію (через ККД панелей), так і на попит на енергію (особливо у пікові періоди споживання). Надійне передбачення температури дозволяє інвесторам краще моделювати як технічні, так і економічні аспекти енергопроектів.

Далі досліджуємо зміни температури по роках і місяцях у Вінницькій області. У блоці 20 будуємо теплову карту середньомісячної температури за роками (рис. 3.22).

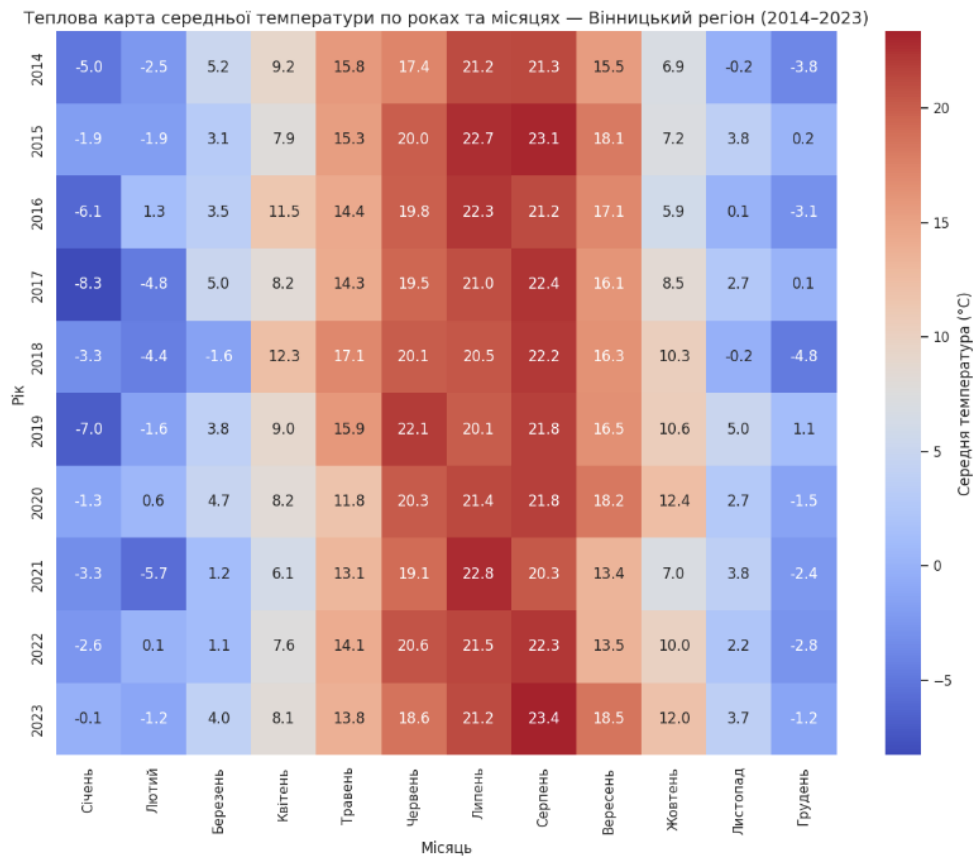


Рисунок 3.22 – Теплова карта середньої температури по роках та місяцях
— Вінницька область

На отриманій тепловій карті бачимо в матриці, що січніві середні температури коливаються від -8.3°C (2017) до -0.1°C (2023), лютневі — від -5.7 до $+0.6^{\circ}\text{C}$, березневі — від 1.1 до 5.2°C , квітневі $\approx 6.1-9.2^{\circ}\text{C}$, травневі $\approx 11.8-15.8^{\circ}\text{C}$, червневі $\approx 17.1-20.0^{\circ}\text{C}$, липневі $\approx 20.0-23.4^{\circ}\text{C}$, серпневі $\approx 20.3-23.4^{\circ}\text{C}$, вересневі $\approx 13.4-18.5^{\circ}\text{C}$, жовтневі $\approx 6.9-12.4^{\circ}\text{C}$, листопадові $\approx 2.7-10.6^{\circ}\text{C}$, грудневі $\approx -4.8-3.8^{\circ}\text{C}$. Просторові відмінності між роками у кожному місяці вказують на значні міжрічні відхилення. Деякі роки мають тепліші зими й осені (наприклад, 2023), інші — холодніші (2017), але загальна сезонна структура зберігається з чітким підйомом у літні місяці та спадом взимку.

Отже, робимо висновок про виразну сезонність та кліматичну мінливість у різні роки, що важливо враховувати при довгостроковому плануванні ВДЕ. Зокрема для оцінки ризиків, пов'язаних із екстремальними температурами. Таким чином, тепла карта підкреслює як сталість сезонного циклу, так і міжрічні відмінності, які можуть впливати на експлуатаційні та фінансові показники. У системному аналізі це допомагає врахувати ризики кліматичних аномалій, планувати резерви та адаптаційні заходи.

Після виконання цього блоку спостерігаємо теплову карту (рис. 3.22), де легко бачимо, найбільш теплі чи холодні місяці у різні роки, що є важливим фактором для довгострокового прогнозування та оцінки кліматичних ризиків.

Далі у блоці 21 перевіряємо розподіл температур для ключових місяців щороку за допомогою KDE-графіків. Це допомагає оцінити варіативність температури та тренди зміни розподілу.

Після виконання цього блоку отримуємо серію графіків (рис. 3.23, рис. 3.24) по кожному року, які показують розподіл температур у січні, квітні, липні й жовтні. Аналіз розподілу (не лише середніх) важливий для розуміння варіативності клімату і, відповідно, ризиків інвестицій у ВДЕ (наприклад, більша варіативність може означати вищі невизначеності в прогнозі генерації).

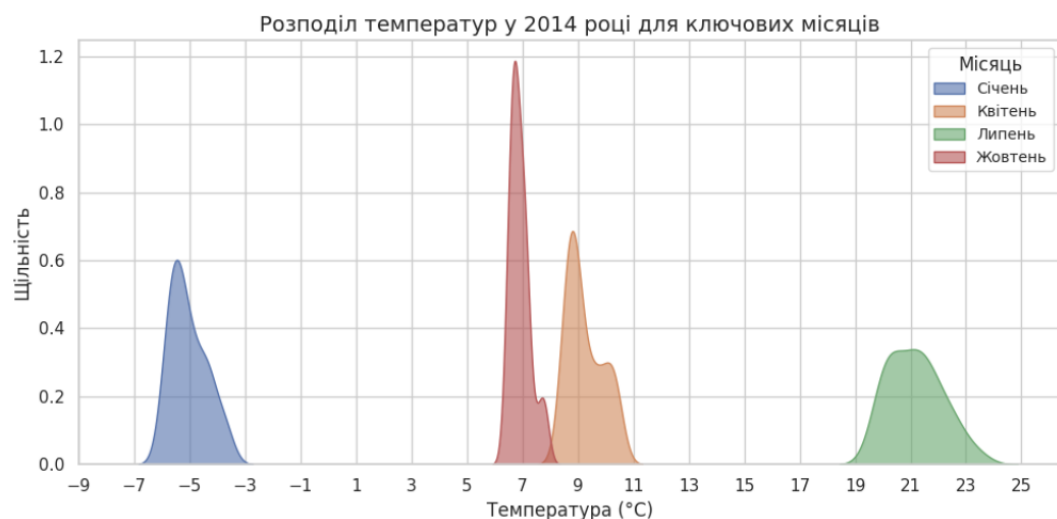


Рисунок 3.23 – Графік розподілу температур у 2014 році для ключових місяців

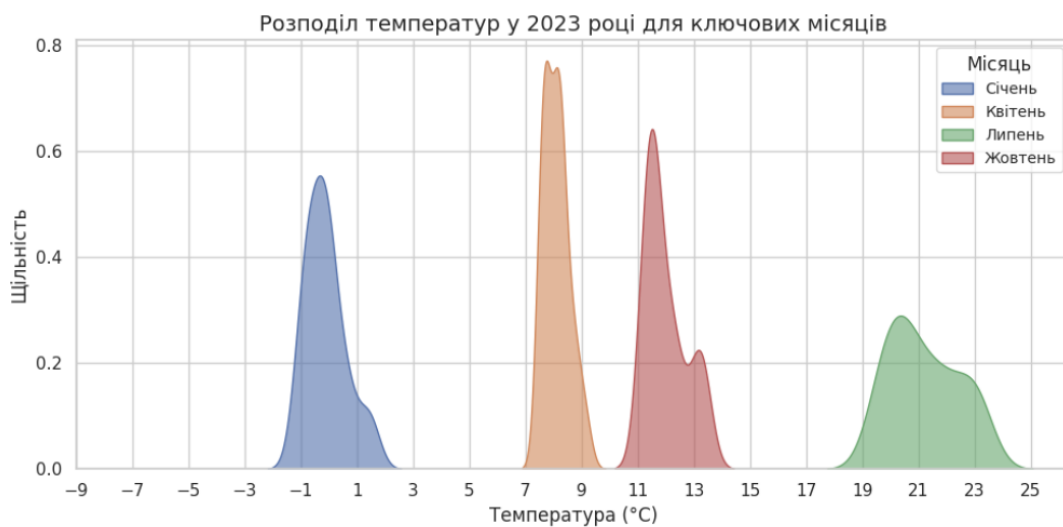


Рисунок 3.24 - Графік розподілу температур у 2023 році для ключових місяців

На отриманих графіках KDE-розподілів температури для ключових місяців у кожному році (рис. 3. 23, рис. 3.24) спостерігаємо характерну зміну щільності

температурного розподілу, яка відображає загальні кліматичні особливості та тенденції Вінницької області протягом останнього десятиліття.

Щільність розподілу для зимових місяців (зокрема січня) формується переважно в діапазоні від -10°C до 0°C , зі зсувом максимуму в окремі роки ближче до 0°C , що вказує на загальне потепління зимового періоду.

Для весняних місяців (березень, квітень) бачимо поступове зміщення основної маси щільності в бік вищих температур — від 5°C до 15°C , із чітко вираженою концентрацією у межах 10°C у більш пізні роки, що підтверджує тенденцію до раннього весняного прогріву.

Літні місяці (червень, липень) мають щільності, зосереджені між 18°C і 25°C , іноді з хвостами до 30°C . Зростання пікових температур у літній період спостерігається нерівномірно, однак розподіли демонструють стабільність — основна маса температур зберігається в комфортному інтервалі, що є сприятливим як для генерації електроенергії, так і для сталого функціонування електростанцій.

Восени (вересень, жовтень) бачимо, що розподіли мають чітке згладження та поступовий спад температур — з максимумів у $15\text{--}18^{\circ}\text{C}$ у вересні до $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ у жовтні. Така зміна розподілу свідчить про подовження теплого сезону, що важливо для відновлювальної генерації.

Отже, робимо висновок, що KDE-графіки дозволяють бачити не лише середні значення температури, а й характер її варіацій, симетрію, наявність хвостів і аномалій. Це має важливе значення в даній роботі, оскільки щільність розподілу температури прямо впливає на планування, проєктування та ефективність відновлюваних джерел енергії, зокрема на прогноз генерації, вибір технологій охолодження/збереження та адаптивність систем до змін клімату. Чітка структура й стабільність температурних розподілів упродовж років також є позитивним фактором для інвесторів, оскільки вказує на передбачуваність умов експлуатації енергетичних об'єктів.

Таким чином, підрозділ 3.2 «Розробка моделей прогнозування та оцінки інвестиційного потенціалу» послідовно реалізували через блоки:

11. Розрахунок генерації SolarGen та WindGen.
12. Відображення назв у легенді українською мовою.
13. Візуалізації для міст Вінницької області.
14. Агрегація по Вінницькій області.
15. Агрегація по інших областях (обласні центри).
16. Додаткові графіки для обраних областей та порівняння з Вінницькою.
17. Підготовка даних для моделювання (для Вінницької області).
18. Графіки "Прогнози vs Реальні значення" для кожної цільової змінної (2023).
19. Графіки залишків моделей для Вінницької області.
20. Теплова карта температури по роках та місяцях для Вінницької області.
21. KDE-розподіли температури для ключових місяців у кожному році.

Така поступова реалізація забезпечує прозорість і відтворюваність процесу розробки моделей оцінки інвестиційного потенціалу.

3.3. Фінансова оцінка інвестиційного потенціалу та візуалізація економічних показників

У даному підрозділі послідовно реалізуємо останні блоки коду, виконуючи фінансові розрахунки, формування таблиць і графіків, що ілюструють економічну привабливість проєктів сонячної та вітрової генерації.

Спочатку запускаємо блок 22, у якому задаємо параметри CAPEX і OPEX для СЕС та ВЕС станом на 2023 рік, термін експлуатації, дисконтну ставку, а

також “зелений тариф” для сонячної і вітрової генерації з урахуванням даних НКРЕКП і середнього курсу.

Створюємо змінні `capex_solar_per_kW`, `capex_wind_per_kW`, `opex_solar_per_kW`, `opex_wind_per_kW`, `lifetime_years`, `discount_rate`, а потім обчислюємо `green_tariff_solar` і `green_tariff_wind` як наведено. Після цього використовуємо агреговані середньорічні генерації, отримані раніше для Вінницької області за 2014–2022 роки (`mean_solar_gen`, `mean_wind_gen`), і формуємо грошові потоки: початковий від’ємний $\text{Cashflow} = -\text{CAPEX}$, а щорічні доходи $= \text{середньорічна генерація} \times \text{зелений тариф} - \text{OPEX}$. Далі обчислюємо NPV і IRR за допомогою функцій `npv` та `irr`, а також приведені витрати CAPEX + дисконтовані OPEX (`pv_cost_solar`, `pv_cost_wind`), приведені доходи від зеленого тарифу (`pv_revenue_solar`, `pv_revenue_wind`) і приведений обсяг енергії (`pv_energy_solar`, `pv_energy_wind`), після чого розраховуємо LCOE як відношення приведених витрат до приведенного обсягу енергії.

Після запуску цього блоку ми бачимо вивід числових результатів (рис. 3.25, рис. 3.26).

Фінансовий аналіз інвестиційного потенціалу Вінницької області:

▪ Сонячна станція:

- Середньорічна генерація (2014–2022) – обсяг енергії, вироблений за рік на 1 кВт потужності
Значення: 1759.07 kWh/кВт·рік
- CAPEX – початкові капітальні витрати на встановлення 1 кВт сонячної потужності
Значення: 700 \$/кВт
- OPEX – річні операційні витрати на утримання 1 кВт сонячної потужності
Значення: 20 \$/кВт·рік
- Зелений тариф – ціна продажу 1 кВт·год електроенергії за «зеленим тарифом»
Значення: 0.1305 \$/кВт·год, $\approx 481,37$ коп/кВт·год = 4,8137 UAH/кВт·год
- NPV (8 %) – чиста теперішня вартість усіх грошових потоків при дисконті 8 %
Значення: \$1536.99
- IRR – внутрішня норма доходності (ставка, при якій NPV = 0)
Значення: 29.89 %
- LCOE – приведені витрати виробництва електроенергії
Значення: 0.0486 \$/кВт·год

Рисунок 3.25 – Результат фінансового аналізу інвестиційного потенціалу
Вінницької області для сонячної станції

Висока IRR для СЕС свідчить про привабливість інвестицій порівняно з альтернативними фінансовими інструментами, але одночасно враховуємо ризики кліматичної варіативності.

- Вітрова станція:
 - Середньорічна генерація (2014–2022) – обсяг енергії, вироблений за рік на 1 кВт потужності
Значення: 1701.68 kWh/кВт·рік
 - CAPEX – початкові капітальні витрати на встановлення 1 кВт вітрової потужності
Значення: 850 \$/кВт
 - OPEX – річні операційні витрати на утримання 1 кВт вітрової потужності
Значення: 30 \$/кВт·рік
 - Зелений тариф – ціна продажу 1 кВт·год електроенергії за «зеленим тарифом»
Значення: 0.1110 \$/кВт·год, $\approx 409,59$ коп/кВт·год = 4,0959 UAH/кВт·год
 - NPV (8 %) – чиста теперішня вартість усіх грошових потоків при дисконті 8 %
Значення: \$846.08
 - IRR – внутрішня норма доходності (ставка, при якій NPV = 0)
Значення: 18.42 %
 - LCOE – приведені витрати виробництва електроенергії
Значення: 0.0644 \$/кВт·год

Рисунок 3.26 – Результат фінансового аналізу інвестиційного потенціалу
Вінницької області для вітрової станції

На отриманих результатах бачимо, що отримані значення для СЕС такі: середньорічна генерація ≈ 1759.07 kWh/1 кВт, CAPEX 700 \$/кВт, OPEX 20 \$/кВт·рік, зелений тариф ≈ 0.1305 \$/кВт·год ($\sim 4,81$ грн/кВт·год), NPV при 8 % ≈ 1536.99 \$, IRR ≈ 29.89 %, LCOE ≈ 0.0486 \$/кВт·год;

Для ВЕС значення наступні: середньорічна генерація ≈ 1701.68 kWh/1 кВт, CAPEX 850 \$/кВт, OPEX 30 \$/кВт·рік, зелений тариф ≈ 0.1110 \$/кВт·год ($\sim 4,10$ грн/кВт·год), NPV при 8 % ≈ 846.08 \$, IRR ≈ 18.42 %, LCOE ≈ 0.0644 \$/кВт·год.

Просторові відмінності між технологіями вказують на вищі витрати й нижчий тариф для вітру, що призводить до нижчих NPV і IRR та вищого LCOE порівняно з СЕС.

Отже, робимо висновок про явну перевагу сонячних систем у фінансовому плані при близьких середньорічних генераціях. Таким чином, фінансовий аналіз

підтверджує, що інвестиції у СЕС у Вінницькій області є більш привабливими з погляду окупності, рентабельності та приведених витрат. Що є ключовим орієнтиром для інвесторів і стратегів розвитку ВДЕ у регіоні.

Після цього у блоці 23 формуємо порівняльну таблицю фінансових показників для Вінницької області у вигляді DataFrame, аби мати зручний огляд ключових метрик, а саме: середньорічна генерація, CAPEX, OPEX, зелений тариф, NPV, IRR, LCOE, приведені витрати (PV_Cost) та доходи (PV_Revenue).

Після виконання бачимо табличний огляд (рис. 3.27), де в одній площині порівнянні ключові показники СЕС і ВЕС. Така таблиця полегшує прийняття рішень, порівнянням LCOE із середніми ринковими тарифами, вирівнюванням ризиків і очікуваних доходів.

Порівняльна таблиця фінансових показників для Вінницької області

	Тип станції	Середньорічна генерація (kWh/кВт рік)	CAPEX (\$/кВт)	OPEX (\$/кВт рік)	Зелений тариф (\$/кВт год)	NPV (\$)	IRR (%)	LCOE (\$/кВт год)	PV_Cost (\$)	PV_Revenue (\$)
0	Сонячна	1759.068827	700	20	0.130500	1536.990000	29.89%	0.048600	913.500000	2450.490000
1	Вітрова	1701.678177	850	30	0.111000	846.080000	18.42%	0.064400	1170.240000	2016.320000

Рисунок 3.27 – Порівняльна таблиця фінансових показників для Вінницької області

З отриманих результатів бачимо, що сонячні системи мають вищий NPV і IRR, коротший період окупності, нижчий LCOE та дещо вищу середньорічну генерацію на 1 кВт порівняно з вітровими. CAPEX і OPEX виявляються меншими для СЕС, а зелений тариф при цьому вищий, що підсилює фінансову вигоду.

Отже, робимо висновок про кращу інвестиційну привабливість сонячних проектів у Вінницькій області за заданих умов. Таким чином, порівняння метрик свідчить про те, що СЕС забезпечують швидший та більший дохід для інвесторів, навіть якщо середньорічні обсяги генерації обох технологій близькі. Дана таблиця з результатами підкріплює вибір пріоритетних рішень для інвесторів,

обґрунтовує рекомендації щодо акцентування ресурсів на тих технологіях, які при тих самих потужностях дають найкращий фінансовий результат у регіоні.

Далі будуюмо графіки дисконтованих грошових потоків для обох типів проєктів, щоб побачити динаміку накопичення NPV по роках. У блоці 24 задаємо уніфікований горизонт 20 років, формуємо масив cashflow і обчислюємо дисконтовані виплати, після чого будуюмо лінійний графік кумулятивного NPV для СЕС і ВЕС.

Після виконання блоку бачимо графік кумулятивного NPV (рис. 3.28), де видно, що початковий капітал окупається на певному році, після чого NPV зростає; для СЕС точка беззбитковості настає раніше, ніж для ВЕС. Цей графік ілюструє часовий горизонт повернення інвестицій і допомагає інвесторам оцінити термін окупності та загальну прибутковість.

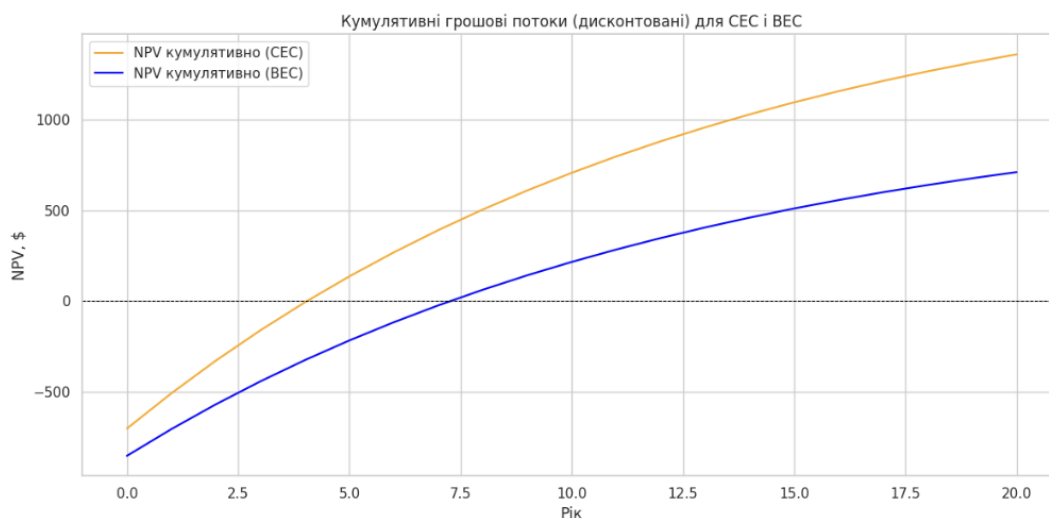


Рисунок 3.28 – Графік дисконтованих грошових потоків для СЕС та ВЕС

На даному графіку бачимо дві криві, що піднімаються з від'ємної початкової області у зону окупності та далі зростають. Для сонячного проєкту окупність досягається приблизно на 6–7 році, а для вітрового — десь на 9 році, після чого обидві криві демонструють стабільне зростання без різких змін. Форма

кривих свідчить про те, що інвестиції в СЕС повертаються швидше й приносять раніше позитивні грошові потоки, тоді як ВЕС потребує довшого періоду до виходу в прибуток.

Отже, робимо висновок про перевагу швидшої окупності сонячних проектів. Хоча в довгостроковій перспективі обидва типи генерують позитивний грошовий потік. Таким чином, аналіз фінансових потоків підказує, що пріоритет може бути наданий СЕС при обмежених термінах повернення інвестицій. Цей графік демонструє часові горизонти окупності, допомагає моделювати фінансові сценарії та обґрунтовувати вибір технології чи комбінації проектів у портфелі інвестицій. Зрозуміння кривих потоків дозволяє врахувати часові ризики та визначити оптимальне співвідношення СЕС і ВЕС у регіоні.

На завершення виконуємо порівняння зеленого тарифу з альтернативними ринковими варіантами продажу такими як, РРА, аукціони, Net Billing. У блоці 25 задаємо орієнтовні ціни `ppa_price`, `auction_price`, `net_billing_price`, формуємо `bar chart`, де поруч показані значення для СЕС і ВЕС під “Зеленим тарифом”, РРА, аукціонами та Net Billing. Як результат отримуємо

У результаті отримуємо графік порівняння тарифів з ринковими цінами (рис. 3.29).

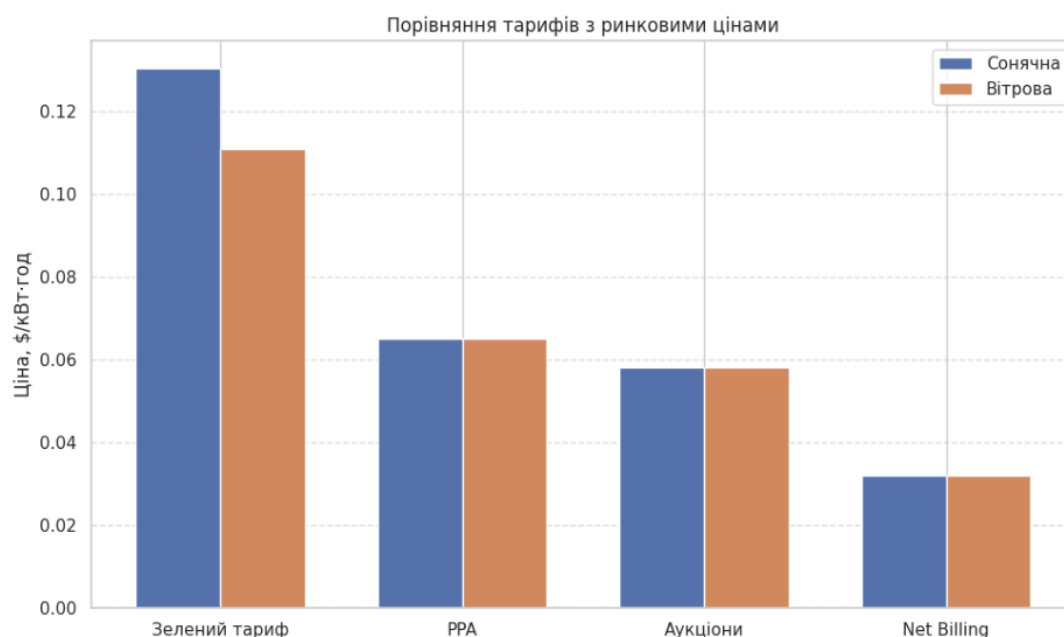


Рисунок 3.29 – Графік порівняння тарифів з ринковими цінами

На даному графіку бачимо, що «Зелений тариф» забезпечує найвищу дохідність на одиницю генерації, а Net Billing, PPA й Аукціон мають приблизно однакові рівні оплати, значно нижчі за зелений тариф.

Отже, робимо висновок про збережену привабливість «Зеленого тарифу» для інвесторів у ВДЕ. Таким чином, вибір платіжної схеми суттєво впливає на фінансові результати проєкту, і «Зелений тариф» є найвигіднішим за наявних умов. У межах даної роботи цей аналіз допомагає аргументувати політичні або стратегічні рекомендації щодо збереження або модифікації стимулюючих механізмів, підкреслюючи їх вагу для регіонального інвестиційного клімату.

Таким чином, підрозділ 3.3 «Фінансова оцінка інвестиційного потенціалу та візуалізація економічних показників» послідовно реалізували через блоки:

22. Фінансовий аналіз інвестиційного потенціалу Вінницької області
23. Порівняльна таблиця фінансових показників для Вінницької області
24. Графіки грошових потоків для СЕС та ВЕС
25. Порівняння з ринковими цінами (Net Billing, PPA, Аукціони)

Така послідовна робота гарантує прозорість фінансової оцінки інвестиційного потенціалу Вінницької області.

Задля забезпечення прозорості, відтворюваності та зручності подальшого аналізу, результати дослідження було реалізовано у вигляді інтерактивного аналітичного ноутбука на платформі Kaggle. У ньому представлено повний цикл обробки кліматичних даних NASA POWER, розробку моделей прогнозування генерації сонячної енергії, оцінку інвестиційної привабливості регіону за показниками NPV, IRR, LCOE, а також застосування методу аналізу ієрархій (АНР) для вибору пріоритетних ВДЕ-проектів.

3.4 Висновки

На основі здійсненого аналізу дійшли висновку, що для Вінницької області сонячна генерація демонструє вражаючу стабільність і передбачуваність. У зимові місяці виробництво енергії низьке, починаючи з березня спостерігаємо стрімке зростання, пік припадає на червень та липень, після чого генерація плавно згасає восени до низьких значень у листопаді й грудні. Така річна циклічність повторюється щороку з незначними міжрічними коливаннями, а просторові відмінності між містами області залишаються невеликими (до 10 -15 %). Точність прогнозних моделей SolarGen дозволяє майже ідеально накладати прогнозовані та фактичні криві генерації, що підтверджує високі значення R^2 для XGBoost чи MLP. Це дає змогу впевнено прораховувати обсяги виробництва, доходи та ризики проектів. Побачили, що саме сонячні проекти у Вінницькій області мають помірні CAPEX і OPEX, вигідний зелений тариф, а фінансові розрахунки демонструють швидку окупність, вже приблизно на 6 - 7 році, а також високий IRR і низький LCOE. Завдяки цьому інвестори отримують надійну можливість планувати фінансові сценарії з низькими невизначеностями, а

державні органи та громади можуть орієнтуватися на розвиток сонячної енергетики як пріоритетного напрямку. Це у свою чергу сприяє створенню робочих місць, підвищує енергетичну незалежність регіону та підтримує національні цілі зі скорочення викидів.

Вітрова генерація в області демонструє чітку сезонність із піками взимку і навесні, мінімумом улітку й відновленням восени, але водночас характеризується високою мінливістю. Прогнози WindGen мають нижчі R^2 і широкі залишки похибок, особливо в екстремальних пікових моментах. Побачили, що середньорічна генерація на одиницю потужності для вітру близька з сонячною, але вища капітальна та операційна вартість, нижчий тариф і довша окупність, приблизно на 9 році, створюють більші фінансові ризики. Тому, хоч і вітрові проєкти мають значний потенціал, та для інвесторів важливо враховувати необхідність додаткових механізмів зниження ризиків. Чудовим вирішенням є комбінування з накопичувачами енергії, диверсифікацію портфеля, застосування стратегій хеджування та резервування. У свою чергу державі потрібно створювати спеціальні програми підтримки ВЕС із урахуванням довшого горизонту окупності, а громадам необхідно розглядати вітроенергетику як доповнення до сонячних проєктів, забезпечуючи гнучкість і стійкість енергосистеми.

Надійність прогнозів температури з похибками у межах ± 1 °C і високими R^2 свідчить про можливість точного врахування температурного впливу на ефективність обладнання. Для сонячних панелей висока літня температура може трохи знижувати ККД, а для вітрових турбін щільність повітря, пов'язана з температурою, впливає на вихід енергії. В ході цієї роботи побачили, що кліматичні тренди, зокрема поступове потепління зимових місяців, мають значення для довгострокових моделей. Це зменшує потребу в обігріві обладнання взимку і змінює профіль навантаження електромереж. Надійні температурні прогнози допомагають детально прорахувати експлуатаційні витрати

(охолодження чи обігрів), коригувати фінансові моделі та оптимізувати технічні рішення. Важливо, що держава і громади можуть використовувати ці знання для адаптації інфраструктури, підтримки енергоефективних заходів і розвитку інтегрованих рішень, наприклад, поєднання ВДЕ з тепловими насосами та системами зберігання тепла, що є дуже цінно, особливо в умовах сьогодення.

Порівняльний аналіз із іншими регіонами показав, що Вінницька область має збалансований потенціал. Середньорічні значення сонячної та вітрової генерації близькі (~ 1750 і ~ 1700 kWh/1 кВт відповідно), тоді як в інших областях, наприклад, Одеській, вітер домінує значно сильніше. Це означає, що Вінницька область може розвивати одночасно і СЕС, і ВЕС, усуваючи ризики та підвищуючи стабільність генерації в різні пори року. Потрібно зазначити, що комбіновані системи з накопичувачами енергії, керованим попитом і смарт-мережами здатні згладжувати сезонні й добові коливання й підвищувати ефективність використання ресурсів. Державні програми можуть розглядати Вінниччину як майданчик для пілотних гібридних проєктів та обміну досвідом з іншими регіонами, а інвестори можуть розглядати як привабливу локацію для впровадження інтегрованих рішень із поєднанням технологій.

З погляду фінансових стратегій, дослідили, що сонячні проєкти забезпечують швидку окупність і високі показники рентабельності, тому інвесторам варто надавати їм пріоритет у короткостроковій та середньостроковій перспективі. Паралельно доцільно розвивати вітрові проєкти з урахуванням необхідності додаткових буферів і накопичення. Саме це дозволяє розподілити ризики, оскільки сонячна генерація найвища влітку, а вітрова — взимку й навесні, що забезпечує взаємну компенсацію сезонних спадів. Побачили, що гнучкість фінансових інструментів, таких як гарантії, пільгові кредити або довгострокові договори купівлі-продажу енергії, допомагає знижувати невизначеність порівняно з чисто вітровими проєктами.

Загалом у цьому розділі здійснили якісний аналіз, який демонструє цілісну картину, а саме: надійні прогнози сонячної генерації і температури, збалансований потенціал обох технологій, доказова підтримка фінансової переваги СЕС, розуміння ризиків ВЕС через мінливість вітру, а також значення кліматичних трендів і просторових відмінностей для локального планування. Це дозволяє зацікавленим сторонам таким як, інвесторам, державі й громадам, ухвалювати виважені рішення. Потрібно спрямовувати інвестиції і ресурси в сонячні проєкти як базовий напрямок, а вітрові проєкти впроваджувати в поєднанні з накопичувачами задля підвищення стійкості. Також варто використовувати температурні прогнози для оптимізації експлуатації й економічних моделей, розвивати гібридні системи з цифровим управлінням, щоб максимізувати прибутковість й надійність. Таким чином, системний аналіз інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлювальної енергетики формує комплексну стратегію розвитку, яка враховує кліматичні, технологічні, фінансові та соціальні аспекти, забезпечуючи сталий і вигідний розвиток регіону в довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

Розроблена інформаційна система системного аналізу інвестиційного потенціалу відновлюваної енергетики Вінницької області дозволила забезпечити якісний рівень підтримки прийняття рішень, що базуються на поєднанні кліматичних, технічних та фінансових факторів. Завдяки використанню відкритих даних NASA POWER, а також реалізації інструментів машинного навчання на платформі Kaggle, стало можливим здійснювати прогнозування генерації сонячної та вітрової енергії з високою точністю, що, у свою чергу, підвищує достовірність економічних розрахунків для інвестиційного планування.

Інформаційна система об'єднує функції аналізу, візуалізації, прогнозування та обґрунтування рішень. Порівняно з традиційними підходами, вона надає інтегровану оцінку потенціалу регіону, підвищуючи прозорість рішень та зменшуючи часові витрати аналітиків. Алгоритми XGBoost, MLPRegressor, Random Forest та лінійна регресія продемонстрували різну ефективність залежно від задачі: лінійна регресія — найкраща для сонячної генерації, MLP — для вітру, XGBoost — для температури. Таким чином, система дозволяє адаптувати модель до конкретного типу прогнозу, забезпечуючи гнучкість та високу точність ($R^2 > 0.9$ у кращих випадках).

Фінансовий модуль системи ґрунтується на розрахунках ключових показників ефективності (NPV, IRR, LCOE), що дозволяє інвесторам оперативно оцінювати економічну доцільність проєктів за різних сценаріїв. Метод аналізу ієрархій (АНР), інтегрований у систему, дає змогу врахувати не лише економічні, а й соціальні, екологічні та інфраструктурні аспекти, підвищуючи обґрунтованість вибору між альтернативними видами генерації.

Критерії ефективності системи включають:

- високу точність моделей ($R^2 > 0.9$);
- масштабованість рішень до інших регіонів;
- інтегрованість різнорідних даних;

- адаптивність до умов змінного клімату.

Серед основних обмежень — залежність результатів від повноти вхідних даних, а також відсутність реального онлайн-моніторингу генерації. Попри це, система може бути розширена завдяки інтеграції геопросторового аналізу, аналізу накопичувачів енергії, взаємодії з ринками електроенергії та API державних платформ. Це відкриває перспективи її перетворення на повноцінний інструмент стратегічного планування для місцевої влади, бізнесу та енергетичних компаній.

Отже, мета даної роботи, а саме: підвищення ефективності прийняття інвестиційних рішень у сфері відновлюваної енергетики Вінницької області за рахунок розробки складної інформаційної системи системного аналізу інвестиційного потенціалу з використанням платформи Kaggle та моделей прогнозування, досягнута повністю. У межах роботи реалізовано комплексний підхід до обробки, аналізу й прогнозування кліматичних та фінансових даних, що дозволило сформувати інструментарій для обґрунтованої оцінки інвестиційної привабливості регіону. Усі поставлені задачі виконано у межах єдиної інформаційної платформи, яка поєднує технічну точність, системний підхід та можливість практичного застосування для стратегічного планування у сфері ВДЕ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Атлас сонячної енергетики України. Інститут відновлюваної енергетики. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf> (дата звернення: 11.05.2025).
2. Біоенергетична асоціація України. Картографічні оцінки потенціалу біомаси . Б.О. Федченко та ін. URL: <https://bioenergy.org.ua/maps> (дата звернення: 13.05.2025).
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Потенціал виробництва електроенергії з відновлюваних джерел : аналітичний звіт. Київ, 2022. – 48 с.
4. Державна служба статистики України. Енергетичний баланс України : щорічна статистична збірка. Київ, 2024. 156 с.
5. Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та ‘зеленої’ трансформації енергетичної системи України» / Офіційний вісник України. 2023. № 51. С. 15–27.
6. EScholarship UC. Metrics for item 35x3v9t4. University of California. URL: <https://escholarship.org/uc/item/35x3v9t4#metrics> (дата звернення: 13.05.2025).
7. International Energy Agency (IEA). Ukraine’s Energy Security and the Coming Winter. – Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter> (дата звернення : 15.05.2025).
8. Kaggle. Investment Potential of Vinnytsia Oblast. Valentina Palamarchuk. URL: <https://www.kaggle.com/code/valentinapalamarchuk/investment-potential-of-vinnytsia-oblast-2> (дата звернення : 19.05.2025).

9. Global Solar Atlas. Карта середньорічного рівня сумарної сонячної радіації на горизонтальну поверхню (GHI) по території України . Супровідний веб-ресурс. URL: <https://globalsolaratlas.info> (дата звернення: 14.05.2025).
10. IEICE Transactions on Communications. Nguyen et al. Analysis of renewable integration. IEEE Xplore. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10620557> (дата звернення: 17.05.2025).
11. Kaggle : аналітична платформа для машинного навчання. URL: <https://www.kaggle.com> (дата звернення: 12.05.2025).
12. M. Martínez-Muñoz, S. Orozco-Gómez. Assessment of solar-wind hybrid systems. Energies. Vol. 15, No. 23, 9146, 2022. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/9146> (дата звернення: 18.05.2025).
13. Мокін В.Б., Крижановський Є.М., Ящолт А.Р., Шмундяк Д.О. Технологія проектування мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону на основі методу аналізу ієрархій. В.Б. Мокін, Є.М. Крижановський, А.Р. Ящолт, Д.О. Шмундяк. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. № 4 (2021). 2022. С. 21–33. DOI 10.31649/2307-5376-2021-4-21-33. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/642> (дата звернення: 20.05.2025).
14. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) Project. NASA – Langley Research Center. URL: <https://power.larc.nasa.gov> (дата звернення: 15.05.2025).
15. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Енергетичний портал. URL: <https://www.nerc.gov.ua> (дата звернення: 11.05.2025).
16. Портал електронних документів ПНПУ. Актуальні енергетичні тенденції. ПНПУ. URL: <http://elcat.pnpu.edu.ua/docs/nw57.pdf> (дата звернення: 19.05.2025).

17. Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process : planning, priority setting, resource allocation . T.L. Saaty. New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 с.
18. Scopus : Learning in the cloud . Electronics Journal. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10494820.2021.1928235> (дата звернення: 21.05.2025).
19. DSpace Luhansk National University : Spatial analysis of renewable potential. URL: <https://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/6711/11.pdf?sequence=1> (дата звернення: 18.05.2025).
20. Український гідрометеорологічний центр. Карта середньорічної швидкості вітру на висоті 10 м. УГМЦ. URL: <https://meteo.gov.ua/wind-map> (дата звернення: 10.05.2025).

Додаток А

(обов'язковий)

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри САІТ

_____ д.т.н., проф. Віталій МОКІН

“ ____ ” _____ 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІННИЦЬКОЇ
ОБЛАСТІ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
08-34.БКР.007.00.000 ТЗ

Керівник: к.т.н., доц.

_____ Дмитро ПРОЦЕНКО

« __ » _____ 2025 р.

Розробила студентка гр. СА-216

_____ Валентина ПАЛАМАРЧУК

« __ » _____ 2025 р.

Вінниця 2025

1. Підстава для проведення робіт.

Підставою для виконання роботи є наказ №__ по ВНТУ від «__» _____2025р., та індивідуальне завдання на БКР, затверджене протоколом №__ засідання кафедри САІТ від «__» _____ 2025р.

2. Джерела розробки:

1) Мокін В.Б., Крижановський Є.М., Ящолт А.Р., Шмундяк Д.О. Технологія проєктування мережі спостережень якості атмосферного повітря регіону на основі методу аналізу ієрархій. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2021. № 4. С. 21–33. URL:

<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/642>.

2) Saaty T.L., Vargas L.G. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process : planning, priority setting, resource allocation. T.L. Saaty, L.G. Vargas. – New York : Springer, 2012. – 348 p.

3. Мета і призначення роботи.

Метою дослідження є підвищення ефективності прийняття інвестиційних рішень у сфері відновлюваної енергетики Вінницької області за рахунок розробки складної інформаційної системи системного аналізу інвестиційного потенціалу з використанням платформи Kaggle та моделей прогнозування.

4. Вихідні дані для проведення робіт:

Кліматичні дані з платформи NASA POWER, включаючи інсоляцію, температуру та швидкість вітру для території Вінницької області. Координати ключових міст та інших областей, фінансові параметри для розрахунків інвестиційної привабливості та статистичні дані щодо ВДЕ-об'єктів.

5. Методи дослідження:

Аналіз відкритих джерел даних, формування датафрейму у середовищі Kaggle, побудова графіків, розробка моделей прогнозування на основі Random Forest, XGBoost, Linear Regression та MLPRegressor, реалізація фінансових розрахунків (NPV, IRR, LCOE), використання методу аналізу ієрархій (АНР), візуалізація даних та результатів моделювання.

6. Етапи роботи і терміни їх виконання:

- | | | | |
|--|-------|---|-------|
| a) Аналіз предметної області | _____ | — | _____ |
| b) Порівняльний аналіз проблематики | _____ | — | _____ |
| c) Вибір оптимальних інформаційних технологій | _____ | — | _____ |
| d) Розроблення інформаційної системи автоматизації роботи користувачів | _____ | — | _____ |
| e) Оформлення матеріалів до захисту БКР | _____ | — | _____ |

7. Очікувані результати та порядок реалізації

Підвищення ефективності прийняття інвестиційних рішень у сфері відновлюваної енергетики Вінницької області за рахунок розробки складної

інформаційної системи системного аналізу інвестиційного потенціалу⁸.

Вимоги до розробленої документації

Текстова та ілюстративна частини роботи оформлені у відповідності до вимог «Методичних вказівок до виконання бакалаврських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальностей: 124 «Системний аналіз», 126 «Інформаційні системи та технології» (освітня програма «Прикладні інформаційні технології»)).

9. Порядок приймання роботи

Публічний захист «__» _____ 2025 р.

Початок розробки «__» _____ 2025 р.

Граничні терміни виконання БКР «__» _____ 2025 р.

Розробила студентка групи СА-216 _____ Валентина ПАЛАМАРЧУК

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Системний аналіз інвестиційного потенціалу Вінницької області у сфері відновлювальної енергетики»

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра САІТ, ФІТА, гр. СА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,12 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне):

- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Віталій МОКІН, зав. каф. САІТ

(підпис)

Сергій ЖУКОВ, доц. каф. САІТ

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку _____

(підпис)

Сергій ЖУКОВ

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____

(підпис)

Дмитро ПРОЦЕНКО, к.т.н., доц. каф. САІТ

Здобувач _____

(підпис)

Валентина ПАЛАМАРЧУК

Додаток В

(довідниковий)

Фрагмент лістингу системи

1. Імпорт необхідних бібліотек

```
import os

import warnings

from datetime import datetime

import pandas as pd

from IPython.display import HTML, display


import numpy as np

import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

import requests

from tqdm import tqdm


from sklearn.preprocessing import StandardScaler

from sklearn.model_selection import GridSearchCV, TimeSeriesSplit

from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor

from sklearn.linear_model import LinearRegression

from xgboost import XGBRegressor

from sklearn.neural_network import MLPRegressor

from sklearn.metrics import mean_absolute_error, mean_squared_error, r2_score
```

2. Налаштування

In [2]:

```
warnings.filterwarnings("ignore")

sns.set(style="whitegrid")
```

Функції для фінансових розрахунків: NPV та IRR

```
def npv(rate: float, cashflows: list[float]) -> float:

    return sum(cf / (1 + rate) ** i for i, cf in enumerate(cashflows))
```

```
def irr(cashflows: list[float], guess: float = 0.1, tol: float = 1e-6, max_iter: int = 1000) -> float:
```

```
    rate = guess

    for _ in range(max_iter):

        npv_val = sum(cf / (1 + rate) ** i for i, cf in enumerate(cashflows))

        d_npv = sum(-i * cf / (1 + rate) ** (i + 1) for i, cf in enumerate(cashflows))

        if abs(d_npv) < 1e-8:

            break

        new_rate = rate - npv_val / d_npv

        if abs(new_rate - rate) < tol:

            return new_rate

        rate = new_rate

    return rate
```

```
# Функція для завантаження даних з NASA POWER API
```

```
def fetch_nasa_data(

    lat: float,

    lon: float,

    location_name: str,

    start: int = 2013,

    end: int = 2023

) -> list[dict]:

    url = (

        "https://power.larc.nasa.gov/api/temporal/monthly/point?"

        f"parameters=ALLSKY_SFC_SW_DWN,WS2M,T2M&community=RE"

        f"&longitude={lon}&latitude={lat}&start={start}&end={end}&format=JSON"

    )

    response = requests.get(url)

    response.raise_for_status()

    parameters = response.json().get("properties", {}).get("parameter", {})

    sr_data = parameters.get("ALLSKY_SFC_SW_DWN", {})

    ws_data = parameters.get("WS2M", {})

    t2m_data = parameters.get("T2M", {})
```

```

data = []

for yyyymm, sr_value in sr_data.items():
    year = int(yyyymm[:4])
    month = int(yyyymm[4:])
    ws2m_value = ws_data.get(yyyymm, np.nan)
    tm_value = t2m_data.get(yyyymm, np.nan)

    data.append({
        "City": location_name,
        "Year": year,
        "Month": month,
        "SolarRadiation_MJ": sr_value,
        "WindSpeed_2m": ws2m_value,
        "Temperature": tm_value,
    })

return data

# Допоміжні функції
def days_in_month(year: int, month: int) -> int:
    return pd.Period(f"{year}-{month:02d}").days_in_month

def extract_lat_lon(city_name: str, oblast_centers: dict, cities_vin: dict) -> tuple[float, float]:

    if city_name.startswith("Grid_Vinnytsia"):
        parts = city_name.split("_")
        lat_val = float(parts[-2])
        lon_val = float(parts[-1])
        return lat_val, lon_val

    for oblast_key, (c_name_eng, c_lat, c_lon) in oblast_centers.items():
        full_city_eng = f"{c_name_eng}_{oblast_key}"
        if city_name == full_city_eng:
            return c_lat, c_lon

```

```

if city_name in cities_vin:
    return cities_vin[city_name]

```

```

return np.nan, np.nan

```

3. Завантаження даних по координатній сітці Вінницької області

In [3]:

```

vinnytsia_bounds = {
    "lat_min": 47.9,
    "lat_max": 49.9,
    "lon_min": 27.3,
    "lon_max": 30.0,
}

lat_points_vin = np.arange(vinnytsia_bounds["lat_min"], vinnytsia_bounds["lat_max"] + 0.001, 0.5)
lon_points_vin = np.arange(vinnytsia_bounds["lon_min"], vinnytsia_bounds["lon_max"] + 0.001, 0.5)

grid_data_vin: list[dict] = []

for lat in tqdm(lat_points_vin, desc="Завантаження даних по Вінницькій області"):
    for lon in lon_points_vin:
        try:
            grid_data_vin.extend(fetch_nasa_data(lat, lon, f"Grid_Vinnytsia_{lat:.2f}_{lon:.2f}", 2013, 2023))
        except Exception as e:
            print(f"Помилка для сітки Вінниці {lat:.2f}, {lon:.2f}: {e}")

```

4. Завантаження даних по ключових містах Вінницької області

In [4]:

```

cities_vin = {
    "Vinnytsia": (49.2328, 28.48097),
    "Zhmerynka": (49.0387, 28.11110),
    "Mohyliv-Podilskyi": (48.4442, 27.79960),
    "Ladyzhyn": (48.6835, 29.23970),
    "Khmilnyk": (49.5599, 27.95710),
    "Tulchyn": (48.6799, 28.86140),
    "Bar": (49.0805, 27.68350),
    "Haisyn": (48.8102, 29.38970),
}

```

```

city_data_vin: list[dict] = []

for city, (lat, lon) in tqdm(cities_vin.items(), desc="Завантаження даних по ключових містах Вінницької області"):
    try:
        city_data_vin.extend(fetch_nasa_data(lat, lon, city, 2013, 2023))
    except Exception as e:
        print(f"Помилка для міста {city}: {e}")

```

5. Завантаження даних обласних центрів інших областей

In [5]:

```

oblast_centers = {
    "Kyivska": ("Kyiv", 50.4501, 30.5234),
    "Lvivska": ("Lviv", 49.8397, 24.0297),
    "Kharkivska": ("Kharkiv", 49.9935, 36.2304),
    "Chernihivska": ("Chernihiv", 51.4982, 31.2893),
    "Odeska": ("Odesa", 46.4825, 30.7233),
}

```

```

city_data_oblasts: list[dict] = []

for oblast_key, (city_name_eng, lat, lon) in tqdm(oblast_centers.items(), desc="Завантаження даних обласних центрів інших областей"):
    try:
        city_data_oblasts.extend(
            fetch_nasa_data(lat, lon, f'{city_name_eng}_{oblast_key}', 2013, 2023)
        )
    except Exception as e:
        print(f"Помилка для {oblast_key} центр {city_name_eng}: {e}")

```

6. Об'єднання та попередня обробка даних

In [6]:

```

df = pd.DataFrame(grid_data_vin + city_data_vin + city_data_oblasts)

df.dropna(subset=["SolarRadiation_MJ", "WindSpeed_2m", "Temperature"], inplace=True)

df["Year"] = pd.to_numeric(df["Year"], errors="coerce").astype("Int64")

df["Month"] = pd.to_numeric(df["Month"], errors="coerce").astype("Int64")

df.dropna(subset=["Year", "Month"], inplace=True)

df = df[(df["Month"] >= 1) & (df["Month"] <= 12)]

df["Date"] = pd.to_datetime(df["Year"].astype(str) + "-" + df["Month"].astype(str).zfill(2) + "-01")

```

```
df["Month_sin"] = np.sin(2 * np.pi * df["Month"] / 12)
```

```
df["Month_cos"] = np.cos(2 * np.pi * df["Month"] / 12)
```

7. Додавання Latitude, Longitude як числові ознаки

In [7]:

```
lat_lon_df = df["City"].apply(lambda c: pd.Series(extract_lat_lon(c, oblast_centers, cities_vin)))
```

```
df[["Lat", "Lon"]] = lat_lon_df
```

8. Конвертація швидкості вітру з 2 м до 80 м (степеневий профіль $\alpha = 0.2$)

In [8]:

```
alpha = 0.2
```

```
hub_height = 80
```

```
df["WindSpeed_80m"] = df["WindSpeed_2m"] * (hub_height / 2) ** alpha
```

9. Додаткові ознаки: лаги та ковзні середні для Temperature, SolarRadiation, WindSpeed

In [9]:

```
df = df.sort_values(["City", "Date"]).reset_index(drop=True)
```

```
df["Temp_lag1"] = df.groupby("City")["Temperature"].shift(1)
```

```
df["Temp_lag12"] = df.groupby("City")["Temperature"].shift(12)
```

```
df["SR_lag1_MJ"] = df.groupby("City")["SolarRadiation_MJ"].shift(1)
```

```
df["SR_lag12_MJ"] = df.groupby("City")["SolarRadiation_MJ"].shift(12)
```

```
df["WS80_lag1"] = df.groupby("City")["WindSpeed_80m"].shift(1)
```

```
df["WS80_lag12"] = df.groupby("City")["WindSpeed_80m"].shift(12)
```

```
df.dropna(
```

```
    subset=[
```

```
        "Temp_lag1",
```

```
        "Temp_lag12",
```

```
        "SR_lag1_MJ",
```

```
        "SR_lag12_MJ",
```

```
        "WS80_lag1",
```

```
        "WS80_lag12",
```

```
    ],
```

```
    inplace=True,
```

```
)
```

10. Збереження оброблених даних у CSV

In [10]:

```
pd.set_option('display.max_columns', None)
```

```
output_filename = "Investment potential of Vinnytsia oblast.csv"

df.to_csv(output_filename, index=False)

display(HTML(f'Файл збережено: <a href="{output_filename}">{output_filename}</a>'))

df.head()
```

Додаток Г
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІННИЦЬКОЇ
ОБЛАСТІ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

Нормоконтроль: к.т.н., доцент

_____ Сергій ЖУКОВ

«___» _____ 2025 р.

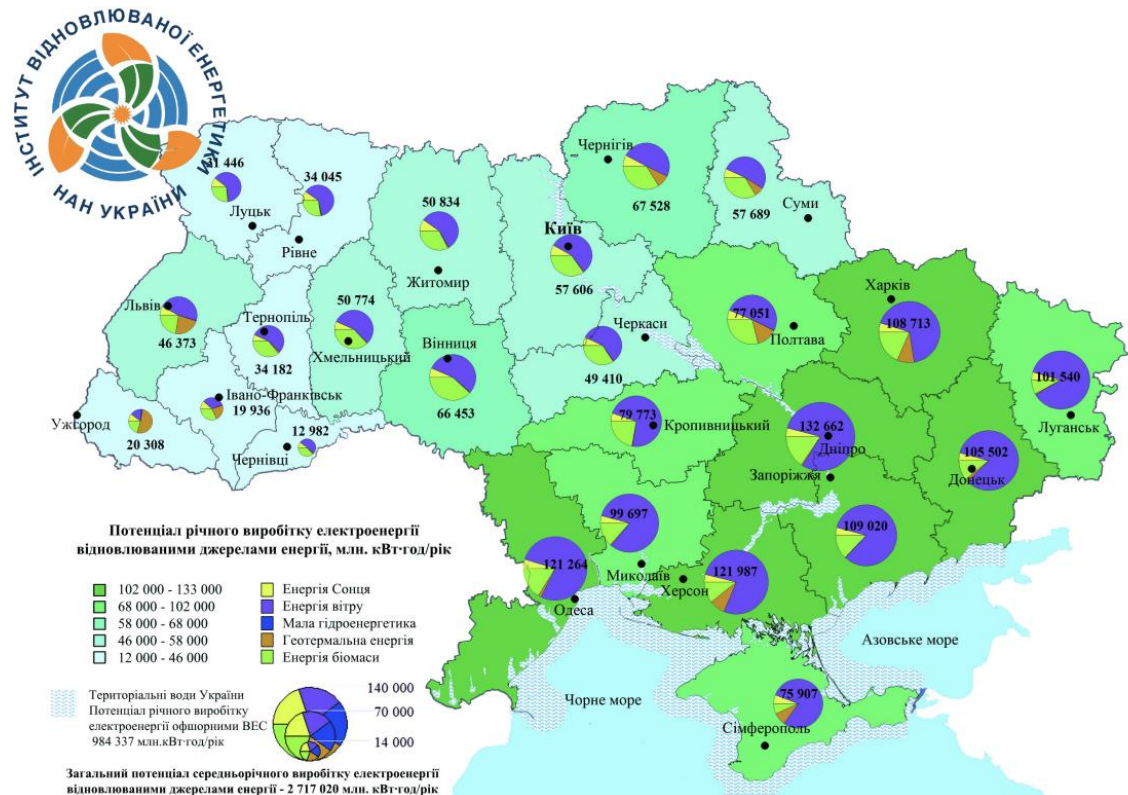


Рисунок Г.1 - Потенціал середньорічного виробітку електроенергії з відновлюваних джерел енергії по регіонах України, млрд кВт·год/рік

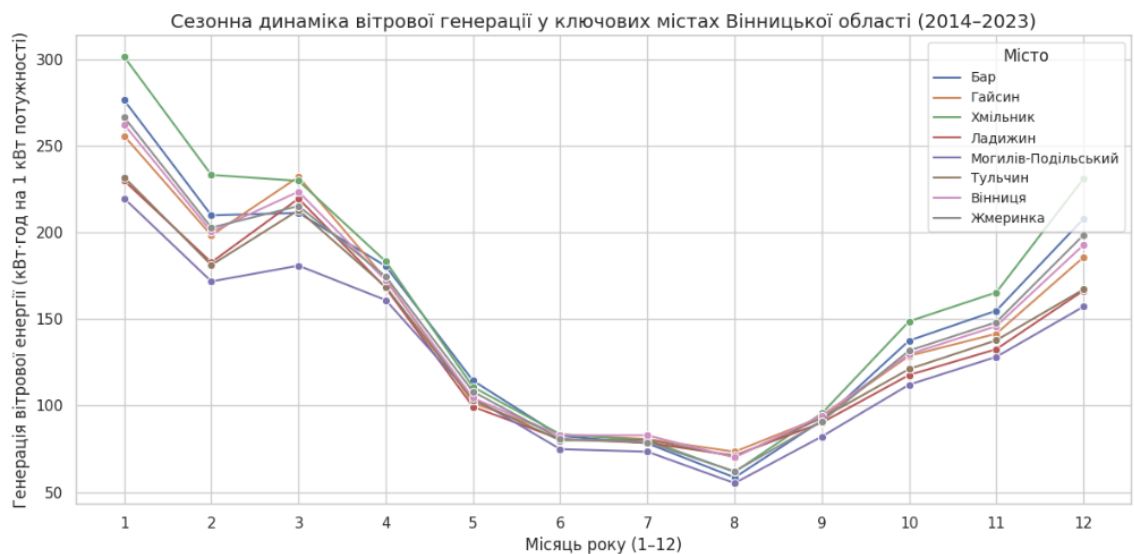


Рисунок Г.2 – Графік сезонної динаміки вітрової генерації у містах Вінницької області



Рисунок Г.3 – Тренд зміни середньої температури у ключових місяцях по роках

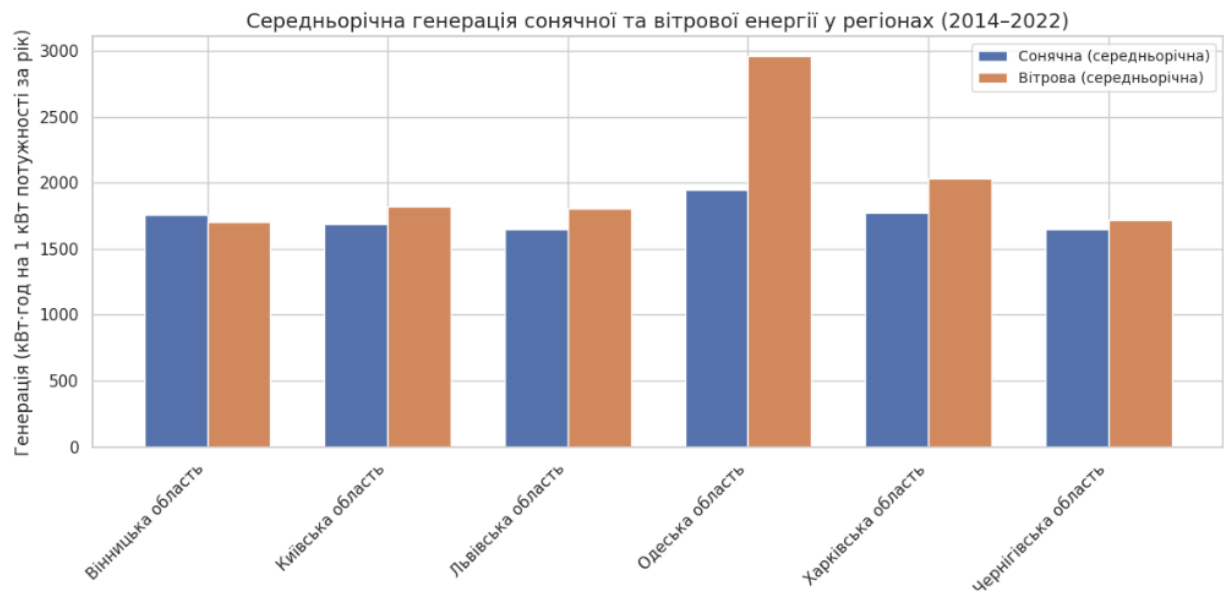


Рисунок Г.4 – Графік середньорічної генерації сонячної та вітрової енергії у регіонах

Порівняння моделей для цільової змінної:

SolarGen_kWh_per_kW

	Модель	MAE	RMSE	R ²
3	Лінійна регресія	13.830	20.926	0.943
0	Random Forest	19.662	28.343	0.895
1	XGBoost	21.056	28.369	0.895
2	MLP (Нейромережа)	22.843	31.065	0.874

Рисунок Г.5 – Результат навчання моделей для генерації сонячної енергії

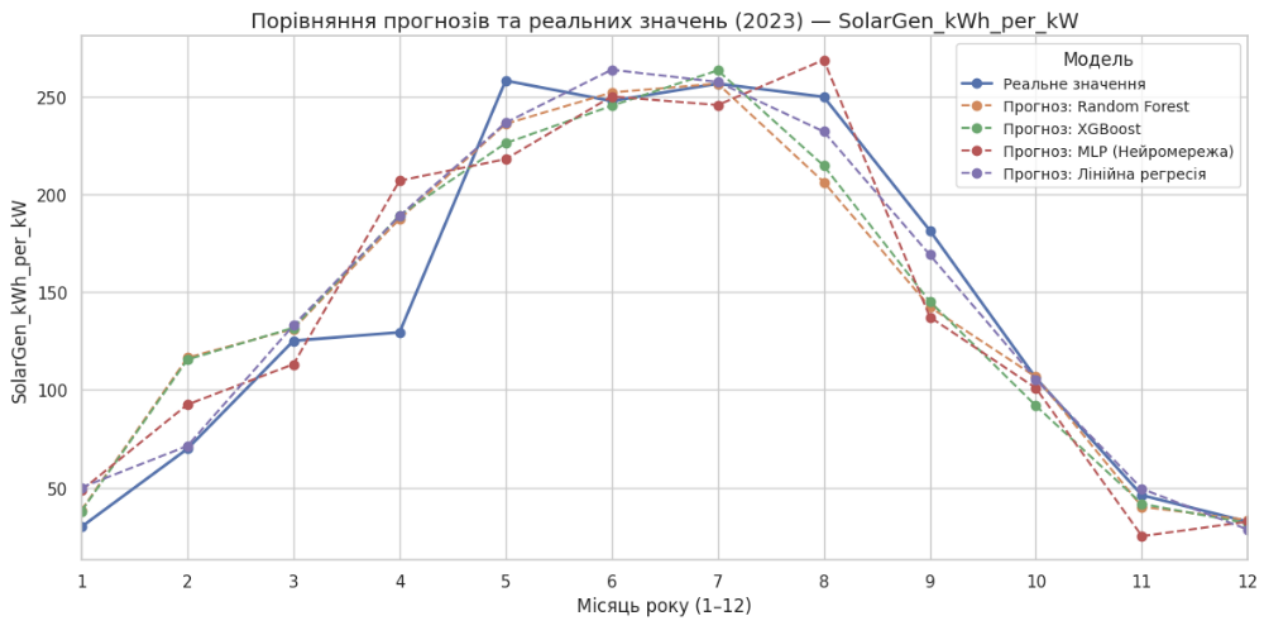


Рисунок Г.6 – Графік порівняння прогнозів та реальних значень для сонячної енергії

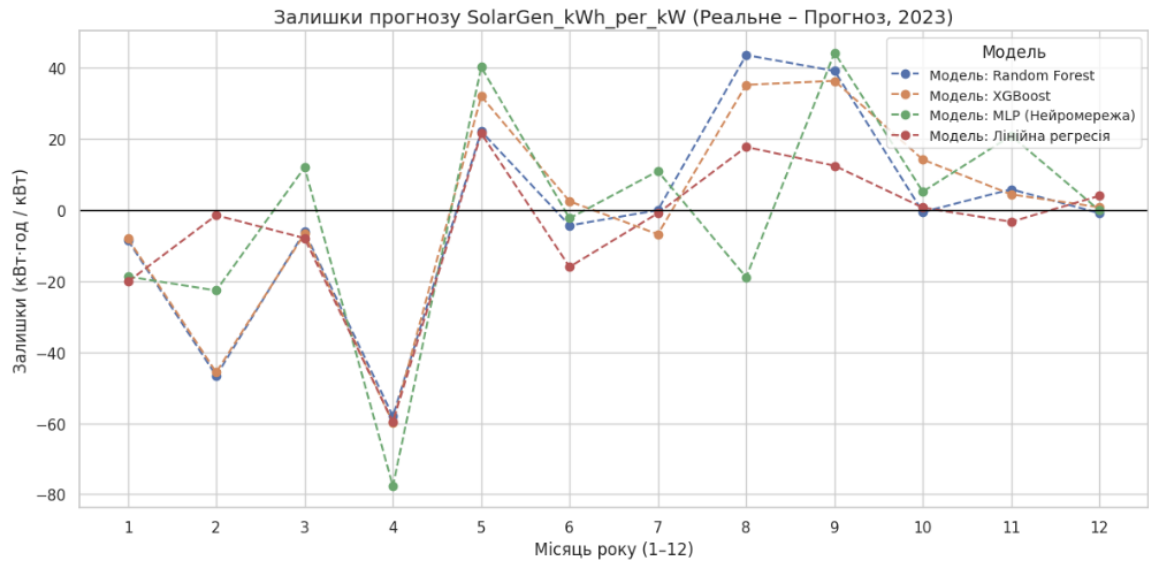


Рисунок Г.7 – Графік залишків прогнозів для генерації сонячної енергії

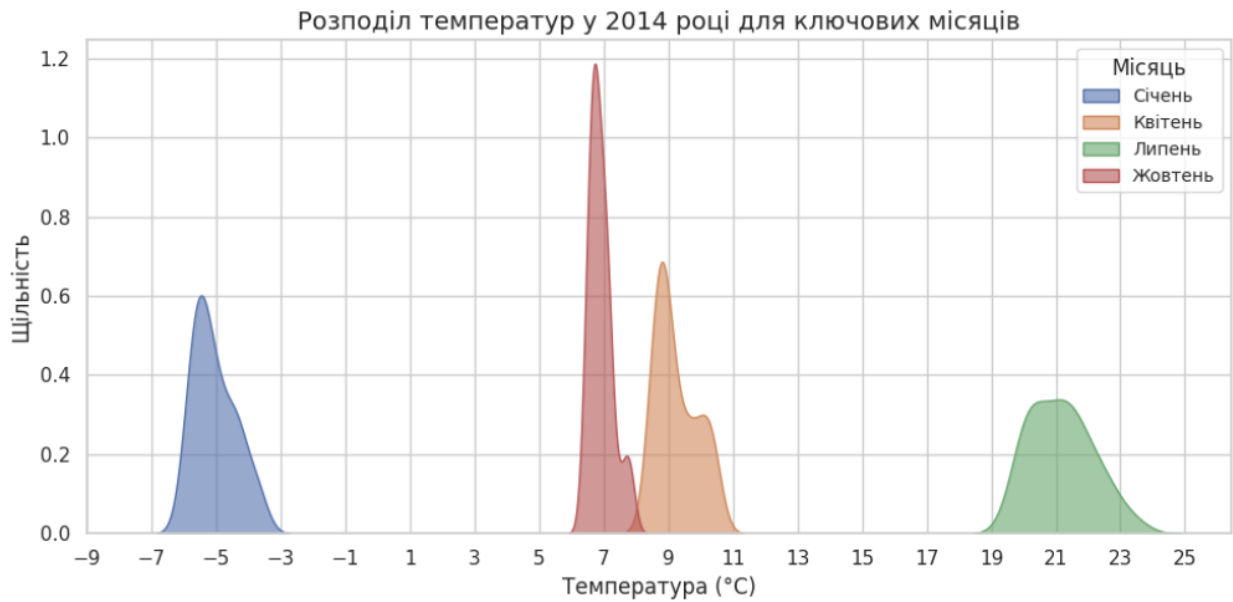


Рисунок Г.8 – Графік розподілу температур у 2014 році для ключових місяців

Порівняльна таблиця фінансових показників для Вінницької області

	Тип станції	Середньорічна генерація (kWh/кВт·рік)	CAPEX (\$/кВт)	OPEX (\$/кВт·рік)	Зелений тариф (\$/кВт·год)	NPV (\$)	IRR (%)	LCOE (\$/кВт·год)	PV_Cost (\$)	PV_Revenue (\$)
0	Сонячна	1759.068827	700	20	0.130500	1536.990000	29.89%	0.048600	913.500000	2450.490000
1	Вітрова	1701.678177	850	30	0.111000	846.080000	18.42%	0.064400	1170.240000	2016.320000

Рисунок Г.9 – Порівняльна таблиця фінансових показників для Вінницької області

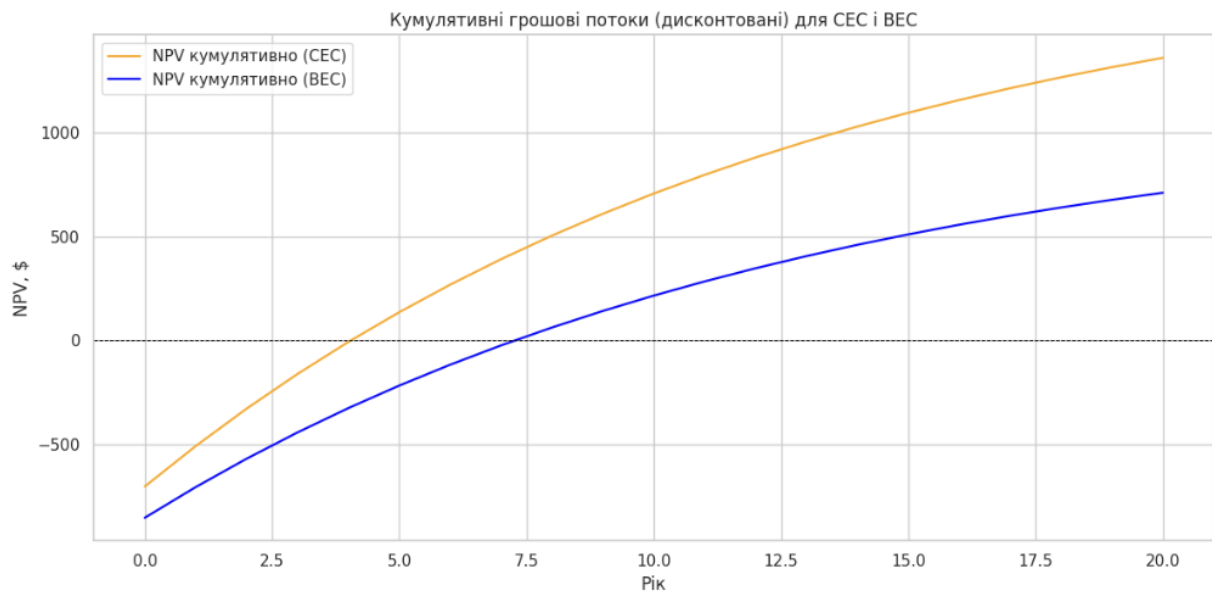


Рисунок Г.10 – Графік дисконтованих грошових потоків для СЕС та ВЕС