

УДК 620.97: 621.31

УКПП

№ держреєстрації 0123U102760

Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет (СумДУ)
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор

_____ Василь КАРПУША

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО – ТЕХНІЧНУ РОБОТУ
«РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ТОЧНОГО ПРОГНОЗУВАННЯ
ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ДЛЯ
МІНІМІЗАЦІЇ ЗЕЛЕНО-ВУГІЛЬНОГО ПАРАДОКСУ»
(проміжний)

Керівник НДР

канд. тех. наук., доцент

Ігор КОПЛИК

Рукопис закінчено 19 липня 2023 р.

Результати цієї роботи розглянуто науковою радою СумДУ, протокол від 20 липня 2023 р. № 12

2023

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник теми, канд. фіз.-мат. наук., доцент	_____ _____	І. Коплик (розділ 7, висновки загальне компанування звіту)
Д-р тех. наук., доцент	_____ _____	М. Сотник (розділ 5)
Канд. тех. наук., доцент	_____ _____	О. Дрозденко (розділ 1)
Канд. екон. наук., доцент	_____ _____	Т. Курбатова (розділ 2)
Канд. тех. наук., доцент	_____ _____	А. Марченко (розділ 3)
Канд. тех. наук.,	_____ _____	О. Д'яченко (розділ 6)
Аспірант	_____ _____	С. Медвідь (розділ 4, оформлення звіту)

РЕФЕРАТ

Звіт про НТР: стор.118, рис.8, табл.10, джерел 91

ПРОГНОЗ, НЕБАЛАНС, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, ЗЕЛЕНОВУГІЛЬНИЙ ПАРАДОКС, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, ЕНЕРГОРИНОК

Об'єкт дослідження - система генерації електричної енергії сонячними електростанціями.

Мета роботи - розроблення програмно-аналітичного комплексу точного прогнозування обсягів погодинної/добової генерації електроенергії сонячними електростанціями.

Мета етапу - Розроблення Технічного завдання на програмно-розрахунковий комплекс точного прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями з метою проведення подальших робіт щодо розробки універсальних математичних моделей та алгоритмів генерації електроенергії і короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями.

Предмет дослідження – вплив чинних факторів на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями.

Методи дослідження. Класичні методи аналізу та синтезу, методи математичного моделювання складних систем.

Головна ідея етапу полягає у розробці проекту Технічного завдання на розробку програмно-розрахунковий комплекс точного прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. Аналіз чинної законодавчої та нормативної бази України і країн Європейського союзу щодо функціонування ринку електроенергії	7
2. Аналіз ринкових позицій та можливостей підприємств і приватних домогосподарств України, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) на ринку електроенергії.....	19
3. Аналіз чинних факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями, визначення основних. Аналіз впливу погодних (метеорологічних) факторів.....	36
4. Аналіз існуючих систем, методів та засобів прогнозування зміни погодних умов у місцях розташування сонячних електростанцій, визначення їх переваг та недоліків.	59
5. Формування переліку основних інформаційних даних для подальшого їх використання при розробці математичних моделей та алгоритмів прогнозів обсягів генерації електричної енергії.....	75
6. Обґрунтування структурно-логічної схеми і основних етапів створення системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями, розроблення технічного завдання. ...	85
7. Проєкт Технічного завдання на програмно-розрахунковий комплекс точного прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями.....	92
ВИСНОВКИ	100
ДОДАТОК А	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	106

ВСТУП

Подальший розвиток генерації електричної енергії з використанням відновлюваних джерел енергії є одним з основних засобів та інструментів досягнення цілей сталого розвитку, збереження навколишнього природного середовища. Одним з них є подальше збільшення обсягів генерації електроенергії сонячними електростанціями. Однак, на шляху їх подальшого впровадження постає проблема усунення небалансів, тобто, різниці між плановими (прогнозованими) обсягами генерації та фактичними. Вони залежать від змінних технічних параметрів функціонування обладнання електростанції, а також від погодних та кліматичних умов. При цьому, вплив змінних погодних умов на точність планування у більшості випадків є визначальним. Крім того, режим генерації електричної енергії сонячними електростанціями має стохастичний характер навіть у продовж не великих проміжків часу, у яких можуть відбуватися швидкі зміни потужності генерації електроенергії. За цих умов, за існуючою статистикою, зростання частки ВДЕ у загальному балансі генерації електроенергії Об'єднаної енергетичної системи України підвищує ризики її стійкості через збурення, які вносять небаланси. Така ситуація потребує додаткових маневрових генеруючих потужностей, які за наявних умов організації енергетичного ринку, потрібно утримувати у резерві для балансування системи. При цьому, потужність засобів [балансування](#) в енергосистемі повинна становити 25-30 % від встановленої потужності ВДЕ.

Збільшення одиничної потужності об'єктів ВДЕ без одночасного зменшення небалансів тягне за собою збільшення резервів і, як наслідок, збільшення вуглецевого сліду генерації електроенергії.

У Європейському Союзі вимоги щодо відповідальності за небаланси для виробників електроенергії з відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) регламентовано відповідно до регламенту (ЄС) 2019/943 від 5 червня 2019 р. про внутрішній ринок електроенергії. За цим документом, практично усі

виробники несуть відповідальність за небаланси. Наразі аналогічні норми діють і в Україні.

Згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 27-28, ст. 312) «до 31 грудня 2029 року відшкодування суб'єктом господарювання, який виробляє електричну енергію на об'єктах електроенергетики, що використовують енергію сонячного випромінювання, та входить до складу балансуючої групи гарантованого покупця, вартості свого небалансу гарантованому покупцю здійснюється у разі відхилення фактичних погодинних обсягів відпуску електричної енергії такого суб'єкта господарювання від його погодинного графіка відпуску електричної енергії більш як на 5 відсотків». Тобто, при відхиленнях прогнозованих обсягів постачання електроенергії від фактичних більш ніж на 5 % для такого суб'єкта господарювання настає додаткова фінансова відповідальність перед покупцем. Детальний аналіз причин виникнення таких ситуацій вказує на те, що у переважній більшості випадків вони спричинені проблемами у прогнозуванні, які пов'язані з метеорологічними факторами (метеопрогнозом).

Як бачимо, проблема підвищення точності прогнозування генерації електричної енергії ВДЕ має технічний, екологічний та економічний аспекти і потребує її подальшого вирішення з урахуванням кліматичних, метеорологічних особливостей регіонів та місць розташування сонячних електростанцій.

Актуальність вирішення цієї проблеми підвищується також у зв'язку з необхідністю подальшого розподілення місць генерації та локалізації використання електричної енергії за регіональним принципом при одночасному підвищенні керованості загальною системою електрозабезпечення країни.

Матеріали, що наведені в даному документі, призначені для підтримки системи прогнозування генерації електричної енергії ВДЕ у конкретному регіоні і формування балансів споживання та генерації електричної енергії у регіональних рамках та на загальнодержавному рівні.

1. Аналіз чинної законодавчої та нормативної бази України і країн Європейського союзу щодо функціонування ринку електроенергії

1.1. Загальні положення.

Нормативно-правова база України щодо функціонування національного ринку електроенергії в цілому ([Закон України «Про ринок електричної енергії»](#) [1]) так і альтернативних джерел енергії зокрема ([Закон України «Про альтернативні джерела енергії»](#) [2]) формується/адаптується у відповідності до плану, прийнятого в рамках виконання зобов'язань України за [Договором про заснування Енергетичного Співтовариства \(далі – Договору\)](#) [3].

Зокрема, в пункті 1 ст. 2 Договору вказується, що «Завдання Енергетичного Співтовариства полягає в організації зв'язків між Сторонами й створенні правової та економічної бази стосовно енергопродуктів ... для:

- a) створення стабільної регуляторної та ринкової структури, ...;
- b) створення єдиного регуляторного простору енергопродуктів ...;
- c) поліпшення безпеки постачання в єдиному регуляторному просторі ...;
- d) поліпшення екологічної ситуації стосовно енергопродуктів ...;
- e) розвитку конкуренції на ринку енергопродуктів ...».

Ст. 11 Договору конкретизує нормативно-правову базу, на основі якої мають формуватися національні правові акти з енергетики і країнах – членах Співтовариства. Зокрема це: директива Ради Європи 2003/54/ЄС від 26 червня 2003 року [4] стосовно спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії, яка скасовує Директиву 96/92/ЄС від 26 червня 2003 року стосовно загальних засад функціонування внутрішнього ринку електроенергії директива Європейського парламенту й Ради Європи 2003/55/ЄС від 26 червня 2003 року [5]; директива 2003/55/ЄС Європейського Парламенту та Ради Європейського Союзу стосовно спільних правил для внутрішнього ринку природного газу, яка скасовує директиву 98/30/ЄС від 26 червня 2003 року стосовно загальних засад

функціонування внутрішнього ринку природного газу [6] та постанова Європейського парламенту й Ради Європи 1228/2003/ЕС від 26 червня 2003 року стосовно умов доступу до мережі транскордонної передачі електроенергії [7].

Нормативно-правова база країн - членів Співтовариства з відновлюваних джерел енергії має формуватися у відповідності до вимог Глави V Договору. Зокрема, в ст. 20 зазначається: «Кожна Договірна Сторона повинна надавати протягом одного року після набрання чинності цим Договором Європейській Комісії план впровадження директиви Європейського парламенту й Ради Європи 2001/77/ЕС від 27 вересня 2001 року «Про створення сприятливих умов продажу електроенергії, виробленої з відновлюваних енергоджерел, на внутрішньому ринку електричної енергії» [8] стосовно сприяння використанню електроенергії, виробленої за допомогою відновлюваних джерел енергії, на внутрішньому ринку електроенергії та директиви Європейського парламенту й Ради Європи 2003/30/ЕС від 8 травня 2003 року «Про сприяння використанню біопалива або іншого відновлюваного палива для транспорту» [9] стосовно сприяння використанню біопалива та інших відновлювальних видів пального для транспорту.

Ст. 23 Договору встановлює вимоги до стандартів технічних систем, які застосовуються в рамках Європейського Співтовариства та є необхідними для безпечного й ефективного функціонування систем мереж, у тому числі для аспектів передачі, транскордонних з'єднань, модуляції та загальних стандартів безпеки технічних систем, виданих у разі необхідності Європейським комітетом зі стандартизації (CEN), Європейським комітетом стандартизації в електротехніці (CENELEC) і подібними нормативними органами або виданих Союзом з координації передачі електроенергії (UCTE) та Європейською асоціацією зі спрощення енергетичного обміну (Easeegas) для встановлення спільних правил і бізнесової діяльності.

Іншим важливим документом, який спрямований на імплементацію актів законодавства Енергетичного Співтовариства у сфері енергетики є [«Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом,](#)

[Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» \(далі – Угода\) \[10\].](#)

Угодою передбачається імплементація у національне законодавство директиви 2009/72 ЄС [11] про спільні правила внутрішнього ринку електричної енергії та про скасування, [директиви 2003/54/ЄС \[12\]](#), [Регламенту \(ЄС\) 714/2009](#) «Про умови доступу до мережі транскордонного обміну електроенергією та скасування Регламенту (ЄС) 1228/2003/» [13] та [директиви 2005/89/ЄС \[14\]](#) про заходи для забезпечення безпеки інвестування до системи електропостачання та інфраструктури.

У процесі впровадження нової моделі ринку електричної енергії провідна [роль](#) відведена двом ключовим операторам: оператор системи передачі та оператор ринку.

В табл. 1.1 наведено порівняння визначень (а, отже, і функцій) вказаних операторів. Які містяться у національному законодавстві і у європейських нормативних документах.

Таблиця 1.1

Порівняння визначень «оператор системи передачі» та «оператор ринку»

Національне законодавство

Нормативна база ЄС

Оператор системи передачі

Юридична особа, відповідальна за експлуатацію, диспетчеризацію, забезпечення технічного обслуговування, розвиток системи передачі та міждержавних ліній електропередачі, а також за забезпечення довгострокової спроможності системи передачі щодо задоволення обґрунтованого попиту на передачу електричної енергії

Джерело: [Закон України «Про ринок електричної енергії» \[1\]](#)

Transmission system operator - means a natural or legal person responsible for operating, ensuring the maintenance of and, if necessary, developing the transmission system in a given area and, where applicable, its interconnections with other systems, and for ensuring the long-term ability of the system to meet reasonable demands for the transmission of electricity.

{Оператор системи передачі означає фізичну або юридичну особу, відповідальну за експлуатацію, забезпечення технічного обслуговування та, якщо необхідно, розвиток системи передачі в певній місцевості та, де це можливо, її взаємозв'язки з іншими системами, а також за забезпечення довгострокової здатності системи

відповідати розумним вимогам щодо передачі електроенергії}.

Джерело: Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast) (Text with EEA relevance.) [16].

Оператор ринку

Юридична особа, що забезпечує функціонування ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку та організацію купівлі-продажу електричної енергії на цих ринках, а також має право організовувати та проводити електронні аукціони з купівлі-продажу електричної енергії за двосторонніми договорами на підставі відповідних ліцензій, що видаються Національною комісією з цінних паперів та фондового ринку
Джерело: [Закон України «Про ринок електричної енергії»](#) [1]

Nominated electricity market operator (NEMO) means an entity designated by the competent authority to perform tasks related to single day-ahead or single intraday coupling.

{Номінований оператор ринку електроенергії (НЕМО) означає організацію, призначену компетентним органом для виконання завдань, пов'язаних із єдиним сполученням на добу наперед або одним внутрішньоденним}.
Джерело: COMMISSION REGULATION (EU) 1222/2015 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management [17].

17 грудня 2021 року НКРЕКП сертифікувала НЕК «Укренерго» як оператора системи передачі європейського зразка за моделлю ISO. Сертифікація відкриває прямий шлях до офіційного членства «Укренерго» в організації ENTSO-E, яка об'єднує 42 операторів системи передачі із 35 країн Європи. Наявність сертифікату є головною передумовою для його набуття. Об'єднання ОЕС України та ENTSO-E в 2023 році – стратегічна мета, досягнення якої дозволить нашій країні здобути енергетичну незалежність, забезпечити подальший розвиток відновлюваних джерел енергії, декарбонізацію економіки та підвищення безпеки постачання електроенергії [18].

У 2019 році Україна, шляхом реформи ринку електричної енергії, створила національну юридичну монополію – державне підприємство, а нині акціонерне товариство «Оператор ринку» <https://www.oree.com.ua>, для організації купівлі-продажу електроенергії за європейськими правилами в сегменті B2B на умовах

спот торгівлі. Чотири роки тому, 30 червня 2019 року – українські компанії вперше законтрактували електричну енергію на ринку «на добу наперед» й внутрішньодобовому ринку на ринкових умовах, де ціна сформувалася на основі попиту та пропозиції. В цей же день запрацювала щоденна система фінансових розрахунків між продавцями й покупцями, в основі якої ЕСКРОУ рахунки, що зробило спотовий ринок єдиним безборговим сегментом ринку електричної енергії України.

Однією з ключових передумов формування та посилення конкуренції на оптовому та роздрібному ринках електроенергії є відокремлення монопольних видів діяльності (передача, розподіл) від конкурентних видів діяльності (виробництво, постачання та трейдерської діяльності). Для перевірки забезпечення незалежності та вимог відокремлення оператора системи передачі Законом України «Про ринок електричної енергії» [1] передбачено проведення сертифікації оператора системи передачі. Порядок сертифікації врегульований Постановою НКРЕКП «Про затвердження Порядку здійснення сертифікації оператора системи передачі електричної енергії» №1016 від 10.08.2017 р. [19].

1.2. Перелік національних нормативно-правових актів, що регулюють ринок електроенергії.

Закони:

1. [Закон України «Про альтернативні види палива»;](#)
2. [Закон України «Про альтернативні джерела енергії»;](#)
3. [Закон України «Про ринок електричної енергії»](#)
4. [Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії \(когенерацію\) та використання скидного енергопотенціалу»;](#)
5. [Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо сприяння виробництву та використанню біологічних видів палива»;](#)
6. [Закон України «Про газ \(метан\) вугільних родовищ».](#)

Постанови:

1. [Постанова Кабінету Міністрів України від 29.11.06 № 1670 «Про затвердження Порядку проведення кваліфікації когенераційної установки»;](#)
2. [Постанова Кабінету Міністрів України від 05.10.04 № 1307 «Про порядок видачі свідоцтва про належність палива до альтернативного»;](#)
3. [Постанова Кабінету Міністрів України від 24.07.13 № 771 «Про затвердження Порядку видачі, використання та припинення дії гарантії походження електричної енергії для суб'єктів господарювання, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії»;](#)
4. [Постанова НКРЕ від 15.06.12 № 749 «Про затвердження Порядку визначення питомої ваги сировини, матеріалів, основних засобів, робіт та послуг українського походження у вартості будівництва об'єктів електроенергетики, що виробляють електричну енергію з використання альтернативних джерел енергії»;](#)
5. [Постанова НКРЕКП від 10.12.2015 № 2932 "Про затвердження Порядку визначення рівня використання обладнання українського виробництва на об'єктах електроенергетики, у тому числі на введених в експлуатацію чергах будівництва електричних станцій \(пускових комплексів\), що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії \(крім доменного та коксівного газів, а з використанням гідроенергії - лише мікро-, міні- та малими гідроелектростанціями\), та встановлення відповідної надбавки до "зеленого" тарифу".](#)

Розпорядження:

1. [Розпорядження Кабінету Міністрів України від 19.06.13 № 429-р «Про затвердження планів заходів з імплементації Директиви 2001/77/ЄС і Директиви 2003/30/ЄС»](#)
2. [Розпорядження Кабінету Міністрів України від 03.09.14 № 791-р «Про затвердження плану заходів з імплементації Директиви Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС»](#)

3. [Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.10.14 № 902-р «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року»](#)

Накази:

1. [Наказ Держкоенергозбереження від 10.12.04 № 183 «Про затвердження Порядку проведення експертизи для підтвердження належності палива до альтернативного»;](#)
2. [Наказ Міненерго від 21.07.2021 № 155 «Про затвердження Порядку проведення кваліфікації когенераційної установки»;](#)
3. [Наказ Мінжитлокомунгоспу від 24.07.09 № 223 «Про затвердження Правил приєднання когенераційних установок до теплових мереж».](#)

Нормативно-правові акти НКРЕКП, що регулюють функціонування ринку електричної енергії відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії»:

- [Правила ринку;](#)
- [Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку;](#)
- [Кодекс системи передачі;](#)
- [Кодекс систем розподілу;](#)
- [Кодекс комерційного обліку електричної енергії;](#)
- [Правила роздрібного ринку електричної енергії.](#)

Ліцензійні умови:

- [Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з передачі електричної енергії;](#)
- [Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з постачання електричної енергії споживачу;](#)
- [Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з розподілу електричної енергії;](#)
- [Ліцензійні умови провадження господарської діяльності зі здійснення функцій оператора ринку;](#)
- [Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з виробництва електричної енергії;](#)

- Ліцензійні умови провадження господарської діяльності з перепродажу електричної енергії (трейдерської діяльності);
- Ліцензійні умови провадження господарської діяльності із здійснення функцій гарантованого покупця.

Тарифи:

- Порядок встановлення (формування) тарифів на послуги з розподілу електричної енергії;
- Методика розрахунку тарифу на послуги постачальника універсальних послуг;
- Порядок формування цін на універсальні послуги;
- Методика розрахунку тарифу на послуги постачальника «останньої надії»;
- Порядок формування ціни, за якою здійснюється постачання електричної енергії споживачам постачальником «останньої надії».

Приєднання до системи передачі та систем розподілу:

- Методика (порядку) формування плати за приєднання до системи передачі та систем розподілу;
- Порядок повернення замовнику оператором системи передачі, операторами систем розподілу коштів, залучених як плата за приєднання на створення (будівництво) електричних мереж лінійної частини приєднання (за умови включення таких активів до регуляторної бази активів).

Якість електричної енергії:

- Мінімальні вимоги до якості обслуговування споживачів електричної енергії кол-центрами;
- Форми звітності щодо показників якості електропостачання та інструкцій щодо їх заповнення;
- Порядок забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання;
- Порядок складання, подання, погодження, оприлюднення програми відповідності оператора системи розподілу, звіту про її виконання та погодження уповноваженої особи з питань відповідності;

- [Порядок сертифікації оператора системи передачі електричної енергії;](#)
- [Порядок збору та передачі даних щодо функціонування ринку електричної енергії для оприлюднення на платформі прозорості ENTSO-E;](#)
- [Методика визначення доступної пропускної спроможності міждержавних перетинів \(міждержавних електричних мереж України\);](#)
- [Порядок погодження будівництва та експлуатації прямої лінії;](#)
- [Порядок розроблення та подання на затвердження планів розвитку систем розподілу та інвестиційних програм операторів систем розподілу.](#)

1.3. Енергетичне законодавство ЄС.

- [Регламент \(ЄС\) № 713/2009 Європейського Парламенту та Ради від 13 липня 2009 року що засновує Агенцію з питань співробітництва енергетичних регуляторів;](#)
- [Regulation \(EC\) No 713/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 establishing an Agency for the Cooperation of Energy Regulators;](#)
- [Регламент Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 2012/27/ЄС від 25 жовтня 2012 року про енергоефективність, внесення змін і доповнень до Директив 2009/125/ЄС і 2010/30/ЄС та про скасування Директив 2004/8/ЄС та 2006/32/ЄС;](#)
- [Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC;](#)
- [Регламент Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 347/2013 від 17 квітня 2013 року про настанови для транс-європейської енергетичної інфраструктури і скасування рішення № 1364/2006/ЄС та внесення змін і доповнень до Регламентів \(ЄС\) № 713/2009, \(ЄС\) № 714/2009 та \(ЄС\) № 715/2009;](#)
- [Regulation \(EU\) No 347/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2013 on guidelines for trans-European energy infrastructure and repealing](#)

[Decision No 1364/2006/EC and amending Regulations \(EC\) No 713/2009, \(EC\) No 714/2009 and \(EC\) No 715/2009;](#)

- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2017/460 від 16 березня 2017 року про встановлення мережевого кодексу гармонізованих структур тарифу на транспортування газу;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2017/460 of 16 March 2017 establishing a network code on harmonised transmission tariff structures for gas;](#)
- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2017/459 від 16 березня 2017 року про встановлення мережевого кодексу механізмів розподілу потужності в газотранспортних системах та про скасування Регламенту \(ЄС\) № 984/2013;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2017/459 of 16 March 2017 establishing a network code on capacity allocation mechanisms in gas transmission systems and repealing Regulation \(EU\) No 984/2013;](#)
- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2015/703 від 30 квітня 2015 року про встановлення мережевого кодексу правил інтероперабельності та обміну даними;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2015/703 of 30 April 2015 establishing a network code on interoperability and data exchange rules;](#)
- [Регламент Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 715/2009 від 13 липня 2009 року про умови доступу до мереж транспортування природного газу та про скасування Регламенту \(ЄС\) № 1775/2005;](#)
- [Regulation \(EC\) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 on conditions for access to the natural gas transmission networks and repealing Regulation \(EC\) No 1775/2005;](#)
- [Директива Європейського Парламенту і Ради 2009/73/ЄС від 13 липня 2009 року щодо спільних правил для внутрішнього ринку природного газу та про скасування Директиви 2003/55/ЄС;](#)
- [Directive 2009/73/EC Of The European Parliament And Of The Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC;](#)

- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2016/1447 від 26 серпня 2016 року про встановлення мережевого кодексу вимог до приєднання до мережі систем постійного струму високої напруги і приєднаних на постійному струмі модулів енергоцентру ;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2016/1447 of 26 August 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of high voltage direct current systems and direct current-connected power park modules;](#)
- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2016/631 від 14 квітня 2016 року про встановлення мережевого кодексу вимог до приєднання генераторів до мережі\);](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators;](#)
- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 2016/1388 від 17 серпня 2016 року про встановлення мережевого кодексу приєднання електроустановок до мереж;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) 2016/1388 of 17 August 2016 establishing a Network Code on Demand Connection;](#)
- [Регламент Комісії \(ЄС\) № 838/2010 від 23 вересня 2010 року про настанови, що стосуються механізму компенсації операторам систем транскордонних передач електроенергії та спільного нормативного підходу до плати за передачу електроенергії;](#)
- [Commission Regulation \(EU\) No 838/2010 of 23 September 2010 on laying down guidelines relating to the inter-transmission system operator compensation mechanism and a common regulatory approach to transmission charging;](#)
- [Регламент Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 1227/2011 від 25 жовтня 2011 року про добросовісність та прозорість на гуртовому ринку електроенергії;](#)
- [Regulation \(EU\) No 1227/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on wholesale energy market integrity and transparency;](#)
- [Регламент Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 714/2009 від 13 липня 2009 року про умови доступу до мережі для транскордонних перетоків електроенергії та про скасування Регламенту \(ЄС\) № 1228/2003;](#)

- [Regulation \(Ec\) No 714/2009 Of the European Parliament And of The Council of 13 July 2009 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity and repealing Regulation \(EC\) No 1228/2003;](#)
- [Директива Європейського Парламенту і Ради 2009/72/ЄС від 13 липня 2009 року щодо спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії та про скасування Директиви 2003/54/ЄС;](#)
- [Directive 2009/72/Ec Of The European Parliament And of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC;](#)
- [Регламент \(ЄС\) № 1348/2014 Європейського Парламенту і Ради від 17 грудня 2014 року про імплементацію статті 8\(2\) і статті 8\(6\) Регламенту Європейського Парламенту і Ради ЄС № 1227/2011 про добросовісність та прозорість на оптовому енергетичному ринку стосовно повідомлення;](#)
- [Regulation \(EU\) № 1348/2014 of 17 December 2014 on data reporting implementing Article 8\(2\) and Article 8\(6\) of Regulation \(EU\) No 1227/2011 of the European Parliament and of the Council on wholesale energy market integrity and transparency;](#)
- [Регламент \(ЄС\) і Ради № 2018/1999 від 11 грудня 2018 року про управління Енергетичним Союзом і пом'якшення наслідків зміни клімату, про внесення змін до регламентів Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) № 663/2009 і \(ЄС\) № 715/2009, директив Європейського Парламенту і Ради 94/22/ЄС, 98/70/ЄС, 2009/73/ЄС, 2010/31/ЄС, 2012/27/ЄС і 2013/30/ЄС, директив Ради 2009/119/ЄС і \(ЄС\) 2015/652 і про скасування Регламенту Європейського Парламенту і Ради \(ЄС\) 525/2013;](#)
- [Regulation \(EU №2018/1999 of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, amending Regulations \(EC\) No 663/2009 and \(EC\) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council, Directives 94/22/EC, 98/70/EC, 2009/31/EC, 2009/73/EC, 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council, Council Directives 2009/119/EC and \(EU\) 2015/652 and repealing Regulation \(EU\) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council.](#)

2. Аналіз ринкових позицій та можливостей підприємств і приватних домогосподарств України, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) на ринку електроенергії.

2.1. Сутність та вплив ефекту зелено-вугільного парадоксу на розвиток відновлюваної енергетики.

Виходячи із мети та завдань, які сформульовані в цій науково-дослідній роботі, передбачається, що аналіз системних ринкових відносин «попит – пропозиція» трансформується в дослідження технічних, економічних, правових та екологічних передумов/обмежень розвитку генерації ВДЕ та економічної ефективності заміщення традиційних джерел енергії у кінцевого споживача.

Заміщення ТЕС-генерації на ВДЕ-генерацію об'єктивно пов'язане з двома негативними тенденціями. Перша – необхідність балансування локальних/регіональних та об'єднаної енергосистем і, як наслідок, створення додаткових маневрових потужностей, тому числі і за рахунок ТЕС-генерації. Друга – є похідною від першої і полягає у зелено-вугільному парадоксі, коли збільшення частки нестабільної, за своїми технічними параметрами, але екологічно чистої ВДЕ-генерації, призводить до збільшення викидів парникових газів за рахунок росту маневрових потужностей ТЕС-генерації. Ця обставина актуалізує задачу розробки та впровадження моделей точного прогнозування генерації ВДЕ в залежності, в першу чергу, від зміни погодних умов в зоні розташування, наприклад, сонячних електростанцій.

Вирішення цієї задачі не можливе без визначення сутності категорії «зелено-вугільний парадокс» та причинно-наслідкових зв'язків в системі «заміщення ТЕС-генерації на ВДЕ-генерацію», які його породжують. Крім того, розробка моделей точного прогнозування генерації ВДЕ не можлива без дослідження регуляторних та організаційно-управлінських факторів, які будучи спрямованими на балансування енергосистем, «зняття» проблеми

зелено-вугільного парадоксу, одночасно, прямо або опосередковано, впливають на розвиток/обмеження ВДЕ-генерації.

В загальноприйнятому розумінні категорія «зелено-вугільний парадокс» визначається як необхідність «значно збільшувати [виробництво електроенергії](#) (базове навантаження) на вугільних теплоелектростанціях (ТЕС), що мають шкідливі викиди, при великому обсязі потужностей «чистих» вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій в енергосистемі України. При цьому також потрібно зменшувати базове навантаження атомних електростанцій (АЕС), які на відміну від вугільних ТЕС, не мають шкідливих викидів в атмосферу. Така ситуація зумовлена значним дефіцитом потужностей для маневрування в енергосистемі» [1].

Разом з тим, таке визначення категорії «зелено-вугільний парадокс» потребує його додаткового структурно-змістовного аналізу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Структурно-змістовний аналіз визначення категорії «зелено-вугільний парадокс»

Структура категорії	Змістовна сутність
«... необхідність «значно збільшувати виробництво електроенергії (базове навантаження)...»	Що практично означає суто якісна оцінка «значно збільшувати»? Яким чином будуть визначені її кількісні параметри? Очевидно, що при кількісному прогнозуванні «значно», необхідно враховувати прогнози структурних зрушень в національній економіці з врахуванням внутрішнього та міжнародного поділу праці (базове навантаження). Крім того, необхідно прогнозувати техніко-технологічні зміни енергоємності не просто ВВП, а відповідні секторальні зміни.
«... на вугільних теплоелектростанціях...»	Чому саме мова йде про ТЕС-генерацію як маневрові потужності? При прийнятті вугільної стратегії розвитку національної енергетики виникають ряд самостійних (цілком обґрунтованих) завдань: розвиток технологій пило-газоочистки на вугільних ТЕС; розробка та впровадження моделей оцінки і прогнозування додаткових атмосфероохоронних витрат; розробка механізмів виконання зобов'язань, визначених в розпорядженні КМ України №868-р від 30.07.2021 р. «Про схвалення Оновленого

національно визначеного внеску України до Паризької угоди» [2]; виконання вимог європейської конвенції Long Range Transboundary Air Pollution щодо транскордонного перенесення забруднюючих речовин.

«... при великому обсязі потужностей «чистих» вітрових (ВЕС) та сонячних (СЕС) електростанцій в енергосистемі України...»

Яким чином якісна категорія «великому обсязі» буде трансформована в кількісну? Очевидно, що задача полягає в розробці та впровадженні моделей прогнозування розвитку/обмеження генерації ВДЕ в тому числі з врахуванням розвитку технологічних рішень, кліматичних умов, ринкових факторів та ін.

«... значним дефіцитом потужностей для маневрування в енергосистемі».

В цьому відношенні виникає задача дослідження/прогнозування впливу регулярних актів на ринок ВДЕ-генерації з врахуванням необхідності балансування енергосистеми (обмеження генерації, податкові/компенсаційні обмеження, тарифна політика, рівень оплати за вироблену ВДЕ-генерацію та ін.).

Аналіз табл. 2.1 дає підстави стверджувати, що категорія «зелено-вугільний парадокс» є більш вузькою в порівнянні з категорією «зелений парадокс» (green paradox) яка, на відміну від українських дослідників [3] є більш вживаною в закордонній науковій літературі [4, 7, 8]. Очевидно, що остання категорія характеризує всі негативні екологічні наслідки збільшення питомої ваги ВДЕ-генерації в національних енергетичних балансах.

Так, наприклад, в роботі [4] вводиться поняття «слабкого та сильного зеленого парадоксу». Автори розглядають теоретичну модель коаліції країн, які приймають спільні правила ціноутворення на викопне паливо. Тоді, на модель поведінки щодо ВДЕ-генерації, значною мірою буде впливати «граничний кліматичний збиток», який буде мати місце в країнах – членах коаліції. Слід зазначити, що такий підхід до обґрунтування розвитку/співвідношення ВДЕ-генерації та ТЕС-генерації не є новим. В українській науковій школі економіки природокористування і, зокрема, в працях Балацького О.Ф. [5], Мельника Л.Г. [6] при оптимізації розвитку енергетики пропонувалось використовувати показники еколого-економічного збитку, збиткомісткості, екологомісткості та ін.

В роботі [7] розглядають модель виснаження невідновлюваного викопного палива з наступним переходом на відновлюваний зворотний блокатор, та

доводять, що зелений парадокс має місце для відносно дорогих, але чистих блокаторів зворотного зв'язку (таких як сонячна або вітрова енергія), але не виникає, якщо блокатор зворотного руху досить дешевий відносно граничних збитків від глобального потепління (наприклад, ядерна енергія).

В роботі [8] автори обґрунтовують нову, досить цікаву поведінкову модель. Автори стверджують, що «... кліматична політика може мати непередбачені побічні ефекти, беручи до уваги реакцію постачальників викопного палива. Перспектива запровадження податків на вуглець у майбутньому спонукає власників ресурсів швидше видобувати викопне паливо, що збільшує поточні викиди вуглекислого газу та прискорює глобальне потепління». При цьому, автори пропонують вдосконалювати механізми оподаткування, які «... призводять до підвищення цін на енергоносії, що спонукає фірми, що займаються відновлюваною енергетикою, збільшувати виробництво не тільки в майбутньому, але й у теперішньому часі через очікувані вигоди».

Висновком із вищенаведеного, на наш погляд, може бути твердження, що розробка моделей прогнозування сонячної генерації є важливою складовою частиною поточного балансування енергосистем, моделювання зеленого переходу, основою формування механізмів ринкового регулювання зниження викидів парникових газів і, загалом, стимулювання ВДЕ-генерації з мінімізацією ефекту «зеленого парадоксу».

2.2. Основні індикативні показники стану та розвитку ринку відновлюваної енергетики України.

Із закінченням терміну дії Розпорядження Кабінету міністрів України «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» [9] Держенергоефективності України розробило та оприлюднило «Проект Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року (НПД ВЕ 2030)» [10]. Цей документ не лише встановлює цілі

розвитку галузі до 2030 року, а й передбачає заходи, які забезпечать збалансований розвиток відновлюваної електроенергетики, теплоенергетики та споживання відновлюваних джерел на транспорті.

Так, зважаючи на виклики технічного та економічного характеру у сфері відновлюваної енергетики, в НПД ВЕ 2030 значну увагу приділено:

- забезпеченню сталості генерації об'єктів відновлюваної генерації, підвищенню надійності енергопостачання, перенесенню сезонних змін попиту на електроенергію;
- стимулюванню виробництва «чистої» електроенергії на ринкових засадах;
- удосконаленню умов підтримки енергетичних кооперативів та приватних домогосподарств;
- запровадженню механізму видачі гарантії походження електроенергії;
- стимулюванню використання енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у транспортному секторі.

Проєкт передбачає збільшення частки енергії з відновлюваних джерел енергії у валовому кінцевому енергоспоживанні у 3 рази – з 9% у 2020 році до 27% у 2030 році, зокрема у секторах:

- електроенергетики – збільшення частки енергії з ВДЕ у 2 рази – з 14% до 25%;
- опалення та охолодження – зростання частки енергії з ВДЕ у 4 рази – з 9% до рівня 35%;
- збільшення частки енергії з відновлюваних джерел у споживанні транспортним сектором у 5 разів – з 3% до рівня 14%.

Виконання цілей проєкту Національного плану дій потребує залучення інвестицій в розмірі понад 20 млрд. євро (рис. 2.1).



Потреби НПД ВЕ 2030* в інвестиціях



*відповідно до проекту Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року, розробленого Держенергоєфективності

Рис. 2.1. Структура необхідних інвестицій для виконання НПД ВЕ 2030 [10].

Для досягнення цілей НПД ВЕ 2030 передбачається реалізація комплексу системних заходів зі створення сприятливих умов, які забезпечать збалансований розвиток відновлюваної електроенергетики, теплоенергетики та споживання відновлюваної енергії транспортом, зокрема:

- удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії генеруючими установками споживачів, у тому числі енергетичних кооперативів та приватних домогосподарств;
- запровадження [гарантій походження енергії](#) з відновлюваних джерел;
- запровадження механізмів розвитку виробництва електроенергії з відновлюваних джерел на ринкових засадах (Corporate PPA's);
- розробка законопроектів щодо розвитку біоенергетики, зняття бар'єрів розвитку геотермальної енергетики; збільшення використання біопалива на транспорті;
- впровадження конкуренції в системах централізованого тепlopостачання;
- розвиток інфраструктури електрoзарядних станцій;

- створення умов для будівництва виробничих потужностей з виготовлення обладнання для виробництва енергії з ВДЕ, систем накопичення та балансуєчих потужностей тощо.

Починаючи з 2019 року динамічно розвивалась ВДЕ-генерація в приватних домогосподарствах. Основні кількісні характеристики наведені на рис. 2.2 – 2.4 (дані наведені на основі [11]).



Рис. 2.2 Загальна кількість встановлених сонячних електростанцій в домогосподарствах [11].



Рис. 2.3. Загальна встановлена потужність сонячних електростанцій домогосподарств [11].



Рис. 2.4. Обсяг генерації сонячними електростанціями домогосподарств [11].

Цілком очевидно, що як і реалізація планів НПД ВЕ 2030, так і стимулювання розвитку ВДЕ-генерації домогосподарствами, потребують відповідного вдосконалення ринкових механізмів, моделей прогнозування генерації, визначення оптимальних сценаріїв зелених енергетичних переходів.

2.3. Ринкові фактори розвитку/обмеження відновлюваної енергетики.

Проблема 1. Обмеження виплат/накопичення заборгованості виробникам електричної енергії, виробленої з альтернативних джерел.

Для часткового вирішення цієї проблеми, на період дії воєнного стану в Україні, було видано Наказ Міністерства енергетики України «Про розрахунки з виробниками за «зеленим» тарифом» № 206 від 15.06.2022 р. [12]. Пунктом 2 Наказу передбачається, «що за результатами продажу електричної енергії за перші 10 днів розрахункового місяця розподіл грошових коштів, наявних на поточному рахунку державного підприємства «Гарантований покупець» (за винятком необхідних для забезпечення господарської діяльності державного підприємства «Гарантований покупець») станом на 10 число розрахункового місяця, здійснюється відповідно до таких показників: 1) сума, що дорівнює

значенню 18 відсотків від середньозваженого розміру «зеленого» тарифу за 2021 рік, – для виробників, що здійснюють виробництво електричної енергії з енергії сонячного випромінювання».

Очевидно, що такі нормативи розрахунків за фактично вироблену електроенергію не сприяють розвитку відновлюваної енергетики в цілому і сонячної зокрема. Крім того, дія вказаного наказу була призупинена в судовому порядку, зважаючи на те, що у Міністерства енергетики України відсутні повноваження на встановлення порядку розрахунків для ДП «Гарантований покупець» чи права управління підприємством.

З метою врегулювання вказаних протиріч було прийнято постанову НКРЕКП «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва для суб'єктів господарювання» №1235 від 30.09.2022 р. [13].

Разом з тим, суттєвим недоліком вказаної постанови є відсутність механізму коригування тарифу на зміну валютного курсу. Відсутність корегування тарифу значно вплинула на власників об'єктів генерації, оскільки значна частина з них мають саме валютні кредити.

В кінці 2022 року, з метою вирішення проблеми заборгованості та стимулювання розвитку відновлюваної електроенергетики була прийнята Постанова НКРЕКП «Про встановлення тарифу на послуги з передачі електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО»» № 1788 від 21.12.2022 р. [14].

У відповідності до п. 1 вказаної постанови визначені три черги встановлення/коригування тарифів на послуги з передачі електричної енергії для користувачів системи для НЕК «УКРЕНЕРГО» (табл. 2.2).

Разом з тим, навіть такі тарифи не покривають, в повному обсязі, витрати на збільшення частки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел у 2023 році і погашення боргів НЕК «УКРЕНЕРГО» перед ДК «Гарантований покупець» за попередні періоди в сумі приблизно 12,6 - 14,0 млрд. грн.

Таблиця 2.2

Тарифи на послуги з передачі електричної енергії для НЕК «УКРЕНЕРГО» на 2023 рік [14]

№ періоду	Термін	Тариф, грн/МВт·год (без урахування податку на додану вартість)
Тарифи на послуги з передачі електричної енергії для користувачів системи (крім підприємств «зеленої» електрометалургії)		
1	З 01.01.2023 р. по 31.03.2023 р.	380,28
2	З 01.04.2023 р. по 30.06.2023 р.	430,25
3	З 01.07.2023 р. по 31.12.2023 р.	485,10
Тариф на послуги з передачі електричної енергії для підприємств «зеленої» електрометалургії на 2023 рік		209,42

Проблема 2. Балансування локальних/регіональних та об'єднаної енергосистем.

Проблема балансування локальних/регіональних та об'єднаної енергосистем з підключенням до них сонячних електростанцій має як суто технічні (не стабільність генерації в часі та відхилення від нормативних якісних показників електроенергії) так і економіко-правові аспекти (фінансова відповідальність/відшкодування частки вартості врегулювання небалансу електричної енергії гарантованого покупця).

Постановою НКРЕКП «Про затвердження Змін до постанови НКРЕКП від 26 квітня 2019 року № 641» № 46 від 15.01.2021 р. [15] (п. 9.3) була затверджена нова формулу розрахунку небалансу ДП «Гарантований покупець», яка передбачала, в тому числі, відповідальність виробників за торгіву діяльність останнього. Практика застосування вказаної формули в 2022 році показала, що рівень фінансової відповідальності за небаланси подекуди перевищував рівень доходів виробників [16].

Постановою Верховного Суду у справі № 640/4069/21 від 08.09.2022 року визнано протиправним та нечинним пункт 9.3 глави 9 Постанови [15] з дати прийняття, що, з точки зору правового регулювання передбачає перегляд

нарахувань за небаланси з дати запровадження формули та повернення виробникам надмірно сплачених коштів внаслідок помилки регулятора.

Однак, враховуючи відсутність джерел для компенсації надмірно сплачених коштів за небаланси, а також неможливість застосування її попередньої редакції, питання застосування формули досі не вирішено [16]. Крім того, необхідно звернути увагу, що за посиланням <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0046874-21#Text> на Постанову НКРЕКП № 46 від 15.01.2021 р. «Про затвердження Змін до постанови НКРЕКП від 26 квітня 2019 року № 641» [15] вказано {Документ v0046874-21, чинний, поточна редакція – Прийняття від 15.01.2021 (Остання подія – Набрання чинності, відбулась 16.01.2021)}. Пункт 9.3 глави 9 не видалений.

Більше того, у Постанові НКРЕКП від 25 квітня 2023 р. № 758 «Про затвердження Змін до постанови НКРЕКП від 26 квітня 2019 року № 641» [17], в якій визначаються умови призупинення дії договору купівлі-продажу електричної енергії за «зеленим» тарифом та/або договору про купівлю-продаж електричної енергії між гарантованим покупцем та суб'єктом господарювання, а також умови виходу продавця, у тому числі генеруючих одиниць продавця, з балансуєної групи гарантованого покупця (п. 9.1, п. 9.2) мова про призупинення дії п. 9.3 не йдеться.

Очевидно, що такі дії Регулятора не сприяють розвитку ринкових відносин та стимулюванню будівництва нових об'єктів сонячної генерації.

Проблема 3. Керування обмеженнями генерації ВДЕ.

Похідною від проблеми балансування локальних/регіональних та об'єднаної енергосистем є проблема керування обмеженнями генерації електроенергії об'єктами ВДЕ. Власне, саме через об'єктивну (добові, погодні, сезонні коливання генерації) та суб'єктивну (відсутність достатньо точних моделей погодинного прогнозування генерації) нестабільність роботи сонячних електростанцій, обмеження генерації розглядається як вимушений але дієвий механізм балансування енергосистем.

В межах здійснення диспетчерського (оперативно-технологічного) управління, згідно з положеннями У відповідності до Закону України «Про [ринок електричної енергії](#)» [18] (абзац 3 п. 5 ст. 68 розділу XIV) [оператор системи передачі](#) має право надавати команди на зменшення навантаження виробникам, які здійснюють [виробництво електричної енергії](#) на об'єктах електроенергетики, що використовують альтернативні джерела енергії, яким встановлено «зелений» тариф.

Відповідно до вимог ст. 68 Закону України «Про ринок електричної енергії» та постанови НКРЕКП від 14.03.2018 № 307 «Про затвердження Правил ринку» [19] виробники, яким встановлено «зелений» тариф, або які за результатами аукціону набули право на підтримку, зобов'язані надавати оператору системи передачі пропозиції (заявки) щодо надання послуги зі зменшення навантаження в обсягах, що відповідають добовому графіку відпуску електричної енергії, а в протилежному випадку – зобов'язані надавати послуги на балансуєчому ринку.

Саме правова конструкція «надавати оператору системи передачі пропозиції (заявки) щодо надання послуги зі зменшення навантаження» є надзвичайно важливою та такою, що впливає на подальші фінансові показники діяльності суб'єкта генерації в разі відхилення від технічної конструкції «в обсягах, що відповідають добовому графіку відпуску електричної енергії». Ця обставина актуалізує задачу розробки достатньо точних моделей прогнозування генерації електроенергії ВДЕ з метою мінімізації відхилень між задекларованими і фактичними добовими графіками відпуску електроенергії.

Проблема 4. Податкове регулювання.

Законом України «Про внесення змін до розділу XX «Перехідні положення» Податкового кодексу України щодо забезпечення стабільного функціонування ринку природного газу протягом дії воєнного стану та подальшого відновлення» [20] внесені зміни в розділ 4 (п. 58), а саме: «з 1 січня 2022 року фінансовий результат до оподаткування податкового (звітного)

періоду зменшується на суму витрат, що формують собівартість реалізованої електричної енергії за «зеленим» тарифом, та витрат на збут електричної енергії за «зеленим» тарифом, та/або собівартість послуги із зменшення навантаження, за яку виробник отримав оплату в такому звітному періоді, та на які в попередніх звітних періодах збільшувався фінансовий результат відповідно до цього пункту. Положення цього абзацу застосовується до повного погашення дебіторської заборгованості за електричну енергію за «зеленим» тарифом, продану в період, визначений в абзаці першому цього пункту, та/або за послуги із зменшення навантаження, надані в такий період».

Ця норма спрямована на суттєве покращення фінансового стану виробників електроенергії з ВДЕ. Разом з тим, органами Державної податкової служби України було заблоковано реєстрацію податкових накладних значній кількості виробників ВДЕ без будь-яких причин.

Проблема 5. Організація і проведення аукціонів підтримки виробників ВДЕ.

Постановою Кабінету Міністрів України від 2 серпня 2022 р. № 889 «Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 23 травня 2018 р. № 420 і від 27 грудня 2019 р. № 1175» [21] внесені зміни та доповнення до порядку проведення аукціонів з розподілу квот підтримки виробників ВДЕ. Вказаною Постановою гарантується право виробників ВДЕ на участь в аукціонах розподілу квоти підтримки з дотриманням наступних умов:

- обов'язкова участь для ВЕС понад 5 МВт та СЕС понад 1 МВт, на добровільних засадах – для інших ВДЕ;
- гарантована купівля електроенергії протягом 20 років від введення станції в експлуатацію в межах квоти за ціною, визначеною на аукціоні;
- проведення аукціонів з розподілу річних квот передбачається згідно з графіком проведення аукціонів на відповідний рік в період з 1 липня 2019 року до 31 грудня 2029 року;

- квоти підтримки мають затверджуватися КМУ на наступний рік з індикативними прогнозами на чотири роки;

- розмір квоти для кожного виду ВДЕ – не нижче 10%.

Разом з тим, ні в 2022 році ні в 2023 році жодного аукціону з розподілу річних квот не було проведено. Формальна причина – відсутність затверджених Кабінетом Міністрів України квот підтримки відновлюваної енергетики та графіків проведення «зелених» аукціонів, як це було, наприклад в 2021 році [22].

Проблема 6. Регулювання процедур видачі, використання та припинення дії гарантії походження електричної енергії.

Процедури щодо встановлення гарантій походження електричної енергії для суб'єктів господарювання, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії в Україні регулюються Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 771 «Про затвердження Порядку видачі, використання та припинення дії гарантії походження електричної енергії для суб'єктів господарювання, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії» [23].

Разом з тим, сама процедура регулювання так і не була запроваджена. Ця обставина викликає цілий ряд протиріч/судових справ при встановленні тарифів, пільг та ін. Хоча Україна до кінця 2022 року, згідно з міжнародними зобов'язаннями, мала імплементувати в національне законодавство положення Директиви 2018/2001/ЄС «Про заохочення використання енергії з відновлюваних джерел» (RED II) {DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)} [24].

До **позитивних регуляторних актів** щодо розвитку відновлюваної енергетики слід віднести прийняття Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії» [25].

Цим Законом вносяться зміни, в тому числі, до [Закону України](#) «Про ринок електричної енергії». Зокрема, [стаття 71](#) доповнена частинами сьомою і восьмою такого змісту:

«7. Виробникам електричної енергії, яким встановлено «зелений» тариф або які за результатами аукціону набули право на підтримку, дозволяється зберігати енергію, вироблену на власних електроустановках, що використовують альтернативні джерела енергії, без отримання ліцензії на провадження господарської діяльності із зберігання енергії, за умови відбору електричної енергії установкою зберігання енергії виключно від власних генеруючих установок, ...»;

«8. Встановлення установки зберігання енергії виробниками електричної енергії, яким встановлено «зелений» тариф або які за результатами аукціону отримали право на підтримку, не є підставою для перегляду встановленого «зеленого» тарифу або аукціонної ціни, якщо виконуються всі умови, визначені частиною сьомою цієї статті».

На виконання вимог цього Закону прийнято постанову НКРЕКП №798 від 22.07.2022 «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності зі зберігання енергії» [26], якою було закріплено положення п. 7 ст. 71 [Закону України](#) «Про ринок електричної енергії».

В контексті аналізу ринкових факторів розвитку/обмеження відновлюваної енергетики доцільно звернути увагу на «Сценарії реалізації енергетичної стратегії України до 2035 року» [27]. Цей аналітичний матеріал був презентований 28 березня 2018 року Українсько-Данським Енергетичним центром в рамках проекту «Довгострокове енергетичне моделювання та прогнозування в Україні: сценарії до Плану заходів з реалізації Енергетичної стратегії України до 2035 року» (ЕСУ2035).

В результаті проведеного моделювання визначено Базовий та ряд альтернативних сценаріїв, що охоплюють найбільш ймовірні варіанти розвитку енергетичного сектору. Базовий сценарій побудований для визначення

оптимальної траєкторії розвитку галузі з метою досягнення ключових цільових показників ЕСУ2035.

Альтернативні сценарії досягнення цілей ЕСУ2035 або сценарії «чутливості» відрізняються від Базового сценарію ефективністю реалізації окремих політик та набором технологічних рішень. Зокрема:

- сценарій «Низьких темпів зростання відновлюваної енергетики» відповідно до припущень фахівців ДП НЕК «Укренерго» щодо перспектив нарощення обсягів виробництва електроенергії гідро-, вітровими та сонячними електростанціями.

- сценарій «Без нових ядерних реакторів у 2025 році», в якому проаналізовано наслідки затримки, принаймні, до 2030 року, введення в дію нових потужностей АЕС.

- сценарій «Нові технології балансування» що враховує нові технологічні рішення для забезпечення балансової надійності енергосистеми в умовах зростання частки відновлюваної енергетики.

- сценарій «Зелено-вугільний парадокс», в якому увага зосереджена на модернізації та подовженні терміну експлуатації існуючих вугільних енергоблоків теплових електростанцій, що будуть забезпечувати необхідний обсяг вторинного і третинного резервів.

- сценарій «Оптимізація балансування», що враховує ефект від запровадження системи точного прогнозування виробітку сонячними і вітровими електростанціями. В тому числі, впливу на необхідний обсяг балансуєчих резервів.

Крім того, в документі зазначається, що не використання економічно-доцільного потенціалу ВДЕ після 2035 року «... змушуватиме використовувати більш дорожу теплову генерацію, що суттєво позначиться на загальній вартості та споживанні електроенергії в системі. Сьогоднішній «зелено-вугільний парадокс» економічно вигідно долається застосуванням сучасних балансуєчих технологій та засобами керування попитом, при цьому відбуватиметься більш інтенсивне та надійне зростання відновлюваної енергетики».

Аналіз сценарного моделювання свідчить, що майже всі вони потребують розробки та впровадження надійних моделей короткострокового прогнозування ВДЕ-генерації з метою забезпечення ефективного балансування енергосистем, мінімізації негативних ефектів «зелено-вугільного», а точніше, – «зеленого» парадоксу.

3. Аналіз чинних факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями, визначення основних. Аналіз впливу погодних (метеорологічних) факторів.

3.1. Загальні положення: аналіз інструментів моделювання сонячних електростанцій.

Інструменти моделювання сонячних електростанцій застосовуються для вирішення різних практичних задач. Одна із головних, – складання/прогнозування погодинних графіків генерації електроенергії сонячними електростанціями. Аналіз самих інструментів моделювання має важливе практичне значення з точки зору розуміння їх архітектури і алгоритмічної бази щодо врахування факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями.

Основним розробником загальнодоступного програмного забезпечення, що дозволяє проводити моделювання сонячних електростанцій є The National Renewable Energy Laboratory – NREL, США, яка пропонує два відкритих програмних продукти.

Програмний продукт «**PVWatts**» [1] розрахований на домогосподарства, власників невеликих будівель, і дозволяє досить легко оцінювати ефективність потенційних фотоелектричних установок. Нова версія PVWatts дозволяє враховувати базу даних Google Maps *про погоду та інсоляції*, хоча, при цьому, враховуються статистичні дані всього за один рік [2].

Програмний продукт «**System Advisor Model (SAM)**» [3].

Серед переваг моделі:

- більш точне врахування *екологічних чинників і мінливості природи* – є можливість завантаження бази даних метеоспостережень за кілька років як з Інтернету, так і введення власних даних;

- наявність декількох бібліотек даних, в які занесені *характеристики компонентів системи*: фотоелектричних модулів, інверторів, параболічних приймачів і колекторів і т. ін.;

- можливість *коригування фінансових показників* (ставок кредитування, рівня інфляції, тарифів для житлових будинків і комерційних підприємств);

- врахування у фінансових моделях витрат на установку (включаючи закупівлю обладнання, виплати заробітної плати, оренду техніки, проектні витрати, витрати на землю – оренду або купівлю), а також *витрати на експлуатацію та технічне обслуговування* [2].

SAM дозволяє відображати результати як у вигляді графіків, так і у вигляді таблиць, із найрізноманітнішими показниками, які цікавлять користувача, наприклад, добовий погодинний графік генерування електроенергії, річний обсяг виробництва електроенергії та інше.

Програмний продукт «**Helioscope**» [4] дозволяє проводити розрахунки для систем потужністю до 100 МВт.

Крім іншого, модель дозволяє враховувати/розробляти:

- модель фізичного розташування об'єктів на поверхні землі, використовуючи дані Google Earth;

- можливість використання різних метеорологічних баз, в тому числі – введення файлів користувачем, що містять інформацію *про погоду для конкретної місцевості*.

Програмний продукт «**HOMER Pro**» [5].

Основною перевагою програмного продукту є можливість моделювання гібридних складних енергетичних конструкцій, які включають в себе кілька енергетичних ресурсів. Програма дозволяє інтегрувати в єдину систему різні джерела енергії – вітрові та гідрогенератори, сонячні батареї, промислову або побутову електромережу, паливні елементи, комбіновані виробники тепла і електроенергії, а також різні пристрої накопичення і зберігання електроенергії.

Програмний продукт «**Polysun Designer**» [6].

Основні переваги моделі:

- програма має україномовну версію;
 - після визначення на географічній карті координат розміщення електростанції, програма самостійно завантажує метеодані за кілька років, використовуючи платформу Meteotest;
 - оцінка (погодинно, щодня, щотижня і т. д.) енергетичних потоків, зміни температур і теплових втрат будь-якого компонента, що входить в систему, візуалізація даних у вигляді гістограм або графіків;
 - проведення фінансового аналізу – річна економія витрат на паливо після установки сонячної електростанції, період окупності з урахуванням витрат на придбання обладнання, поточних витрат на ТО і експлуатацію;
 - врахування в розрахунках чинників забруднення, вітру, затіненості і т. д.
- Програмний продукт «**PVsyst**» [7].

До основних переваг моделі можна віднести:

- отримання метеоданих для будь-якої точки місцевості з Meteonorm;
- висока точність проведення розрахунків (в середньому відхилення реальних показників потужності від проектних не перевищує 2%);
- використання оновлених алгоритмів, що дозволяють максимально точно моделювати затіненість елементів, у тому числі, – за рахунок побудови анімаційних 3D моделей;
- досить точно описує негативні чинники, що призводять до втрат генерації електроенергії і в середині системи, що дозволяє не тільки отримувати точні результати, але і визначати шляхи мінімізації втрат;
- візуалізація розрахунків у вигляді графіків і таблиць в залежності від кута нахилу і азимута установки панелей.

Як свідчить аналіз, всі існуючі програмні продукти моделювання сонячних електростанцій, в тій або іншій мірі, враховують фізичні, метеокліматичні, соціально-економічні та техніко-технологічні фактори.

3.2. Аналіз науково-методичних та практичних підходів до врахування факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями.

У спеціальній науковій літературі міститься ряд методичних та практичних підходів до врахування факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями. Всі вони, як правило, обумовлені тими локальними задачами, які стояли перед дослідниками.

В окремих роботах, наприклад, досліджуються проблеми оптимального кута нахилу сонячних батарей [8, 9, 10].

Зокрема, в роботі [11] нами запропоновані науково-методичні підходи до моделювання короткострокового прогнозування та довгострокового планування споживання електроенергії на основі ретроспективних даних; принципи та методи побудови автоматизованої системи короткострокового прогнозування та моніторингу споживання електроенергії в навчальних закладах; техніко-економічне обґрунтування впровадження виробництва сонячної електроенергії за допомогою розташування сонячних модулів на огорожувальних конструкціях навчальних корпусів.

Важливі практичні результати щодо врахування факторів, які впливають на обґрунтування встановленої потужності сонячних електростанцій наведені в роботі [12]. Автори зазначають, що «...різниця між встановленою потужністю та згенерованою електроенергією може бути досить значною залежно від різноманітних *факторів навколишнього середовища*». Автори аналізують фактори, що впливають на ефективність генерації та пропонують відповідні науково-методичні підходи щодо їх врахування.

В роботі [13] автори виокремлюють наступні фактори, що впливають на ефективність генерації та наводять їх кількісні характеристики:

- тип панелі (найбільш поширеними на сьогодні є панелі на моно- та полікристалічних клітинах);
- залежність регіону від рівня інсоляції;

- орієнтація панелі (можливість обертання в поєднанні з системою відстеження сонця дозволяє виробляти на 28%-35% більше енергії порівняно зі стаціонарними установками з однаковою потужністю);

- кут нахилу панелей до горизонту (важливо, щоб сонячні промені потрапляли на сонячні панелі під прямим кутом (рекомендується, щоб цей кут становив 30-35° влітку, 45° – навесні та восени, і 70° – взимку);

- підвищення температури сонячної панелі з 10°C, що є оптимальною температурою роботи, до 50°C (при цьому ККД зменшується на 7% від номінального);

- затіненість або запиленість робочої поверхонь сонячних панелей;

- знецінення обладнання (за 25 років монокристалічні клітини втрачають 20% своєї ємності, а полікристалічні клітини – 30%).

В роботі [14] проведено порівняльний аналіз фактичних обсягів виробництва електроенергії та прогнозних обсягів, розрахованих з використанням метеорологічних даних Meteororm 7.1 і NASA-SSE, а також даних Корейського метеорологічного управління. Мета дослідження - встановлення рівня кореляції між сонячною радіацією, температурою та обсягом виробництва сонячної електроенергії. Дослідження показало, «... що обсяг виробництва електроенергії та сонячна радіація мають високий позитивний коефіцієнт кореляції 0,8131». «...між об'ємом виробництва електроенергії та температурою коефіцієнт становив в межах 0,2843 - 0,4616 для різних електростанцій, демонструючи менший вплив, ніж вплив сонячної радіації». Автори прийшли до висновку, що «... сонячне випромінювання впливає на обсяг виробництва сонячної енергії більше, ніж температура, але поточне дослідження вказує на те, що для точного прогнозування обсягу виробництва сонячної енергії необхідно враховувати як сонячне випромінювання, так і температуру».

В роботі [15] зазначається, що *«Нова модель оптового ринку електроенергії передбачає функціонування ринку на добу вперед. На цьому ринку генеруюча компанія бере на себе зобов'язання по постачанню певної*

кількості електроенергії. Тому для сонячної електростанції (СЕС) необхідно здійснювати якомога точний прогноз можливого виробітку електроенергії, що залежить від певних факторів». Авторами проаналізовано та виділено фактори, що повинні бути включенні в прогнозну математичну модель визначення потужності сонячної електростанції на певний короткостроковий період на основі даних СЕС розміщеної в Київській області, а саме:

- інтенсивність освітлення;
- температура та вологість навколишнього середовища;
- швидкість вітру та атмосферний тиск.

Аналіз ступеня впливу цих факторів на вихідну функцію генерації електричної енергії показав, що інтенсивність певних кліматичних параметрів в залежності від пори року є різною, а тому в математичній моделі прогнозу необхідно враховувати сезонність. Окрім цього, динаміка зміни значень факторів також впливає на поточну величину генерації електричної енергії. Тому, на думку авторів, «... дані отримані за останні періоди часу перед прогнозом повинні мати більший вплив на генерацію прогнозної величини аніж дані попередніх періодів».

Окремої уваги заслуговують результати дослідження, викладені в роботі [16]. Практично автор змінює філософію проблеми балансування енергосистем на основі точного прогнозування та підтримання графіків генерації відновлюваними джерелами (в тому числі і сонячними електростанціями) на філософію гнучкого заміщення генерації різними джерелами в залежності від об'єктивних зовнішніх факторів.

Поряд з роботами [17, 18] були сформовані передумови включення до «Плану заходів щодо реалізації «Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року», затвердженого Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року» [19] зокрема пунктів:

8. «Реалізація пілотних проектів із застосування установок зберігання енергії»;

9. «Реалізація пілотного проекту з утворення центру управління мережами і навантаженням (модернізованої диспетчерської операторів систем розподілу)»;

17. «Впровадження системи управління розподіленою генерацією електроенергії (DERMS), віртуальних електростанцій (VPP)».

Результати експериментальних досліджень факторів впливу на генерацію сонячної електростанції наведені в роботі [20]. Зокрема, авторами проведено експериментальні дослідження визначення впливу природних факторів, таких як кут сонця над горизонтом, температури фотоелектричних модулів, сонячної радіації, забрудненості поверхні модулів, кількості опадів та туману на генерацію мережевої сонячної електростанції потужністю 2,4 МВт, яка розміщена в Харківській області. В результаті дослідження встановлена чітка залежність між активною потужністю сонячної станції, сонячною радіацією, ультрафіолетовим індексом та температурою поверхні фотоелектричного модуля.

Важливе практичне значення для кількісної оцінки довгострокової життєздатності джерела енергії (PV) мають два показники: час окупності енергії (EPBT) і окупність інвестованої енергії (EROI). В роботі [21] на основі системного огляду і мета-аналізу близько 232 літературних джерел протягом 2000 - 2013 рр. щодо значень EROI та EPBT були зроблені висновки, що «... середні гармонізовані значення EPBT варіюють від 1 до 4,1 року для різних технологій. У порядку від найнижчого до найвищого: CdTe, CIGS, a-Si, Poly-Si та Mono-Si. Середні гармонізовані значення EROI коливалися від 8,7 до 34,2 років». Автори також зазначають, що «... всі параметри, які впливають на виробництво фотоелектричної енергії, відіграють певну роль у розрахункових значеннях EROI, і слід враховувати більш точні значення умов експлуатації, щоб отримати більш практичну оцінку значень EROI/EPBT при масштабуванні фотоелектричні установки». Зокрема, серед факторів, які впливають на продуктивність фотоелектричної системи та не знаходяться «...під контролем монтажника/дизайнера, є сонячна інсоляція, дощ, хмарний покрив, атмосферні аерозолі, вітер, температура навколишнього середовища, відносна вологість та

осадження пилу. Для вивчення факторів, що впливають на продуктивність фотоелектричних систем і для отримання більш точних оцінок значень EROI/EPBT важливо розуміти кожен із цих факторів».

3.3. Систематизація та виділення групи головних факторів.

Один із найбільш повних, серед відомих нам, оновлених оглядів факторів та їх взаємопов'язаних впливів на продуктивність фотоелектричної системи наведені в роботі [22]. В роботі проводиться обговорення 76 наукових статей за вказаною тематикою та здійснено групування факторів (рис. 3.1, табл. 3.1).

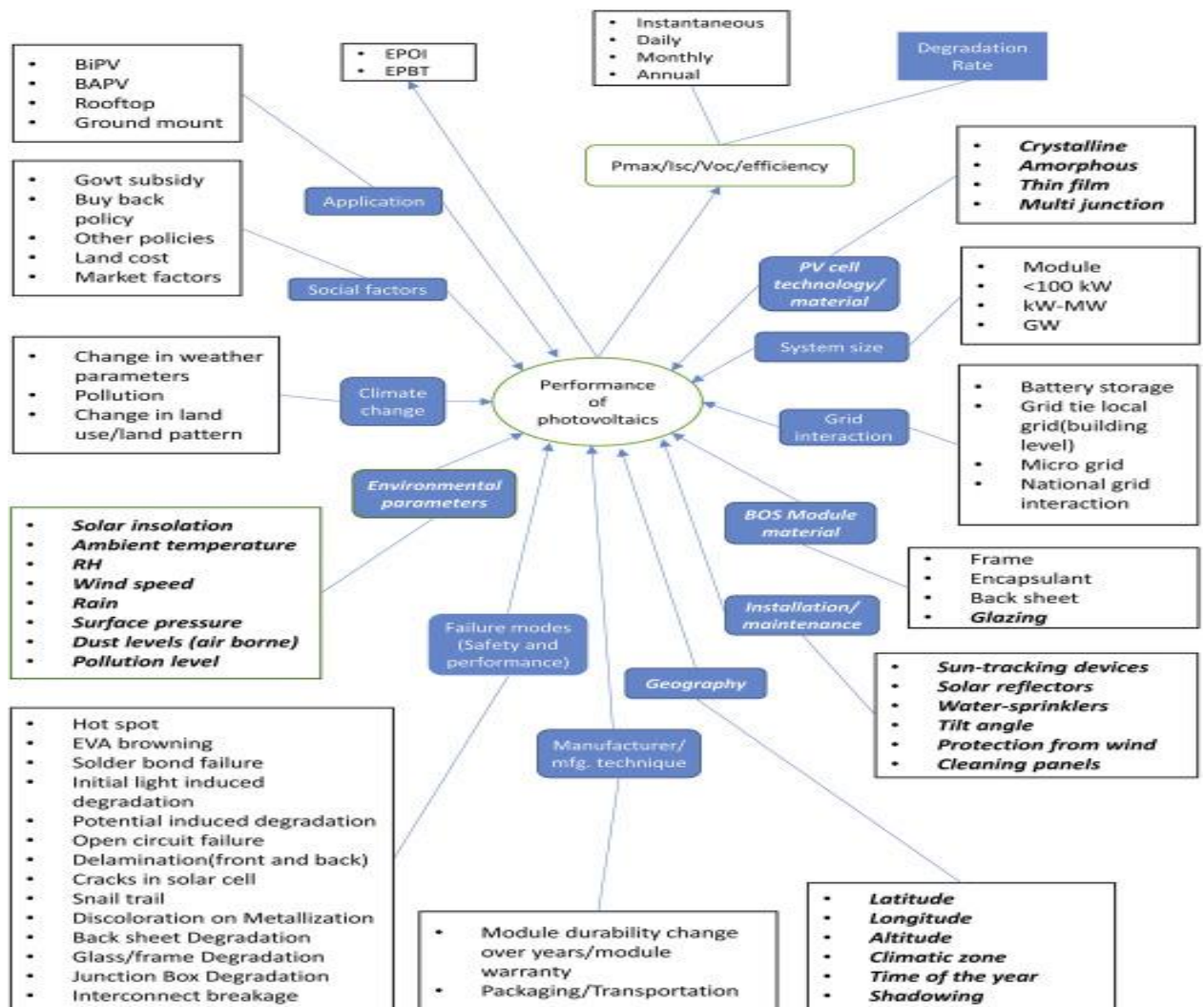


Рис. 3.1. Фактори, що впливають на продуктивність фотоелектричної системи. Джерело: [22]. Фактори, виділені жирним шрифтом/курсивом, досліджувались в роботі [23].

Таблиця 3.1

Перелік факторів, що впливають на вихідну потужність фотоелектричних, та характер впливу (джерело: [22]).

№	Factors being influenced Фактори, на які впливають	Factors influencing Фактори впливу
1	Dust / Пил	
1a	Size distribution / Розподіл за розміром.	Chemical composition, Wind speed, and wind direction / Хімічний склад, швидкість і напрям вітру
1b	Chemical composition / Хімічний склад.	Chemical composition, Atmospheric aerosols, Rain, Wind / Хімічний склад, Атмосферні аерозолі, Дощ, Вітер.
1c	Morphology / Морфологія.	Dust source, Chemical composition / Джерело пилу, хімічний склад.
1d	Source / Джерело.	Location of the site of a PV system / Місце розташування фотоелектричної системи.
1e	Moisture content/plasticity index of dust particles / Вміст вологи/індекс пластичності частинок пилу.	Humidity ratio, Chemical composition / Коефіцієнт вологості, Хімічний склад.
1f	Specific gravity of dust particles / Питома вага частинок пилу.	Chemical composition/species / Хімічний склад/вид.
1g	Gravimetric dust density Гравіметрична щільність пилу.	Size of the particles, Chemical composition, Moisture, Density of the dust particles, Tilt of the panel, Wind speed and direction, Temperature of the glazing, Cleaning interval / Розмір частинок, хімічний склад, вологість, щільність частинок пилу, нахил панелі, швидкість і напрямок вітру, температура скління, інтервал очищення.
1h	Interaction with glazing (adhesion/electrostatic force) / Взаємодія зі склом (адгезія/електростатична сила).	Chemical composition of dust / Хімічний склад пилу
1i	Transmission/absorption/reflection of the dust layer / Пропускання/поглинання/відображення шару пилу.	Gravimetric density, Chemical composition/species of dust, Snow cover / Гравіметрична густина, Хімічний склад/вид пилу, Сніговий покрив.
2	PV cell / Фотоелементи	
2a	Photovoltaic material and type of cell and its thermal/optical properties / Фотоелектричний матеріал і тип елемента та його теплові/оптичні властивості.	Total cost per area of the solar module, Solar PV market / Загальна вартість площі сонячного модуля, ринок сонячних батарей.
2b	Spectral response / Спектральний відгук.	Band-gap of the solar cell / Ширина забороненої зони сонячного елемента.
2c	Isc, Voc, FF / Isc, Voc, FF	Property of the solar cell / Властивість сонячної батареї.
2d	Quantum efficiency / Квантова ефективність.	Solar cell material / Матеріал сонячної батареї.
2e	Conversion efficiency / Ефективність перетворення.	Solar cell material / Матеріал сонячної батареї.

№	Factors being influenced Фактори, на які впливають	Factors influencing Фактори впливу
2f	p/n junction and band gap / p/n перехід і заборонена зона.	Property of the solar cell material / Властивості матеріалу сонячної батареї.
2g	PV cell temperature / Температура фотоелектричної комірки.	Absorption coefficient, Refractive index, Thermal conductivity of the material, Temperature of the back-panel sheet, Ambient temperature, Wind speed and direction, Solar insolation, Optical depth of the dust/snow layer, Tilt angle/angle of incidence / Коефіцієнт поглинання, показник заломлення, теплопровідність матеріалу, температура листа задньої панелі, температура навколишнього середовища, швидкість і напрямок вітру, сонячна інсоляція, оптична глибина шару пилу/снігу, кут нахилу/кут падіння.
3	PV panel system / Фотоелектричні панелі.	
3a	Panel Frame – material, thermal and physical properties / Каркас панелі – матеріал, теплові та фізичні властивості.	Strength requirements, cost, and availability / Вимоги до міцності, вартість і доступність.
3b	EVA (ethyl vinyl acetate) – refractive index, absorption coefficient, thermal properties / EVA (етилвінілацетат) – показник заломлення, коефіцієнт поглинання, теплові властивості.	Lamination, chemical inertness, cost and availability / Ламінування, хімічна інертність, вартість і доступність.
3c	Glazing – refractive index, absorption coefficient, surface texture, thermal properties / Скління – показник заломлення, коефіцієнт поглинання, текстура поверхні, теплові властивості.	Chemical inertness, external damage, optical properties, cost, and availability / Хімічна інертність, зовнішні пошкодження, оптичні властивості, вартість і доступність.
3d	Back sheet, thermal properties / Тильний лист, термічні властивості.	Strength requirements, cost, and availability / Вимоги до міцності, вартість і доступність.
3e	Wiring, contact probes / Електропроводка, контактні щупи.	Reliability, longevity, cost, and availability / Надійність, довговічність, вартість і доступність.
3f	Glazing temperature, back panel temperature / Температура скління, температура задньої панелі.	PV cell temperature, thermal resistance, transmittance, reflectivity of the layers, angle of incidence, dust layer/snow layer, wind, ambient temperature, GHI/DNI / Температура фотоелемента, термічний опір, коефіцієнт пропускання, відбивна здатність шарів, кут падіння, шар пилу/шар снігу, вітер, температура навколишнього середовища, GHI/DNI.
4	Installation of panel and sun geometry / Монтаж панелі та сонячна геометрія.	
4a	Fixed tilt angle/orientation of the panel / Фіксований кут нахилу/орієнтація панелі.	Location / Місцезнаходження.
4b	Sun tracking – single and dual / Стеження за сонцем – одиночне та подвійне.	Seasonal changes in solar earth geometry / Сезонні зміни геометрії сонячної землі.

№	Factors being influenced Фактори, на які впливають	Factors influencing Фактори впливу
4c	Time of the day and year / Пора доби і року.	
4d	Objects shadow on panel, partial / Тінь об'єктів на панелі, часткове затінення shadowing.	Trees, surrounding buildings / Деревя, навколишні будівлі.
4f	Location on earth- latitude, longitude, altitude / Розташування на землі - широта, довгота, висота.	
4g	Installation – roof or ground-based / Монтаж – даховий або наземний.	Land space/roof space / Земельна площа/простір на даху.
5	Radiation and atmosphere / Радіація і атмосфера.	
5a	Clouds / Хмари.	
5b	Atmospheric gases and aerosols / Атмосферні гази та аерозолі.	
5c	Dry duration (time between two rain events) and rain intensity (mm) / Тривалість сухості (час між двома дощами) та інтенсивність дощу (мм).	
5d	Wind speed and direction and gust / Швидкість, напрямок і порив вітру.	
5e	Ambient surface temperature / Температура навколишньої поверхні.	Aerosols/cloud cover, the intensity of the radiation / Аерозолі/хмарність, інтенсивність випромінювання
5f	Surface irradiance (GHI/DNI and diffuse)- (total and spectral) / Поверхнєве опромінення (GHI/DNI та дифузне) - (загальне та спектральне).	Aerosols/cloud cover, the intensity of the radiation / Аерозолі/хмарність, інтенсивність випромінювання
5g	Relative humidity / Відносна вологість.	
5h	Snow cover / Сніговий покрив.	
6	Cleaning maintenance / Обслуговування прибирання	
6a	Cleaning interval/critical cleaning period / Інтервал очищення/період критичного очищення	Cost, labor, water/energy / Вартість, праця, вода/енергія
6b	Cleaning technique (water-based, non-water based, manual, robotic) / Техніка очищення (на водній основі, без води, ручна, роботизована).	Glazing hardness, physical properties, availability of the water/energy / Твердість скління, фізичні властивості, доступність води/енергії.
6c	Natural cleaning (rain, fog, etc.) / Природне очищення (дощ, туман тощо).	Rain, fog, dew Дощ, туман, роса.
7	Performance parameters / Параметри продуктивності.	

№	Factors being influenced Фактори, на які впливають	Factors influencing Фактори впливу
7a	Instantaneous power output / Миттєва вихідна потужність.	Conversion efficiency, surface irradiance / Ефективність перетворення, поверхнєве опромінення.
7b	Daily, monthly and annual yield / Денна, місячна та річна дохідність.	Conversion efficiency, surface irradiance, cell temperature / Ефективність перетворення, поверхнєве опромінення, температура комірки.
7c	DC conversion efficiency of the module / Ефективність перетворення постійного струму модуля.	Quantum efficiency, cell temperature / Квантова ефективність, температура клітини.
8	Others / Інші.	
8a	Cost / Вартість.	Social, economic, market conditions / Соціальні, економічні, ринкові умови.
8b	Social-economic-political and market factors / Соціально-економіко-політичні та ринкові фактори.	
8c	Availability of natural resources (like water, land area, sunshine, etc.) / Наявність природних ресурсів (наприклад, вода, площа землі, сонячне світло тощо).	Location, resources are also seasonal dependent / Розташування, ресурси також залежать від сезону.

Цілком очевидно, що таку кількість факторів, які наведені в табл. 3.1, достатньо складно/практично не можливо врахувати в одній універсальній моделі прогнозування генерації сонячної електростанції. В цьому відношенні заслуговують на увагу результати роботи [24], в якій розглянуто питання визначення чинників впливу на підвищення енергоефективності використання фотоелектричних модулів під час їхньої експлуатації. Наведено комплекс вимог до сучасних фотоелементів і панелей з них, сонячних енергетичних установок та сонячних електростанцій в цілому. Структуровано перелік основних факторів, що впливають на ефективність роботи сонячних панелей. В літературному аналізі факторів впливу на роботу фотоелемента визначено 16 факторів (табл. 3.2), з яких до основних увійшли: кут падіння сонячних променів на модуль, якість фотоелектричного елемента, рівномірність освітлення, приріст температури фотоелемента, відбиття світлового променя від поверхні перетворювача, забруднення модуля, забруднення атмосфери (табл. 3.3).

Таблиця 3.2

Перелік факторів впливу на роботу фотоелемента.

Фактор	Оцінка в балах (40 max)
Кут падіння сонячних променів на модуль	40
Якість фотоелектричного елемента	38
Рівномірність освітлення	35
Приріст температури фотоелемента	33
Відбиття світлового проміння від поверхні перетворювача	29
Забруднення модуля	28
Забруднення атмосфери (смог, дим від пожежі)	25
Затінення жорстке	23
Затінення м'яке	22
Втрати у провідниках	18
Втрати на нагрівання провідників	17
Географічне розташування встановлення СБ	16
Проходження частини випромінювання через ФЕП без поглинання	15
Відбивання оптичного випромінювання від поверхні перетворювача	14
Розсіювання на теплових коливаннях напівпровідникової ґратки надлишкової енергії фотонів (ріст температури)	13
Не повне освітлення активної площі, що передбачає роботу на додатково створене власне навантаження та відповідно появу додаткового внутрішнього опору перетворювача	12

Таблиця 3.3

Найвпливовіші фактори впливу на роботу фотоелемента.

Кут падіння сонячних променів на модуль	40
Якість фотоелектричного елемента	38
Рівномірність освітлення	35
Приріст температури фотоелемента	33
Відбиття світлового проміння від поверхні перетворювача	29
Забруднення модуля	28
Забруднення атмосфери (смог, дим від пожежі)	25

Такий перелік факторів, на наш погляд, є цілком обґрунтований, а їх відносні оцінки можуть бути використані при моделюванні генерації сонячними електростанціями в умовах України.

3.4. Методичні підходи до оцінки факторного впливу на ефективність та добові графіки генерації сонячної електростанції.

Процес та інтенсивність генерації електричної енергії сонячною електростанцією є похідним від впливу на нього декількох факторів:

- фотоелектричних властивостей матеріалів, з яких виробляється фотоактивний шар сонячних панелей;
- інтенсивності сонячної інсоляції (тобто, потужності, щільності енергетичного потоку, який надходить через атмосферу від Сонця;
- умов спроможності максимальної реалізації фотоелектричних властивостей сонячними панелями.

Фотоелектричні властивості матеріалів, що застосовуються при виготовленні сонячних панелей, сонячних елементів (фотоелектричних перетворювачів з яких формуються сонячні панелі) визначаються їх структурою, типом «підкладки». Зазвичай це є кремній р-типу або n-типу.

Оцінюються такі властивості через коефіцієнт заповнення FF, який визначається з прямо пропорційної залежності зміни ефективності фотоперетворення при певних параметрах робочої напруги та струму.

Більш доступним для користувачів є визначення ефективності фотоперетворення через коефіцієнт корисної дії сонячної панелі (ККД), який характеризується та слугує мірою перетворення обсягу сонячної енергії, яка надходить на поверхню панелі, в електричну енергію, що генерується у процесі фотоперетворень. Наразі цей показник є на рівні 20% у середньому. Однак, слід зазначити, цей ККД є показником комплексним. Він характеризує як матеріали, які застосовуються у панелях, так і конструктивні особливості самих сонячних панелей. З точки зору споживача показник ККД є найбільш зрозумілим та традиційним. За великим рахунком, використання значення ККД має сенс при розрахунках установленної потужності сонячної панелі, особливо такого її показника, як питома генерація електроенергії, що припадає на одиницю її площі. Цей показник є дуже важливим при визначенні площі земельних

ділянок, які необхідно відводити під розміщення сонячних електростанцій. За сонячну енергію, яка надходить на Землю ми поки що не платимо, а користування земельною ділянкою коштує значних грошових витрат лише за землекористування (податки, орендна плата). Оцінюючи ефективність сонячних панелей, їх матеріалів через ККД ми повинні його визначати та пам'ятати, що він визначається за певних умов опромінення площі панелі. Будь-яке відхилення від цих умов вносить похибку у розрахунок, тому важливо для визначення показників миттєвої ефективності функціонування панелей (станції) звертати увагу на її змінність.

Тобто, ефективність сонячної панелі, визначеної за певних фіксованих умов, визначається двома основними факторами: ефективністю самих її фотоелектричних елементів та компонованням цих елементів в панелі:

$$E_{\text{панелі}} = f(E_{\text{фотоелементів}}, E_{\text{компоновання}}), \quad (3.1)$$

де, $E_{\text{панелі}}$ – ефективність функціонування сонячної панелі;

$E_{\text{фотоелементів}}$ – ефективність функціонування фотоелектричних елементів;

$E_{\text{компоновання}}$ – ефективність компоновання (розташування) фотоелектричних елементів в панелі.

Цей показник характеризує конструктивні та фотоелектричні властивості панелі. Застосовуючи певні сталі технології виготовлення, відповідні за якістю матеріали, напівфабрикати можна добитися його сталості та повторюваності при виготовленні сонячних панелей певної моделі. І цей факт є позитивним.

Однак, існує негативний фактор, який впливає на погіршення енергоефективності панелей при їх експлуатації протягом певних періодів часу. Це, так зване «старіння» сонячних панелей. Воно провокується процесами деструкції фотоелектричних елементів під дією сонячного опромінення протягом часу експлуатації. Характеризується невинним у часі поступовим зниженням кількості згенерованої електричної енергії за відносно незмінних умов експлуатації (швидкістю деградації). Цей ефект можна врахувати у

визначенні обсягів генерації через коефіцієнт «старіння» панелей. За літературними джерелами [25] в середньому фотоелектричні елементи знижують ефективність генерації зі швидкістю 1% щорічно. Більш точні показники вказують виробники панелей у документації. Вказана величина є суттєвою у перерахунку на величину установленої потужності сонячної електростанції і динаміку її зміни необхідно враховувати при прогнозуванні обсягів генерації електроенергії. Зважаючи на цей факт, формулу (3.1) доцільно доповнити фактором деструкції панелей $\Delta_{\text{деструкції}}$:

$$E_{\text{панелі}} = f(E_{\text{фотоелементів}}, E_{\text{компонування}}, \Delta_{\text{деструкції}}), \quad (3.2)$$

Зазначені показники є одними з вихідних при формуванні прогнозних показників обсягу генерації електричної енергії. Їх можна віднести до вихідних технічних параметрів сонячної електростанції. Вони є сталими, або змінними у часі за визначеною наперед функціональною залежністю, практично не мають стахостичного характеру. При формуванні бази даних та алгоритму прогнозування такі показники можна вважати постійними, або однозначно прогнозованими змінними за часом експлуатації електростанції і їх можна виводити у окремий блок.

Умови спроможності максимальної реалізації фотоелектричних властивостей сонячними панелями.

Максимальна генерація електричної енергії спостерігається у разі падіння сонячних променів перпендикулярно площині сонячної панелі. Однак, створити такі умови при розташуванні великих за площею масивів сонячних панелей доволі складно.

Звісно, сонячна генерація електроенергії найефективніша, коли поверхня панелей перпендикулярна сонячним променям, тому кут нахилу до горизонту (обрію) є одним з визначальних параметрів функціонування та налагодження сонячної електростанції, а, отже, і обсягів генерації. Іншим фактором, що впливає на величину генерації електроенергії є азимут – кут між напрямком на

Сонце і напрямком на південь. Відслідковування цих параметрів для малих масивів розташування незначної кількості сонячних панелей наразі не є складною інженерною задачею, але її реалізація потребує додаткового обладнання та значного фінансування, тому здебільшого сонячні панелі розташовують стаціонарно на відкритих поверхнях під визначеними кутами та з орієнтацією на південь. Кут нахилу залежить від географічної широти місцевості, в якій розташовані панелі. При його незмінності ефективність генерування електричної енергії є величиною змінною. Оцінити вплив цього ефекту на обсяги генерації можна через введення показника – коефіцієнт генерації електроенергії k_2 як відношення величини потужності фактичної генерації P_ϕ (кВт) до номінальної потужності панелі P_y (кВт):

$$k_2 = P_\phi / P_y \quad (3.3).$$

Цей коефіцієнт за сталого кута нахилу є змінним протягом часу і залежить від фактичного кута розташування Сонця над горизонтом упродовж доби.

Дослідження цього явища щодо визначення залежності зміни коефіцієнта k_2 у часі авторами проведено на лабораторній установці, яка в автоматичному режимі відслідковує кут нахилу панелі до Сонця.

Для виключення впливу кута азимуту при проведенні дослідження було визначено максимальне значення P_ϕ на i -й момент часу та оптимальний кут нахилу панелі, який забезпечує максимальну генерацію P_ϕ . Відхилення кута нахилу панелі визначалося від зазначеного оптимального кута. Результати досліджень представлено у табл. 3.4.

При подальших розрахунках прийнято допущення, що коефіцієнт k_2 набуває значення 1 ($k_2 = 1$) за оптимального кута нахилу панелі, тому при зміні кута нахилу у діапазоні від 0° до 25° розрахункове значення коефіцієнта k_2 змінюється у межах від 1 до 0,655, що відповідає діапазону зниження генерації від можливих 100% до 67,5% відповідно до зміни кута нахилу панелі від оптимального на i -й момент часу. При відхиленні кута нахилу на 5° від

оптимального спостерігається зниження обсягів генерації на 13,8%, при подальшому відхиленні на кожні 5° додаткове зниження становить у межах від 5,3% до 2,3%. Причому цей показник має тенденцію (тренд) зниження при збільшенні кута відхилення.

Таблиця 3.4

Зміна k_z при відхиленні кута нахилу сонячної панелі від оптимального

Відхилення кута нахилу	5°	10°	15°	20°	25°
Розрахунковий коефіцієнт k_z	0,862	0,809	0,712	0,688	0,655

Тобто, фактор цих змін обсягів генерації можна враховувати через визначення розрахункового коефіцієнта k_z . Якщо у подальшому переходити до формування баз даних системи розрахунку прогнозних обсягів генерації для конкретної сонячної електростанції, то попердньо необхідно для неї експериментальним шляхом визначати зміну k_z у залежності від положення Сонця над горизонтом.

Дані у табл. 3.4 характеризують показники сонячної генерації, отримані дослідним шляхом в географічних умовах розташування електростанції північного сходу України (м. Суми). Звісно, що ці дані не враховують прозорість атмосферного повітря.

Аналізуючи вплив геометричних факторів розташування сонячних панелей необхідно звернути увагу на розташування площини панелі відносно сторін горизонту, бо обсяг поглинання сонячного випромінювання, що надходить на площу сонячної панелі (і як наслідок - обсяг електроенергії, що генерується сонячною батареєю) залежить від орієнтації її відносно сторін світу, кута нахилу площини сонячного модуля щодо обрїю, протяжності активного (за можливістю генерації електроенергії модулем) щодобового періоду світлового дня. Тобто, максимальна ефективність (без урахування конструктивних особливостей самої панелі) функціонування сонячного модулю у нашому випадку має визначатися початковим орієнтуванням панелей

за географічними показниками, а також можливістю відслідковування їх змін протягом світлового дня та можливістю корегування орієнтації панелей у просторі з урахуванням координат розташування Сонця в i -й момент часу. Для невеликих масивів розташування сонячних панелей це можливо при застосуванні спеціальних пристроїв – трекерів, які дозволяють переміщувати у просторі площину панелей за двома координатами, відслідковуючи положення Сонця, тим самим вибираючи оптимальний кут її розміщення. Для великих масивів розташування сонячних панелей на трекерах є технічно складним, а, виходячи з економічної доцільності, не прийнятним.

Отже, для визначення умов генерації електричної енергії сонячними електростанціями у будь-який i -й момент (проміжок) часу за показниками взаємного розташування площини сонячних панелей та Сонця необхідно визначати кут падіння (відхилення) променів Сонця на площину панелей, який залежить у свою чергу від координат розміщення Сонця відносно обрїю та орієнтацією за сторонами горизонту. Такі розрахунки теоретично проводити можна, але це дуже громіздка робота і, враховуючи обсяг даних, необхідних для розрахунку та їх точність, кінцевий результат прогнозування буде не найкращий. Згідно літературних джерел та проведених авторами досліджень характер зміни обсягів сонячної генерації представлено на рис. 3.2. Дані, за якими побудовано криві не враховують вплив погодних факторів, а лише сезонні (астрономічні) зміни.

Для формування прогнозних обсягів генерації сонячними електростанціями електричної енергії важливо мати прогнозний розподіл їх за місяцями року. Розрахунковий розподіл обсягів генерації за місяць від загальнорічного можна визначати за статистичними даними з відповідним корегуванням.

Графічну інтерпретацію такого розподілення представлено на рис. 3.3.

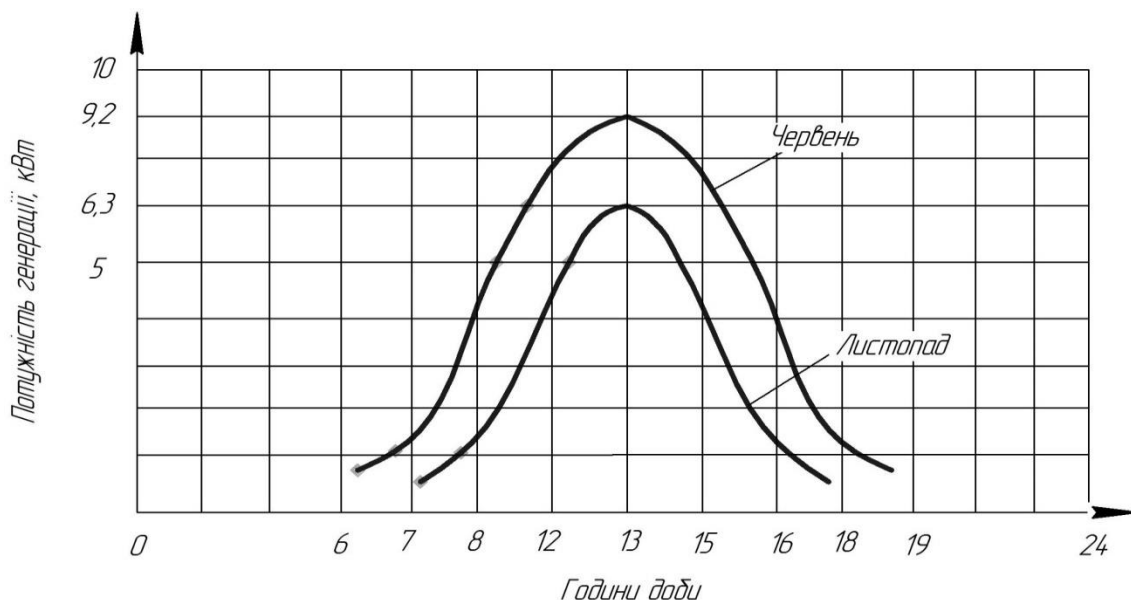


Рис. 3.2. Графік добової зміни миттєвої потужності генерації електроенергії сонячною електростанцією установленою потужністю 10 кВт

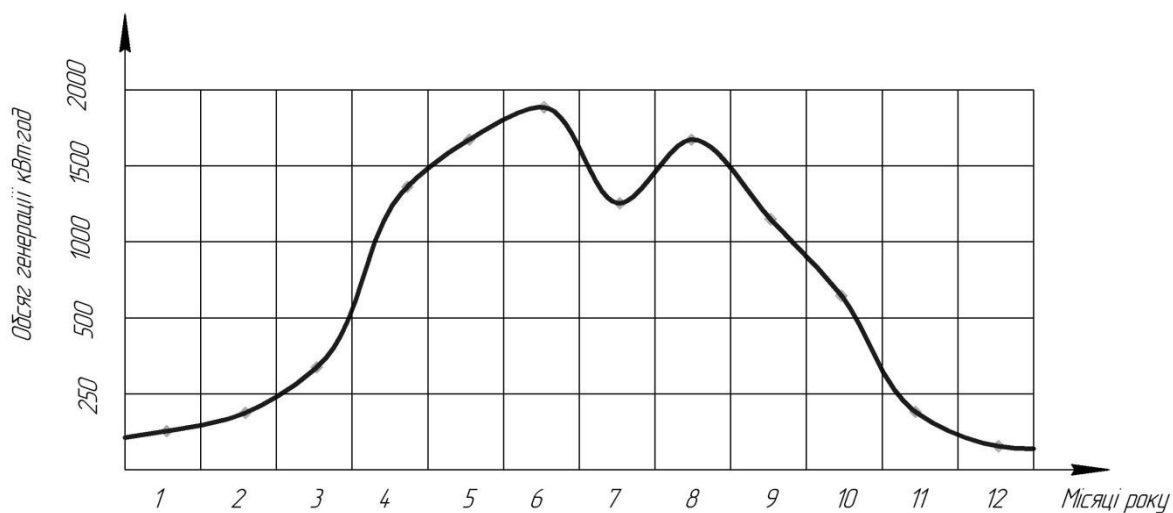


Рис. 3.3. Розподіл середніх обсягів генерації електроенергії за місяцями року сонячною електростанцією установленою потужністю 10 кВт.

Приведені показники розраховано з урахуванням всіх впливових факторів, включаючи погодні, кліматичні та технічні. Тобто, при «грубому» визначенні щомісячних обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями можливе застосування метододики з наступними кроками:

Крок 1. Визначення за статистичними даними річної генерації електроенергії сонячною електростанцією $\sum A$ (кВт*год / рік);

Крок 2. Визначення встановленої електричної потужності генерації сонячної станції $P_{\text{устан.}}$ (кВт);

Крок 3. Розрахунок середньорічної питомої генерації електроенергії сонячною електростанцією ρ за формулою:

$$\rho = \sum A / P_{\text{устан.}} \quad (3.4);$$

Крок 4. Визначення прогнозного обсягу генерації електроенергії протягом місяця. Для цього треба скористатися значенням коефіцієнта % генерації для і-го місяця κ_{Gi} (дивись рис. 3.3) і значенням ρ :

$$A_{i \text{ місячне}} = \rho \kappa_{Gi} = \kappa_{Gi} \sum A / P_{\text{устан.}} \quad (3.5).$$

Подальша диференціація прогнозних показників до рівні добового прогнозу, погодинного не можлива без урахування поточної синоптичної обстановки у даному місці та з урахуванням всіх інформаційних блоків, які стосуються конкретної електростанції.

Основною задачею та результатом погодного (синоптичного) прогнозу для сонячних електростанцій є в кінцевому вигляді прогноз зміни та рівня інсоляції й даній географічній точці. Інтенсивність надходження сонячної енергії визначається прозорістю атмосфери, на яку, у свою чергу, впливають хмарність, тиск, вологість, швидкість вітру, уф-індекс та інші, які входять у перелік показників прогнозу погоди. На прозорість атмосфери також впливають такі атмосферні явища як дощ, снігопад, туман, іній, град. Ці явища та показники мають як періодичний так і стохастичний характер. Прозорість атмосфери характеризується коефіцієнтом прозорості, який залежить від мутності атмосфери, від погоди, від географічної широти, висоти Сонця. Він показує, яка частина радіації досягає земної поверхні і дорівнює відношенню прямої радіації на земній поверхні до сонячної радіації, яка потрапляє на верхню межу атмосфери.

3.5 Висновки

За спрощеною моделлю необхідно розглядати сонячну електростанцію як енергетичну установку, що складається з джерела випромінювання (Сонця), приймача-генератора (сонячні панелі), який приймає сонячну енергію та перетворює її в електричну. Між цими кінцевими елементами розташовується фільтр (земна атмосфера), яка постійно змінює свою прозорість, чим і впливає на інтенсивність енергетичного потоку від Сонця до площини сонячних батарей.

Звідси, основною проблемою визначення прогнозних показників сонячної генерації електроенергії є прогнозування прозорості атмосфери у певний період часу. І ця задача є основною, бо чинники, які впливають на «поведінку» цього «фільтру» є багатовекторними, мають періодичні та стахостичні закономірності їх змін.

При формуванні прогнозних показників обсягу генерації електроенергії сонячними електростанціями можна розглядати декілька груп первинних чинників:

1. Показники сонячної інсоляції у місцях розташування сонячних електростанцій та її періодичні сезонні, добові зміни у часі.
2. Технічні показники сонячних електростанцій та їх елементів щодо генерації електричної енергії та їх прогнозовані зміни у часі.
3. Синоптичні показники, які визначають «фільтрувальні» властивості атмосфери у певний час, або протягом певного прогнозного періоду.

Перші дві групи показників визначаються однозначно і мають чіткі закономірності їх змін у часі. Їх можна віднести до констант алгоритму прогнозу.

Третя група включає показники, зміна яких у часі має періодичний, або стахостичний характер.

Таким чином, основною задачею наступних досліджень має бути визначення впливу синоптичних показників на обсяги сонячної генерації електроенергії, визначення та прогнозування динаміки їх змін.

4. Аналіз існуючих систем, методів та засобів прогнозування зміни погодних умов у місцях розташування сонячних електростанцій, визначення їх переваг та недоліків.

4.1. Нормативно-правові передумови прогнозування зміни погодних умов у місцях розташування сонячних електростанцій.

Враховуючи пряму залежність обсягів і часових графіків/режимів генерації сонячних електростанцій від погодних умов у місцях їх розташування, розробка/адаптація методів та моделей точного прогнозування зміни погодних умов набуває важливого техніко-економічного значення. При цьому, задача прогнозування (як довгострокового так і короткострокового) спрямована на вирішення двоєдиної задачі: по-перше, для погодинного прогнозування генерації з метою дотримання технічних умов з приєднання до локальних енергосистем муніципального чи регіонального рівня, що дозволить не лише збалансувати відповідну енергосистему (зрештою і об'єднану енергосистему України) за потужністю і напругою, але й підвищити «якість» енергії у мережі – її частоту та фазові зсуви; по-друге, для підвищення економічної ефективності функціонування сонячної електростанції за рахунок мінімізації відшкодування частини вартості врегулювання можливого небалансу (відхилення фактичних і планових погодинних обсягів відпуску) електричної енергії гарантованого покупця відповідно Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] та правил функціонування балансуючої групи гарантованого покупця, у відповідності до вимог [2, 3].

Перша частина двоєдиної задачі регламентується СОУ НЕК 341.001:2019 «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України» [4]. Зокрема, в п. 6.4.3.1 зазначається, що «Вимоги до оперативного управління та налаштування системи автоматичного управління активною потужністю ... СЕС

визначаються власником мереж та системним оператором в технічних умовах на приєднання електростанцій до електричної мережі». Ця норма встановлює виключне право системного оператора енергосистем муніципального чи регіонального рівня виконувати функцію регулювання активної потужності відповідної сонячної електростанції з власного центрального диспетчерського пункту.

При цьому, крім інших диспетчерських обмежень, «сонячні електростанції потужністю 25 МВт і більше мають бути оснащені автоматичною системою регулювання активної потужності, яка б дозволяла дистанційно з центрального диспетчерського пункту регулювати активну потужність електростанції та мала у своєму складі функції обмеження генерації, які використовуються для збалансування енергосистеми...» (п. 6.4.3.4). До таких функцій обмеження генерації відносяться:

- абсолютне обмеження генерації – обмеження активної потужності електростанцій до наперед визначеного ліміту потужності для захисту мережі загального призначення від перевантажень (п. 6.4.3.4.1);

- дельта обмеження генерації – резерв активної потужності електростанцій, що створюється для регулювання частоти та задається уставкою в % від можливої генерації електростанцій (6.4.3.4.2);

- обмеження градієнту потужності – обмеження максимальної швидкості, з якою активна потужність може змінюватися (п. 6.4.3.4.). Обмеження градієнту потужності використовується в загальносистемних цілях для запобігання виникнення небезпечних для енергосистеми небалансів потужності.

Вказані норми, з практичної точки зору, обумовлюють актуальність розробки та впровадження ефективних методів та моделей прогнозування генерації сонячних електростанцій. Враховуючи, що саме погодні фактори є стохастичними але, при цьому, відіграють вирішальну роль у прогнозуванні, дослідження методів прогнозування зміни погодних умов в зоні розташування сонячних електростанцій має важливе практичне техніко-технологічне значення.

Друга частина двоєдиної задачі актуалізована з прийняттям Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії» [5]. Зокрема, цим Законом були внесені доповнення до Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] які передбачають відповідальність за небаланси, тобто за відхилення реальної погодинної генерації сонячними електростанціями від попереднього прогнозу. Зокрема, частина 6 ст. 71 була доповнена нормою, у відповідності до якої «За відхилення фактичних погодинних обсягів відпуску електричної енергії виробників, яким встановлено «зелений» тариф, ... від їхніх погодинних графіків відпуску електричної енергії виробниками, які входять до балансуючої групи гарантованого покупця, відшкодовується частка вартості врегулювання небалансу електричної енергії гарантованого покупця ...». Відповідні норми відшкодування, зі зміною їх за роками, наведені в п. 11 розділу XVII «Прикінцеві та перехідні положення» Закону.

Очевидно, що вказані норми актуалізують задачу прогнозування генерації сонячними електростанціями не тільки з техніко-технологічної, а і з економічної точок зору. Іншими словами, – актуалізується проблема прогнозування генерації і питання мінімізації відшкодування за неточність такого прогнозування. Прогнозування стає вирішальним інструментом для економічно ефективної інтеграції ресурсів змінної відновлюваної енергії (variable renewable energy, VRE), зокрема сонячної енергії, в локальні, регіональні і національну енергосистеми.

При цьому, технічна норма «погодинних графіків відпуску електричної енергії виробниками» конкретизує задачу прогнозування зміни погодних умов в зоні розташування сонячної електростанції саме в «погодинну».

4.2. Практика врахування метеокліматичних факторів при прогнозуванні виробітку електроенергії сонячними електростанціями.

Аналіз літературних джерел свідчить, що у вітчизняній практиці задача прогнозування зміни погодних умов у місцях розташування сонячних електростанцій в «чистому» вигляді не ставиться. Задача, здебільшого, розглядається як врахування метеокліматичних факторів при прогнозуванні виробітку електроенергії. При цьому, має місце широкий спектр методичних підходів/рекомендацій – від повного ігнорування фактору коливання погодних умов до включення в моделі прогнозування виробітку електроенергії сонячними електростанціями як суттєвих обмежень.

В роботі [6] при обґрунтуванні місця розташування сонячних електростанцій пропонується враховувати наступні критерії: зони сонячного потенціалу (у відповідності до атласу); площа, яку буде займати станція; потужність; азимут (фактор, що характеризує відхилення поглинаючої площі колектора від південного напрямку, при орієнтуванні сонячного колектора точно на південь азимут = 0°); кут нахилу сонячних панелей; широта місця установки (показує, наскільки місце знаходиться на північ або на південь від екватора, і складає кут від 0° до 90° , відлічуваний від площини екватора до одного з полюсів – північного або південного); енергія (значення кількості енергії, що виробляється сонячними панелями за рік; фактор енергії безпосередньо залежить від потужності панелей і ступеня інсоляції).

В роботі [7] для аналізу ефективності сонячної енергії пропонується використовувати показник «виробництво електроенергії на 1 кВт встановленої потужності» який розраховується як відношення кількість електроенергії виробленої на станції за рік (кВт·год) до встановленої потужності сонячної станції, (кВт). При цьому, автори зазначають, що цей показник «... може дещо змінюватися в більшу чи меншу сторону в різні роки залежно від погоди». Разом з тим кількісна оцінка впливу погодних факторів в роботі не наводиться.

Суттєво більш обґрунтованими, в частині врахування погодних умов при прогнозуванні генерації сонячними електростанціями, є методичні підходи, викладені в роботі [8]. Авторами розвивається концептуальна модель безхмарного або ясного неба (clear sky model) [9, 10] з використанням загальнодоступної вихідної інформації веб-сайтів NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), PVGIS (https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA) та Метеопост (<https://meteopost.com/weather/archive>).

В роботі [11] для короткотермінового прогнозування генерації сонячної енергії з урахуванням зміни погодних умов авторами запропоновано гібридну модель ARMA/ANN – авторегресії та нейронних мереж. При цьому, автори вказують, що «оскільки методи авторегресії застосовні до стаціонарних часових рядів, а рівень радіації має змінну природу, зокрема сезонну, запропоновано способи забезпечення стаціонарності ряду. Це, зокрема, використання нормалізованих величин – індексу прозорості або чистоти неба та застосування періодичних коефіцієнтів (сезонної декомпозиції ряду). Індекс прозорості (Clearness Index) визначається як відношення рівня радіації на поверхні землі до позаземного рівня (без атмосферних перешкод). Індекс чистого неба (Clear Sky Index) будується аналогічно, але враховує все випромінювання, що потрапляє на горизонтальну площадку».

Слід зазначити, що при оцінюванні точності прогнозу на основі пропонованого підходу, автори вказують на «залежить від розташування, тривалості вимірів та інших факторів, важко зробити оцінку якості прогнозу лише на підставі метрик» і роблять висновок про необхідність «... порівняння різних підходів за однакових умов чи порівняння можливостей прогнозу в різних регіонах».

В закордонних наукових публікаціях наводяться результати фундаментальних досліджень з врахування зміни погодних умов при прогнозуванні генерації сонячними електростанціями.

Зокрема, в роботі [12] пропонується модель для короткострокового прогнозування генеруючої потужності великомасштабної сонячної електростанції у В'єтнамі з урахуванням коливань погодних факторів із застосуванням алгоритму мереж довгострокової короткочасної пам'яті (LSTM). Автори зазначають, що запропонована модель прогнозування дозволила скоротити середню абсолютну відсоткову похибку до 9,881% в порівнянні з базовими моделями 10,857%. Слід зазначити, що показник похибки прогнозування 9,881% відповідає українським нормативним вимогам. Ця обставина актуалізує апробацію запропонованої моделі для умов України.

В роботі [13] розвиваються статистичні методи прогнозування сонячної енергії на основі методів штучного інтелекту. Для практичного застосування методу в якості вхідних даних приймаються попередні вимірювання потужності та метеорологічні прогнози сонячного опромінення, відносної вологості та температури на місці фотоелектричної енергетичної системи. Самоорганізована карта навчена класифікувати місцевий тип погоди на 24 години вперед, за даними національних онлайн-служб метеорології. Унікальна особливість методу полягає в тому, що після попередньої класифікації типу погоди можна добре навчити нейронні мережі для підвищення точності прогнозу.

В роботі [14] вказується, що вихідна потужність сонячних електростанцій є дуже невизначеною через кілька метеорологічних факторів, таких як температура, швидкість вітру, хмарний покрив, рівень аерозолу в атмосфері та рівень вологості. Мінливість вихідної потужності прямо чи опосередковано створює різні проблеми для електромережі, такі як контроль та надійність енергосистеми, вартість резервів, допоміжна генерація, інтеграція в мережу та планування електроенергії. Цим автори обґрунтовують практичну потребу в точному прогнозуванні. З цією метою аналізуються регресивні моделі критичного аналізу та моделі прогнозування на основі штучного інтелекту. Крім того, також детально обговорюються потенційні переваги гібридних методів для моделей прогнозування.

В роботі [15] наведені результати найбільш ґрунтовного аналізу методів прогнозування сонячної фотоелектричної енергії з використанням статистичних, фізичних і ансамблевих методів часових рядів, проведена класифікація методів прогнозування сонячної фотоелектричної енергії, наведено порівняльний аналіз методів прогнозування сонячної фотоелектричної енергії з відповідними ресурсами. Зазначається, що моделі прогнозування на основі штучного інтелекту широко використовуються завдяки їхній здатності вирішувати нелінійні та складні структури даних. Аналіз продуктивності показує, що ці методи перевершують традиційні методи.

4.3. Методи прогнозування.

Слід погодитися з висновками [16], що проблема короткострокового прогнозування метеоумов, а от же і погодинного прогнозування генерації, «... ніде у світі не розв'язана надійно і точно». Пропонується безліч алгоритмів і програмних комплексів, але загальноновизнаних методичних підходів до прогнозування VRE не існує.

В роботі [16] зазначається, що «окрім проблем математичного моделювання погодних процесів і створення відповідних інформаційно-обчислювальних комплексів/продуктів для складання подібного роду метеопрогнозів, тим більше з похибкою в межах 5-10%, необхідно сформувати мережу автоматичних станцій для збору метеоданих, які б автоматично передавали дані про локальний стан погодних умов в режимі «он-лайн».

Крім того, в Україні відсутня система оперативного автоматичного моніторингу локальних метеоданих в режимі он-лайн, придатних для погодинного і добового прогнозування. Саме ці обставини визначають необхідність комплексного державного підходу до формування єдиної методології прогнозування зміни погодних умов в зонах розташування сонячних електростанцій, формування інфраструктури збору і обробки

первинної метеокліматичної інформації і відкритих ретроспективних баз даних про обсяги генерації сонячними електростанціями в різних регіонах України.

У Додатку А наведені результати аналізу існуючих моделей прогнозування зміни погодних умов. Такі моделі широко застосовуються для прогнозування генерації на вітрових та сонячних електростанціях. Метою аналізу було визначення можливостей їх використання для прогнозування генерації на сонячних електростанціях в умовах України з урахуванням технічних, економічних та організаційних обмежень. Аналіз проводився на основі аналітичного огляду [17].

Слід зазначити, що при обґрунтуванні принципів, методів та моделей програмно-аналітичного комплексу точного прогнозування обсягів погодинної/добової генерації електроенергії сонячними електростанціями в тому числі для мінімізації зелено-вугільного парадоксу, нами враховувалась та обставина, що ДК «Гарантований покупець» фактично відповідає перед оператором системи розподілу за небаланси всіх учасників її балансуючої групи – виробників електроенергії з ВДЕ, а тому теж потребує сучасної системи прогнозування.

За підтримки USAID «Проект енергетичної безпеки» ДК «Гарантований покупець» у червні 2021 року залучила для цього Enercast (<https://www.enercast.de>) – німецького провайдера з надання послуг прогнозування виробництва енергії з ВДЕ.

Enercast працює у цій сфері вже понад 10 років та надає прогнози генерації об'єктів на понад 180 ГВт встановленої потужності. Програмне забезпечення компанії використовує технологію штучного інтелекту для опрацювання великих масивів метеорологічних даних. Система поєднує числові моделі прогнозування погоди з історичними даними та інформацією про конкретні СЕС та ВЕС: для запуску процесу «Гарантований покупець» збирав додаткові дані щодо технічних особливостей та обладнання усіх генеруючих установок виробників, що входять до його балансуючої групи. Це

дозволяє зрозуміти «поведінку» електростанції та створювати більш точний прогноз для кожної з них.

Важливою складовою розробки моделей прогнозування зміни погодних умов в зоні розташування сонячних електростанцій є інформаційне забезпечення.

На сьогодні в світі існує три глобальні чисельні моделі прогнозування погоди, або гідродинамічні моделі атмосфери. Тобто дані з усіх метеостанцій світу, супутників, аналізуються, збираються й обробляються трьома способами на основі нелінійних рівнянь.

Foreca – один з провідних світових компаній, що постачає прогнозні дані про погоду. Працює на базі моделі ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Ця модель є найновішою, швидко розвивається та спеціалізується на довгострокових прогнозах.

Модель UkMet використовується метеорологічною службою MetOffice – Британського урядового метеобюро. Дана модель спеціалізується на короткостроковому прогнозі.

Американська модель GFS має найбільше покриття спостереження. Модель GFS адмініструє NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) – Національний центр атмосферних і океанічних досліджень США. Дані GFS містяться у відкритому доступі.

В табл. 4.1 наведені дані про основні інформаційні ресурси, які передбачається використовувати при розробці моделі прогнозування зміни погодних умов в зонах розміщення сонячних електростанцій України.

Таблиця 4.1

Основні ресурси прогнозування погодних умов

Ресурс	Посилання	Основна характеристика
Gismeteo	http://www.gismeteo.ua	Містить дані про понад 15000 населених пунктів України й близько 50000 міст світу. Використовує модель прогнозування погоди на основі даних GFS і UkMET.
Sinoptik	http://sinoptik.ua	Містить дані про 29815 населених пунктів України й 104000 міст світу. Використовує

		прогнозні дані Foreca, на основі моделі ECMWF
Meteoprog	http://www.meteoprog.ua	Містить дані про 15000 міст світу і 1209 населених пунктів України. Використовує чисельні моделі прогнозу погоди WRF (Weather Research and Forecasting).
Pogoda	http://pogoda.yandex.ua	Містить дані про 12146 міст світу. Використовує прогнозні дані Foreca, на основі моделі ECMWF.
Meteo	http://www.meteo.gov.ua/	Сайт українського Гідрометцентру Прогноз складається на основі моніторингу наземних метеостанцій, а також даних із космічних супутників.
Solcast API Toolkit	https://solcast.com	Інструмент, який дозволяє отримати данні про погодні умови в конкретній точці як в реальному часі, так і архівні масиви даних.

4.4. Прогнозування сонячної активності та обсягів генерації електроенергії на термін від декількох хвилин до 6 годин.

Розглядаючи методи прогнозування обсягів генерації електроенергії сонячними електростанціями, слід звернути увагу на те, що використання та вибір методу прогнозу залежить від того, які завдання необхідно виконати і які цілі мають бути досягнуті у результаті їх застосування. В одному випадку це може бути визначення прогнозних обсягів ВДЕ-генерації протягом певного періоду часу, або визначення динаміки його зміни у більш короткі терміни. Виходячи з цих умов використовуються різні математичні моделі та підходи. Найбільш затребуваними є методики прогнозування терміном від декількох хвилин до 6 годин, а також на добу вперед.

4.4.1. Метод Total sky imagery.

Цей метод здебільшого використовується для прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячною електростанцією на 10 - 30 хвилин наперед, тобто практично у режимі реального часу. У своїй основі він

використовує інструменти спостереження та зображення неба і включає послідовне виконання декількох кроків:

Крок 1. Дослідження ситуації хмарності у місцях спостереження (місцях розташування сонячних станцій, або близьких до них). Для цього робляться знімки наявної хмарності з поверхні землі.

Крок 2. Ретельний аналіз отриманої інформації визначення типу хмарності, її щільності, висоти хмарності.

Крок 3. За результатами послідовного виконання декількох знімків визначається (оцінюється) вектор руху хмар, його динаміка.

Крок 4. Використовуючи отриману інформацію за кроками 1, 2, 3, розраховується потужність сонячного опромінювання і, відповідно до цих даних, формуються прогностичні показники генерації електроенергії сонячної електростанції з урахуванням її технічних показників (константних та плинних у часі).

За описаним методом та його кроками проблематично визначати прогноз на більший термін через труднощі прогнозування розвитку хмарних полів (зміну геометричних показників хмар). На жаль, наразі не існує чіткої математичної моделі формування та динаміки зміни хмарних полів. Як варіант, для доповнення інформаційних масивів користуються матеріалами, які візуалізують «хмарну ситуацію» у прилеглих районах, а потім враховують її через визначення векторів переміщення хмар. У цьому випадку основну невизначеність та похибку вносить розташування хмар за висотою, а, отже, і різні величини векторів їх швидкості. Крім того, при розташуванні спостерігача на землі можемо отримати «картинку» за якої одні хмари (які розташовуються ближче за висотою до спостерігача) можуть закривати інші. Все це також позначається на точності прогностичних показників.

4.4.2. Аналіз хмарності через аналіз знімків отриманих з космосу.

Методологічні підходи цього методу аналогічні розглянутому методу Total sky imagery. Однак, первинними інформаційними масивами, що використовуються, є зображення «хмарної картинки» отримані з супутників. Тобто, ми можемо аналізувати обстановку за принципом «зверху – вниз». Додатковими «бонусами» є:

- можливість отримати та візуалізувати інформацію у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру;
- можливість охоплення значних площ земної поверхні;
- можливість більш точного вимірювання та розрахунку коефіцієнту відбиття і, як результат, більш точно розрахувати індекс хмар для визначення їх оптичної глибини (прозорості).

На практиці цей метод досить часто застосовується при визначенні сонячного ресурсу територій (визначення рівня інсоляції). Однак, через те, що для отримання зображень використовуються супутники, які знаходяться на геостаціонарних орбітах, їх розподільна якість доволі низька. На фотографіях зображуються великі конвективні хмари, а хмари менших розмірів розглянути доволі важко, звідси, і зниження якості прогнозу. Крім того, для оброблення інформації з супутників потрібно більше часу і в деяких випадках вона може бути застарілою для вибраного інтервалу часу.

Однак, за можливості одночасного дослідження великих площ хмарних покриттів такий спосіб може давати доволі точний прогноз на період до 6 годин і його результати за точністю можуть перевершувати показники числових методів прогнозу.

4.5. Прогнозування сонячної активності та обсягів генерації електроенергії на одну добу та більше.

Прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями на термін до 1 доби проводиться на основі прогнозу синоптичної ситуації на визначений період, бо, як вже зазначалося, основним стохастичним фактором, що впливає на обсяги генерації є зміна погодних умов. Для цього використовуються числові моделі прогнозування. Однією з моделей є модель NWP (Numerical weather prediction). Вона являє собою набір сучасних комп'ютерних програм, які описують з використанням математичних та фізичних алгоритмів процеси у атмосфері та їх взаємний вплив і зміни у часі.

Вихідними даними для розрахунків є результати аналізу метеорологічних спостережень. Звісно, чим точніші ці результати, тим точніші результати прогнозування. Для підвищення точності мають використовуватися дані метеорологічного стану як у місці розташування станції (конкретній місцевості) так і дані спостережень верхніх шарів атмосфери, прилеглих територій.

Числові прогнози можуть бути отримані з використанням різних математичних моделей на період більше 15 діб, а також доволі короткочасні прогнози для невеликих місцевостей з можливістю їх частого оновлення.

4.6. Просторово-часова інтерполяція і згладжування.

При відсутності статистичної інформації, або реальної синоптичної поточної інформації у точці розташування сонячної електростанції застосовується спосіб просторово-часової інтерполяції та згладжування. Його ідея полягає у згладжуванні (усередненні) відомих результатів прогнозів для двох найближче розташованих географічно точок. У разі його використання максимальна точність отриманих прогнозних результатів може бути досягнута при використанні прогнозних даних якомога більшої кількості розташованих навколо точок. Існуючі наразі програмні продукти дозволяють у

автоматичному режимі проводити згладжування для не великих за розмірами територій (до 10000 кв. км), а також і для значних за площею територій (близько 100000 кв. км). У країнах ЄС для регіонів «компактного» розташування вітрових та сонячних електростанцій розроблені та впроваджені спеціальні програмні продукти, які враховують максимальну кількість погодних особливостей регіонів. Вони дозволяють виконувати згладження для площ близько 100 кв. км.

4.7 Модель числового прогнозу з застосуванням корекції на базі ретроспективних статистичних даних.

Алгоритми моделі визначають прогнозні показники генерації з застосуванням результатів числових прогнозів показників погоди, які можуть бути скореговані у відповідності до ретроспективних інформаційних масивів попередніх метеоспостережень. Це може значно підвищити точність результатів прогнозування через врахування особливостей місцевих метеоумов, а також усунути систематичні помилки в прогнозах. Для цього використовується модельна статистика результатів (Model Output Statistics – MOS). Її застосування дозволяє, крім того, прогнозувати вплив сильних гроз та опадів. Якщо користуватися накопиченими фактичними даними за певний період часу (бажано на менше року) та проводити порівняння з прогнозними, то можна оцінити відхилення і його враховувати як коригуючий коефіцієнт у результатах розрахунку числовою моделлю, що значно покращує якість прогнозування. Моделі MOS можуть відрізнятися між собою кількістю природних факторів, які нею враховуються, це можуть бути: хмарний покрив, температура, вологість, напрямок і сила вітру, ймовірність опадів. При прогнозуванні обсягів сонячної генерації враховуються у цих моделях показники потужності сонячного випромінювання, час, прозорість атмосфери, кут розташування сонця та інші.

4.8. Точність прогнозу генерації електроенергії сонячними електростанціями та фактори, що на неї впливають.

Наразі прогнозування обсягів виробництва електроенергії сонячними електростанціями є справою дещо проблематичною з точки зору існуючих можливостей визначення та урахування взаємного впливу цілої низки факторів, які впливають на кінцевий результат прогнозування. Основними чинниками, що впливають на точність прогнозування є:

- змінні технічні показники самої електричної станції, які характеризуються довготривалими та відносно постійним у часі тенденціями зміни (деградація самих панелей, або зниження інтенсивності фотоелектричних процесів у матеріалах). Такі процеси описані, досліджені виробниками сонячних панелей, характеризуються певною динамікою розвитку їх у часі і тому їх урахування у прогнозних розрахунках не є великою проблемою;

- змінні показники надійності функціонування елементів та вузлів сонячної станції (раптові несправності мереж станції, комутаційної апаратури, перетворювачів та інше). Їх підвищення досягається проведенням регламентних робіт на обладнанні, формуванням необхідної кількості стрінгів, розробленні та впровадженні систем резервування та захисту при розробленні технічної структури побудови сонячної електростанції для мінімізації втрат від можливих відказів та аварій. Вплив таких ситуацій на похибку прогнозних показників можна враховувати через провадження у алгоритми розрахунку певних коефіцієнтів надійності;

- змінні астрономічні параметри, які характеризують відносне розміщення площини сонячних панелей та Сонця. Наразі ці процеси описані і мають підтвержені практичні дані для будь-яких місцевостей поверхні планети і виражаються через геометричні показники та функціональні закономірності їх зміни у часі. Їх врахування у методиці прогнозування наразі не є великою проблемою;

- змінні кліматичні параметри, які виражаються через періодичну зміну сезонних параметрів навколишнього природного середовища (температура, вологість повітря, дощі, снігопади, тумани і т. і.). Зміни значення таких показників мають ймовірнісний характер, хоча тренди змін можна описати через відповідні коефіцієнти;

- змінні погодні показники, які практично впливають на інсоляцію та визначають, у кінцевому рахунку, її миттєву потужність. Вони є найбільш визначальні, найбільш швидкозмінні у часі. Прогноз зміни та визначення конкретних параметрів на даний момент часу та періоду є найскладнішою задачею при прогнозуванні обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями. Як вже зазначалося, існує декілька методів та моделей прогнозування зміни погодних показників.

4.9 Висновки

Наразі існуючі моделі та способи прогнозування не є універсальними. Результати прогнозування можуть мати суттєві помилки та характеризуються значними похибками. При цьому, чим більш довгий період прогнозування, тим прогноз точніший і, навпаки, чим коротший термін прогнозування, тим похибка більша. Така ситуація спостерігається при прогнозуванні для географічних територій. Точність прогнозу зростає зі збільшенням площі території.

Найкращий результат можна отримати поєднаним аналізом показників, розрахованих за різними методами, або використанням у числових моделях усереднених показників погоди, що надаються різними метеослужбами. Для цього використовується метод створення нейромережових моделей, який використовує у т. ч. архівні дані про погодні умови.

5. Формування переліку основних інформаційних даних для подальшого їх використання при розробці математичних моделей та алгоритмів прогнозів обсягів генерації електричної енергії.

5.1. Загальні положення інформаційного забезпечення моделювання ВДЕ-генерації.

Як зазначалось у попередніх розділах цього звіту, основна інформація щодо визначення прогнозних обсягів генерації електричної енергії сонячними станціями включає відомості про технічні показники самої станції та її елементи, динаміку їх змін у часі; географічні показники розташування станції; відомості про потужність інсоляції у місці розташування станції та періодичні особливості і динаміку її зміни у залежності від астрономічних показників, які мають сезонний (циклічний) характер (тобто, ті показники, зміну яких можна передбачити у довгостроковій перспективі); стохастично змінні показники, які характеризують швидкоплинні погодні процеси, і впливають на характер та потужність інсоляції у межах коротких часових проміжків. Зміну погодних процесів контролюють з використанням трьох основних блоків спостереження:

- спостереження із космосу з використанням штучних супутників Землі, збираючи масиви інформації щодо зміни погодних показників у глобальному та регіональному масштабі;

- спостереження регіонального та місцевого рівня, яке проводять з використанням мережі наземних стаціонарних метеостанцій, об'єднаних у єдину систему спостережень;

- спостереження місцевого рівня, які проводять власне у точках розташування сонячних електростанцій, або максимально наближених до них.

Одним з основних показників, що активно впливає на формування оптичного «фільтру» у атмосфері між Сонцем та площиною сонячної панелі є хмарність. Вона характеризується щільністю і визначається показниками

бальності, вертикальною видимістю. За міжнародною класифікацією, яка прийнята у повітроплавстві хмарність вказується через скорочення:

«FEW» – декілька, незначна хмарність (1 - 2 октанти);

«SCT» – розсіяна хмарність (3 - 4 октанти);

«BKN» – розірвана, значна хмарність (5 - 7 октантів);

«OVC» – суцільна хмарність (8 октантів) [1].

Якщо спостерігаються кілька шарів хмар або окремі масиви хмар, кількість вказується в такій послідовності:

1) найнижчий шар або масив незалежно від кількості – FEW, SCT, BKN або OVC;

2) наступний шар або масив, що покриває понад $2/8$ небосхилу, – SCT, BKN або OVC;

3) наступний більш високий шар або масив, що покриває понад $4/8$ небосхилу, – BKN або OVC;

4) купчасто-дощові (CB) та/або потужні купчасті хмари значної вертикальної протяжності (TCU).

Форма хмар вказується тільки для CB і TCU. У випадку, коли окремий прошарок (масив) хмар складається із хмар CB і TCU із загальною нижньою межею, форма хмар вказується тільки як CB [1].

Опади. Їх розділяють на:

- дощ, мряка, сніг,
- імла, серпанок, туман,
- опади, що замерзають, туман, що замерзає;
- помірні чи сильні опади (включаючи зливи);
- низова хуртовина;
- пилова буря, піщана буря;
- гроза;
- воронкоподібна хмара (торнадо чи водяний смерч);
- вулканічний попіл.

Опади та хмарність впливають на інтенсивність інсоляції стохастично, причому її зміна може бути суттєвою на протязі короткого періоду часу. Для визначення моменту настання, протяжність у часі вказаних явищ необхідно аналізувати цілий комплекс метеорологічних умов:

- температуру повітря на різних висотах;
- швидкість та напрямок вітру;
- швидкість переміщення антициклонів і циклонів;
- швидкість розвитку та руйнування антициклонів і циклонів;
- баричне поле та його розподіл за висотою і площею та інші.

Як бачимо, основним фактором, що впливає на характер та потужність інсоляції у короткі періоди часу є змінність хмарності, тому найбільш важливою і важкою є задача прогностного визначення рівня надходження сонячної енергії в умовах реальної хмарності. Вплив хмарності на величину інсоляції спостерігається через ослаблення прямої радіації і зростання її розсіяної складової. Зменшення прямої радіації зі зростанням хмарності не компенсується збільшенням розсіяної сонячної радіації, тому сумарна сонячна інсоляція зменшується зі збільшенням хмарності. Звідси і така велика увага приділяється прогнозуванню хмарності. Збір даних щодо зміни хмарності метеорологічною службою проводиться щогодини, а у окремих випадках через кожні 15 хвилин. Дані формуються у бази даних, які вибудовуються у хронологічному порядку та розміщуються на спеціальних сайтах для користування при розробці погодніх прогнозів. На них метеорологічні дані розміщуються у вигляді HTML-таблиць. За результатами звернення до цих сайтів можна проводити моніторинг кліматичних умов, результати якого можна визначати як множину [2]:

$$X = \{t, O, T, p, P, v\}, \quad (5.1)$$

де t – час, за яким надаються кліматичні показники на сайті, (години);

O – опади, (мм);

T – температура, ($^{\circ}\text{C}$);

p – тиск, (мм рт.ст);

P – вологість повітря, (%);

V – швидкість повітря, (м/с).

Слід звернути увагу на те, що обсяги сонячного випромінювання, які потрапляють на фоточутливу поверхню панелей, в будь-який момент часу визначаються астрономічними, географічними і топографічними факторами і залежать від кута падіння променів на поверхню Землі, а він є змінним у часі. Тому одним з основних факторів, який впливає на результати прогнозу є також час.

При прогнозуванні обсягів сонячної генерації необхідно визначитися з прогнозом погоди, для чого можна скористатися глобальними та регіональними прогностичними моделями. Переваги глобальних моделей в тому, що вони охоплюють всю земну кулю. Регіональні моделі дають розрахунки та прогнози для певних територій. Числові розрахунки регіональних (локальних) моделей використовують вихідні дані глобальних моделей. Характеристика моделей наведена в розділі 4 цього звіту.

5.2. Точність прогнозування

Існують декілька підходів до прогнозування генерації електроенергії сонячними станціями, які можна розділити умовно на дві групи.

Перша група підходів базується на використанні фізичних даних про властивості фотополімерного шару у якому відбувається перетворення сонячного випромінювання у електричну енергію. Для використання цих методів прогнозування будуються фізичні моделі явищ, що відбуваються при попаданні сонячного випромінювання на робочі шари сонячних панелей.

Точність таких підходів обумовлена точністю самих фізичних моделей явищ, що відбуваються і точністю визначення параметрів моделювання, які

обумовлені технологічними особливостями виготовлення кожного окремого зразку сонячних панелей.

Основним джерелом помилок цього типу моделей є великий діапазон відхилення набору фізичних параметрів плівок сонячних панелей. Це обумовлено недосконалістю технологічних процесів виготовлення сучасних сонячних панелей масового виробництва та складністю фізичних моделей, що використовуються у процесі прогнозування.

Для використання такого підходу у прогнозуванні застосовують значення сонячної інсоляції, яке теж розраховується за допомогою прогнозу.

Друга група підходів щодо прогнозування генерації енергії базується на використанні ретроспективних даних роботи сонячних панелей. Перевага цього підходу полягає у тому, що він не вимагає для своєї роботи знання фізичних особливостей фото плівок, може бути застосованим до любого типу сонячних панелей. Однак цей підхід вимагає для свого застосування наявності великої кількості ретроспективних даних.

Точність такого підходу, однак, сильно залежить від чіткої періодичності набору даних, відсутності «провалів» у цьому наборі і, в ідеалі, вимагає чіткої періодичності зміни зовнішніх чинників, що спливають на генерацію. Така особливість обумовлює деяку універсальність у застосуванні (не залежить від конкретного типу панелей), але має не суттєву точність. За допомогою таких прогнозів можна виявляти тенденції щодо зростання або спадання генерації, але не кількісні показники.

У підході, що пропонується, поєднуються переваги кожного методу прогнозування обсягів генерації. Для того щоб модель прогнозування була універсальною можна використати нейронну мережу для прорахунку значень генерації на прогнозний період часу.

Точність прогнозу такого виду моделі буде залежати від обсягу ретроспективної вибірки даних, на якій буде проводитись навчання нейронної мережі та від точності прогнозу погоди або інсоляції (в залежності що буде використовуватись).

Отже, точність прогнозування генерації електричної енергії сонячними електростанціями істотно залежить від точності історичних даних про погоду в точці стоянній сонячної станції, від точності прогнозу погоди на проміжок часу прогнозування та від об'єму вибірки для навчання нейронної мережі.

За результатами проведеного аналізу вважається за доцільне основні інформаційні дані, які у подальшому будуть використовуватися при розробці математичних моделей та алгоритмів прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними станціями об'єднати у декілька груп [3]:

- дані, що стосуються технічних, географічних показників функціонування та розташування станції. Вони можуть використовуватися як константи, або можуть бути змінними за наперед визначеними у часі закономірностями;

- дані, що стосуються астрономічних та кліматичних змін. Вони є періодично змінними і динаміка їх змін у часі описується математичними залежностями;

- статистичні історичні дані щодо погодних умов у географічній точці розташування станції. Статистичні історичні дані щодо обсягів генерації електроенергії станцією, синхронізовані у часі з показниками погодних умов;

- поточні показники погодних умов.

У подальшому на основі зазначеної інформації мають бути сформовані бази даних для їх використання у математичних моделях та алгоритмах прогнозування обсягів генерації електроенергії сонячними станціями.

5.3. Нейронні мережі

В останні кілька років спостерігається підвищений інтерес до нейронних мереж, які успішно застосовуються в різних областях – бізнесі, медицині, техніці, геології, фізиці. Нейронні мережі увійшли до практики скрізь, де потрібно вирішувати завдання прогнозування, класифікації чи управління. Такий вражаючий успіх визначається кількома причинами. По перше, нейронні мережі виключно потужний метод моделювання, що дозволяє відтворювати

надзвичайно складні залежності. Зокрема, нейронні мережі нелінійні за своєю природою. Протягом багатьох років лінійне моделювання було основним методом моделювання в більшості областей, оскільки для нього добре розроблені процедури оптимізації. У завданнях, де лінійна апроксимація є незадовільною (а таких досить багато), лінійні моделі працюють погано. Крім того, нейронні мережі справляються з «прокляттям розмірності», яке не дозволяє моделювати лінійні залежності у разі великої кількості змінних. Також треба враховувати простоту у використанні. Нейронні мережі навчаються на прикладах. Користувач нейронної мережі підбирає представницькі дані, а потім запускає алгоритм навчання, який автоматично сприймає структуру даних. При цьому від користувача, звичайно, потрібен якийсь набір евристичних знань про те, як слід відбирати та готувати дані, вибирати потрібну архітектуру мережі та інтерпретувати результати, проте рівень знань, необхідний для успішного застосування нейронних мереж, набагато скромніший, ніж, наприклад, під час використання традиційних методів статистики. Найпростіша мережа має структуру прямої передачі сигнал. Сигнали проходять від входів через приховані елементи і зрештою приходять вихідні елементи. Така структура має стійку поведінку. При роботі мережі у вхідні елементи подаються значення вхідних змінних, потім послідовно відпрацьовують проміжні нейрони і вихідного шарів. Кожен їх обчислює своє значення активації, беручи виважену суму виходів елементів попереднього шару і віднімаючи з неї порогове значення. Потім значення активації перетворюються за допомогою функції активації і в результаті виходить вихід нейрона. Після того, як вся мережа відпрацює, вихідні значення елементів вихідного шару приймаються за вихід усієї мережі загалом.

Короткий аналіз можливостей нейронних мереж нашо́вхує на думку, що їх можливості можуть бути використані для створення інструменту, який зможе видавати прогнози дані з генерації енергії

Для розв'язання задачі планування також можуть використовуватися штучні нейронні мережі (ШНМ). Вони є класом узагальнених нелінійних

моделей, які є прототипом структур подібних структурам людському мозку. Їхньою головною перевагою є те, що вони можуть апроксимувати будь-яку нелінійну функцію з довільним ступенем точності, за допомогою відповідної кількості прихованих нейронів. ШНМ мають здатність до адаптації, створення асоціативних зв'язків і навчання. Для розв'язку задачі прогнозування з допомогою ШНМ, отримання інформації з масиву даних полягає у формулюванні математичного опису закономірностей між цими даними. Однак, неможливо з цих даних отримати інформацію про структуру математичної моделі, і тому в ШНМ їй необхідно ставити апріорі. У випадку ШНМ, дослідник описує цю структуру, шляхом вибору кількості шарів і нейронів у них, а також вибору виду активаційної функції. Це вимагає глибокого знання не тільки теорії ШНМ, але і глибоких знань про природу досліджуваного об'єкту. Крім того, виникає необхідність трансформувати об'єкт так, щоб до нього можна було застосувати методи ШНМ. Можна зазначити такі недоліки ШНМ:

- відсутність формалізованих алгоритмів налаштування мережі через високу складності самої процедури налаштування;
- значний час навчання ШНМ ;
- непрозорість формування результатів аналізу і їх формалізації у встановлені закономірності;
- висока складність внутрішньої структури мережі і відсутність чіткої формалізації апарату вибору структури ШНМ. Таким чином, успішність застосування ШНМ зумовлена особливостями реалізації процесів вибору структури мережі та її навчання для конкретного завдання.

5.4. Метод групового урахування аргументів

Для розв'язку задачі використовують також метод групового урахування аргументів (МГВА). В алгоритмах самоорганізації моделей складних систем застосовується поділ масиву вихідних даних на дві частини, які називаються

навчальною і перевіркою послідовністю, причому середньоквадратична помилка, яка визначається з перевіркою послідовності, служить критерієм для вибору структури моделі, яка синтезується за даними навчальної послідовності. У результаті, виникає необхідність оптимального розподілу даних на навчальну і перевірку послідовність, що призводить до виділення і формування третьої частини масиву даних – екзаменаційної послідовності. Таким чином, помилка, яка визначається за екзаменаційними даними, буде служити критерієм оцінки перевіркою послідовності. У результаті, критерії вибору моделей діляться на внутрішні і зовнішні. Критерій вважається внутрішнім, якщо його визначення базується на використанні тих самих даних, що і сама синтезована модель. Зовнішніми вважаються ті критерії, які будуються на нових даних не використаних при синтезі моделі. Таким чином, структура синтезованої моделі з оптимальною складністю буде відповідати мінімуму зовнішнього критерію. Перебираючи моделі від найпростішої до більш складних (або навпаки, від складних до більш простих), завжди знаходиться модель оптимальної складності, єдиної для кожного зовнішнього критерію. Для успішності вирішення завдання моделювання, важливо вибрати зовнішній критерій відповідно до типу розв'язуваної задачі моделювання.

У МГВА, застосовуються дві основні структури генерації моделей (часткових описів), які оцінюються за умовою селекції: – комбінаторні алгоритми МГВА з обнуленням коефіцієнтів; – багаторядні порогові алгоритми МГВА. У комбінаторних алгоритмах задається деякий повний опис – модель у вигляді полінома високого ступеня. Часткові описи утворюються з повного за допомогою прирівнювання до нуля (обнулення) тих чи інших коефіцієнтів повного опису. Решта коефіцієнтів оцінюються з використанням всіх точок таблиці вихідних даних за методом найменших квадратів. Вибір кращої структури моделі виконується за одним із зовнішніх критеріїв – критерію селекції (наприклад, за критерієм регулярності або мінімуму зсуву). З множини часткових описів вибирається єдиний поліном – модель оптимальної складності. Комбінаторні непорогові алгоритми рекомендуються при $n \gg N$

застосовуються багаторядні селекційні порогові алгоритми МГВА. Деякі з багаторядних алгоритмів МГВА можуть вирішувати задачі моделювання при кількості вхідних змінних близько 1000. Можна відзначити такі недоліки:

- масштабованість одержуваної моделі внаслідок можливої зміни або уточнення вхідних даних;
- високі вимоги до повноти і несуперечності вхідних даних.

Проведений аналіз показує, що усім методам моделювання, які на сьогодні можуть бути використані для розв'язку задачі вибору і побудови моделі прогнозування електроспоживання, притаманні певні недоліки, що обмежують їх застосування. Зокрема, моделі, побудовані на методі МГВА, мають тенденцію сходитися до локального мінімуму, структури ШНМ необхідно формувати попередньо, класичний регресійний аналіз не враховує змінну часу, точність синтезованих моделей для МГВА залежить від обсягів вхідних початкових даних.

У результаті підтверджується теза про неможливість побудови універсальної оптимальної моделі, позбавленої всіх недоліків розглянутих методів моделювання. На сьогодні, перевагу віддають ШНМ та МГВА, який дозволяє отримувати формалізовану модель із даних з урахуванням змінної часу, і таким чином дозволяє створювати, як короткострокові, так і довгострокові прогнози.

6. Обґрунтування структурно-логічної схеми і основних етапів створення системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями, розроблення технічного завдання.

6.1. Загальні положення.

Розглянуті системи та моделі прогнозування генерації електричної енергії сонячними електростанціями використовують великі масиви інформації, основним з яких є інформація про погодні умови у місці розташування станції. Зазначена інформація розглядається як поточна, прогнозна та ретроспективна. Поєднання цих інформаційних масивів за певних умов при вирішенні задачі короткотермінового прогнозування погоди дає один з найкращих результатів.

Зважаючи на величезні обсяги інформації, використання числових моделей та підвищення точності її прогнозування потребує великої потужності комп'ютерних систем. Вирішення цієї проблеми наразі пропонується з застосуванням методів штучного інтелекту, елементом якого можуть бути нейронні мережі. Їх використання дозволяє визначати складні нелінійні закономірності погодних процесів, що і є основою отримання результатів прогнозування.

Виходячи з цих міркувань, модель (комплекс) прогнозування погодних явищ може являти собою комплекс програмних заходів, який дає можливість обчислювати метеорологічні поля у необхідні (визначені) проміжки і моменти часу з використанням результатів розрахунку систем рівнянь, що описують гідродинамічні процеси атмосфери.

Спрощення вирішення цієї задачі можливе з застосуванням нейромереж, які використовують інформаційні масиви щодо історичних даних про погоду, поточну погодні інформацію, не використовуючи складний математичний апарат для врахування взаємодії складних фізичних процесів. Такий підхід, вже

апріорі, дає можливість зменшувати ймовірність помилок та похибку прогнозування.

Застосування штучного інтелекту дозволяє впровадити елементи машинного навчання систем прогнозування, використовуючи інформаційні масиви багаторічних синоптичних спостережень, що також покращує точність прогнозів. Для прикладу слід зазначити, що Європейський метеорологічний центр (ECMWF) пропонує новий інформаційний ресурс Weather Bench, який надає інформаційну послугу щодо машинного навчання нейромереж з використанням 40-річного архіву метеоданих.

З огляду на ці обставини, авторський колектив вважає доцільним і прийнятним у системі короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями застосувати визначення впливу погодних факторів використанням елементів штучного інтелекту.

Іншим комплексом (модулем) впливових факторів є показники генерації обсягів електроенергії електростанцією за певних погодних умов. Тут також мають використовуватися ретроспективні дані.

Слід зауважити, що використання інформаційних ретроспективних даних щодо обсягів генерації і погодних даних має розглядатися у одному часовому масштабі, як пов'язані між собою явища.

Процес функціонування сонячної електростанції є складним і може залежати від суто організаційних факторів взаємодії її з мережею споживання електричної енергії. Команди диспетчерської служби енергосистеми також можуть впливати на обсяги як генерації, так і її обмежень. Тобто, можливі ситуації, коли за командою диспетчерських служб треба знизити потужність генерації шляхом відключення деяких стрінгів, або повного зупинення постачання до мережі.

З точки зору функціонування та перенавчання нейронної мережі ці ситуації не є не бажаними, бо вони впливають на результати перенавчання. У цьому випадку система може «визнати» зменшення генерації як подію, пов'язану з погодними факторами, а це може внести певну похибку у подальші прогнози.

Вирішення цієї проблеми і є подальшою задачею для колективу авторів проєкту.

За результатами проведених досліджень, ґрунтуючись на власних наукових висновках та інформації, яка опрацьована у літературних джерелах пропонується програмно-розрахунковий комплекс для короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації сонячної електроенергії на основі ретроспективних даних генерації в минулому та з урахуванням зміни інших впливових факторів, яка має складатись з наступних підсистем:

- підсистеми зберігання даних;
- підсистеми накопичування ретроспективних та поточних даних;
- підсистеми «навчання та перенавчання» розрахункового модулю (на базі нейромережі);
- підсистеми розрахунку прогнозу генерації (прогнозний модуль);
- підсистеми розрахунку точності прогнозу генерації;
- підсистеми корекції розрахункового модуля (перенавчання нейромережі);
- підсистеми візуалізації результатів прогнозування.

6.2. Пропонована структурно-логічна схема системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями.

Структурно-логічна схема системи зображена на рис. 6.1. Вона включає декілька модулів:

1. Модуль навчання. Цей модуль концентрує та «переробляє» інформаційні потоки щодо історичних (ретроспективних) даних про погоду у місці розташування сонячної станції, історичних (ретроспективних) даних про обсяги генерації електроенергії. Одночасно він виконує роль коректора при періодичному виконанні функції перенавчання нейромережі за командою модуля аналізу помилок, відхилень, похибок.

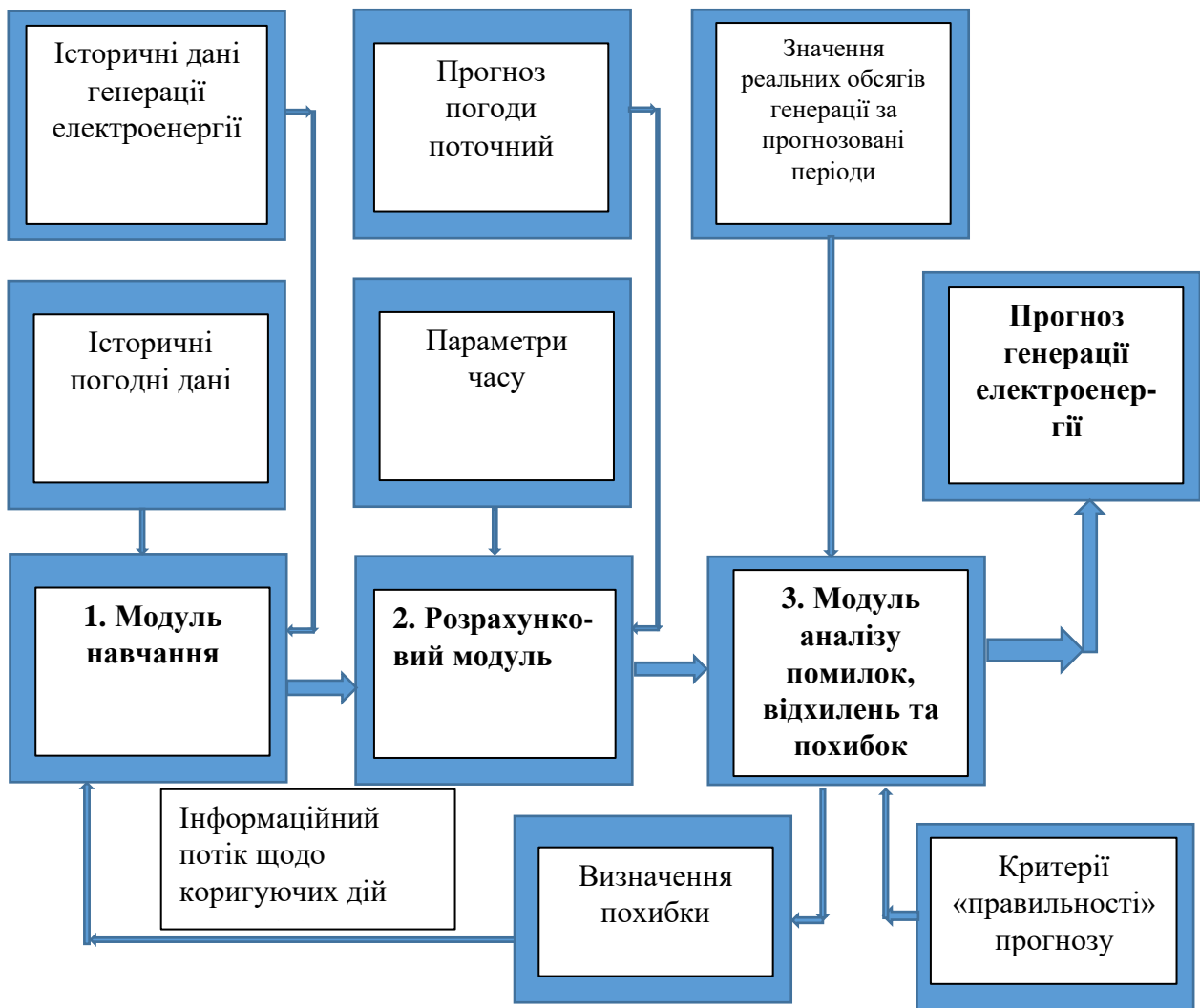


Рис. 6.1. Структурно-логічна схема системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями.

2. Розрахунковий модуль. Отримує інформаційні потоки від модуля навчання щодо ретроспективних показників, показники поточного прогнозу погоди у реальному часі. Формує прогнозні показники обсягів генерації електроенергії на визначений період і відправляє його користувачам через модуль аналізу помилок, відхилень та похибок.

3. Модуль аналізу помилок, відхилень та похибок. Використовуючи інформаційний потік бази накопичення значень реальних обсягів генерації за прогнозовані періоди, критерії «правильності» прогнозу, визначається величина похибки, формується інформаційний потік щодо коригуючих дій

«самонавчання» нейромережі. Зворотнім зв'язком він надходить до модуля навчання.

Основними функціями, які має забезпечувати (виконувати) комплекс мають бути:

- збір первинної інформації та моніторинг генерації на об'єкті;
- прогнозування та розрахунок обсягів генерації електроенергії на об'єкті;
- оцінка точності прогнозу генерації;
- візуалізація результатів;
- можливість комунікації з іншими інформаційними системами.

Збір вхідної інформації повинен виконуватись з різних джерел, серед яких:

- вхідні дані щодо поточної фактичної генерації, які повинні надходити від відповідних пристроїв збору первинної інформації електростанції і зберігатися у базі даних;

- прогнозні значення факторів, що впливають на обсяги генерації, які повинні надходити в автоматичному режимі від відповідних сервісів;

- ретроспективні дані щодо генерації, які повинні накопичуватись в автоматичному режимі самим комплексом, або надходити з відповідної бази даних електростанції;

- ретроспективні дані щодо значення впливових зовнішніх факторів, які повинні бути отримані з відповідних мережевих сервісів.

Система має виконувати розрахунки щодо отримання короткострокового прогнозу електроенергії, в якому передбачається погодинна деталізація впродовж терміну прогнозу.

Система, сервери системи мають функціонувати цілодобово для забезпечення збору вхідної інформації та надання вихідної інформації для потреб клієнтів, тому вони повинні мати відповідну надійність. Надійність створеної системи має забезпечуватися:

- вибором надійного, сертифікованого програмного забезпечення;
- вибором надійної системи управління базами даних.

Основні технічні засоби, на базі яких має бути створена система, повинні мати технічні характеристики, не нижче, ніж:

- процесор Intel S-1156 Core i5 650 BOX 3,2GHz/4Mb;
- тип роз'єму [Socket 1156](#);
- чипсет (Північний міст) Intel H55;
- накопичувач на жорсткому диску SSD SATA III TLC 480GB;
- оперативний запам'ятовуючий пристрій DDR3 4Gb 1333MHz;
- монітор TFT 22" LG W2286L-PF 2ms, 1680x1050, LED;
- маніпулятор «миша» Genius Traveler 305 Laser 1600dpi USB;
- Клавіатура Genius KB-110 Black USB.

Технічні засоби користувачів повинні дозволяти взаємодію з системою у дистанційному режимі та мати достатні технічні параметри для «спілкування» з вищеназваними засобами системи. Для інформаційної та програмної сумісності пропонується використовувати програмне забезпечення:

- операційна система- Windows 10 Professional;
- середовище розробки-«Delphi 11 Enterprise» виробник – Embarcadero-Technologies (Канада).

За результатами виконаних робіт щодо розробки системи необхідним є створення комплекту документації, яку мають використовувати у своїй діяльності користувачі і персонал підтримки – Інструкцію користувача.

6.3 Висновки

За результатами аналізу літературних джерел, проведених наукових досліджень запропоновано структурно-логічну схему створення системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями яка базується на засобах та засадах штучного інтелекту з використанням нейромереж. Побудова системи за такою схемою дозволяє поетапне планування та реалізацію проекту через формування блоків баз даних фактичних обсягів генерації електроенергії електростанціями, блоку

поточних та ретроспективних погодних даних у місці розташування електростанції, розрахункового модуля, що об'єднує та використовує зазначені інформаційні масиви при генеруванні прогнозних показників обсягів генерації електричної енергії.

Застосування штучного інтелекту дозволяє впровадити елементи машинного навчання систем прогнозування, використовуючи інформаційні масиви багаторічних синоптичних спостережень, що також покращує точність прогнозів.

Такий підхід передбачає зменшення капітальних видатків на обладнання при впровадженні системи, бо не передбачає застосування комп'ютерної техніки великої потужності.

7. Проект Технічного завдання на програмно-розрахунковий комплекс точного прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на розробку
програмно-розрахункового комплексу точного прогнозування генерації
електроенергії сонячними електростанціями

ВСТУП

Матеріали, що наведені у даному документі, призначені для підтримки системи прогнозування генерації електричної енергії сонячними електростанціями у конкретному регіоні і формування балансів споживання та генерації електричної енергії у регіональних рамках та на загальнодержавному рівні.

1. ПІДСТАВИ ДЛЯ РОЗРОБКИ

Постанова Кабінету Міністрів України від 20 листопада 2019 р. № 971 (зі змінами).

Наказ Міністерства освіти і науки України від 22.12.2022 № 1159 “Про затвердження остаточних пропозицій щодо переліку наукових робіт, науково-технічних та інфраструктурних проектів, рекомендованих для фінансування” (зі змінами).

Договір № РН/05-2023 від 19.05.2023 з Міністерством освіти і науки України.

2. ПРИЗНАЧЕННЯ РОЗРОБКИ

Система, що розробляється призначена для використання на сонячних електростанціях посадовими особами, що здійснюють управління об'єктом у частині визначення показників обсягу прогнозованої електричної генерації.

3. ВИМОГИ ДО ПРОГРАМНОГО ВИРОБУ

3.1 ВИМОГИ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Програмно-розрахунковий комплекс для короткострокового

прогнозування та планування обсягів генерації сонячної електроенергії на основі ретроспективних даних генерації в минулому та з урахуванням зміни інших впливових факторів повинен складатись з наступних підсистем:

- підсистеми зберігання даних;
- підсистеми накопичування ретроспективних та поточних даних;
- підсистеми «навчання та перенавчання» розрахункового модулю (на базі нейромережі);
- підсистеми розрахунку прогнозу генерації (прогнозний модуль);
- підсистеми розрахунку точності прогнозу генерації;
- підсистеми корекції розрахункового модуля (перенавчання нейромережі)
- підсистеми візуалізації результатів прогнозування.

Створений комплекс повинен забезпечувати: збір первинної інформації та моніторинг генерації на об'єкті; прогнозування та розрахунок обсягів генерації електроенергії на об'єкті; оцінку точності прогнозу генерації; візуалізація результатів; можливості комунікації з іншими інформаційними системами.

Збір вхідної інформації повинен виконуватись з різних джерел, серед них:

вхідні дані щодо поточної фактичної генерації повинні надходити від відповідних пристроїв збору первинної інформації електростанції і зберігатися у базі даних;

прогнозні значення факторів, що впливають на обсяги генерації повинні надходити в автоматичному режимі від відповідних сервісів;

ретроспективні дані щодо генерації повинні накопичуватись в автоматичному режимі самим комплексом, або надходити з відповідної бази даних електростанції;

ретроспективні дані щодо значення впливових зовнішніх факторів повинні бути отримані з відповідних мережесервісів.

Система повинна здійснювати розрахунки щодо отримання короткострокового прогнозу електроенергії, в якому передбачається погодинна деталізація впродовж терміну прогнозу.

3.2 ВИМОГИ ДО НАДІЙНОСТІ

Надійність створюваної системи повинна бути забезпечена:

- вибором надійного, сертифікованого програмного забезпечення;
- вибором надійної системи управління базами даних.

3.3 УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Вимоги не пред'являються.

3.4 ВИМОГИ ДО СКЛАДУ Й ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Програмно-розрахунковий комплекс для короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації сонячної електроенергії на основі ретроспективних даних генерації в минулому та з урахуванням зміни інших впливових факторів повинна функціонувати на технічних засобах, характеристики яких не гірші ніж зазначені:

Процесор Intel S-1156 Core i5 650 BOX 3,2GHz/4Mb;

Тип роз'єму Socket 1156

Чипсет (Північний міст) Intel H55;

Накопичувач на жорсткому диску SSD SATA III TLC 480GB;

Оперативний запам'ятовуючий пристрій DDR3 4Gb 1333MHz;

Монітор TFT 22" LG W2286L-PF 2ms, 1680x1050, LED;

Маніпулятор «миша» Genius Traveler 305 Laser 1600dpi USB;

Клавіатура Genius KB-110 Black USB.

3.5 ВИМОГИ ДО ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ СУМІСНОСТІ

Середовище розробки програмних модулів і програмне забезпечення, яке використовується, надані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимоги до середовища розробки і операційної системи

Найменування	Версія
Операційна система	Windows 10 Professional
Середовище розробки	«Delphi 11 Enterprise» виробник – Embarcadero Technologies (Канада)

3.6 ВИМОГИ ДО МАРКУВАННЯ Й ПАКУВАННЯ

Вимоги не пред'являються.

3.7 ВИМОГИ ДО ТРАНСПОРТУВАННЯ Й ЗБЕРІГАННЯ

Вимоги не пред'являються.

3.8 ОСОБЛИВІ ВИМОГИ

Вимоги не пред'являються.

4. ВИМОГИ ДО ПРОГРАМНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Згідно даного Технічного завдання повинна бути розроблена «Інструкція

користувача», як програмний документ.

Комплект поставки програмного забезпечення повинен включати:

– вихідний код розроблених програм на оптичному носії;

– програмний засіб для встановлення, оновлення чи відновлення програмного забезпечення на електронно-обчислювальній машині.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Вимоги не пред'являються.

6. СТАДІЇ ТА ЕТАПИ РОЗРОБКИ

Робота повинна виконуватися в три етапи, які наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Етапи виконання робіт

№ етапу	Найменування робіт	Термін виконання	Звітні матеріали
1	Розробка універсальних математичних моделей та алгоритмів генерації електроенергії та короткострокового прогнозування обсягів генерації сонячною електростанцією.	08.2023-12.2023	Звіт, який містить: - універсальні математичні моделі генерації електроенергії та короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації сонячною електростанцією; - програмні алгоритми математичних моделей генерації електроенергії сонячною електростанцією; - програмні алгоритми математичної моделі короткострокового прогнозування та планування

№ етапу	Найменування робіт	Термін виконання	Звітні матеріали
			обсягів генерації електроенергії.
2	Розробка, налагодження та випробування базової версії програмно-розрахункового комплексу короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації.	01.2024–06.2024	<p>Базовий програмний код для короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації електроенергії сонячною електростанцією.</p> <p>Програма та методика випробувань програмно-розрахункового комплексу.</p> <p>Акти про виготовлення та попередні випробування базової версії програмно-розрахункового комплексу.</p>
3	<p>Доопрацювання програмно-розрахункового комплексу короткострокового прогнозування та планування обсягів генерації за результатами випробувань.</p> <p>Розробка Програмної документації на програмний продукт.</p>	07.2024–12.2024	<p>Програмний продукт та код на цифровому носії інформації.</p> <p>Програмний засіб для його встановлення, оновлення чи відновлення на ПЕОМ.</p> <p>Інструкція з його використання та технічної підтримки («Інструкція користувача»).</p> <p>Акт про виготовлення дослідного зразка програмного забезпечення, акт про проведення випробувань, акти про введення у дослідну експлуатацію програмно-розрахункового комплексу.</p>

7. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ТА ПРИЙОМКИ

Випробування провести згідно «Програми та методики випробувань програмно-розрахункового комплексу». Для проведення випробувань має бути використано дані по реальним об'єктам, відомості про які мають бути взяті з окремих об'єктів електроенергетики, що використовують енергію сонячного випромінювання для генерації електроенергії.

ВИСНОВКИ

За результатами виконаних робіт за етапом:

1. Проаналізовано чинну законодавчу та нормативну базу України і країн Європейського союзу щодо функціонування ринку електроенергії;
2. Проаналізовано та визначено ринкові позиції та можливості підприємств і приватних домогосподарств України, що використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), на ринку електроенергії;
3. Виконано аналіз чинних факторів, які впливають на обсяги та добові графіки генерації електроенергії сонячними електростанціями, визначено основні. Проведено аналіз впливу погодних (метеорологічних) факторів;
4. Проаналізовано існуючі системи, методи та засоби прогнозування зміни погодних умов у місцях розташування сонячних електростанцій, визначено їх переваги та недоліки;
5. Сформовано перелік основних інформаційних даних для подальшого їх використання при розробці універсальних математичних моделей та алгоритмів генерації електричної енергії;
6. Виконано обґрунтування структурно-логічної схеми і основних етапів створення системи короткострокового прогнозування обсягів генерації електричної енергії сонячними електростанціями.
7. Розроблено технічне завдання на програмно-розрахунковий комплекс точного прогнозування генерації електроенергії сонячними електростанціями

ДОДАТОК А

Таблиця А.1

Аналіз моделей прогнозування погодних умов

№	Модель	Сутність	Можливості використання
1	Physical Methods	Фізичний метод базується на формалізованих даних спостереження за допомогою супутника або Total Sky Imager (TSI) про температура, тиск, вологість атмосфери і хмарність. Модель TSI-880 TSI — це автоматична кольорова система зображення неба, яка забезпечує відображення денного неба в реальному часі.	
1.1	Cloud Imagery and Satellite Based Models	Модель на основі супутникових і хмарних зображень є фізичною. Супутникові знімки дають високу просторову роздільну здатність і мають потенціал для прогнозування руху хмар.	Високовитратна
1.2	Physical Satellite Models	Базується на дослідженні взаємодії між компонентами атмосфери, такими як гази та аерозолі і сонячна радіація. Модель є вдосконаленням моделі «чистого неба» на основі RTM.	Високовитратна
1.3	Marullo-Dalu-Viola Model	Модель базується на даних METEOSAT. Ця модель схожа на модель GDM, де ясне небо і хмарне небо розглядаються окремо.	Високовитратна
1.4	Moser-Raschke Model	Модель використовує зображення METEOSAT для оцінки рівня освітленості землі. Вхідні параметри включають зенітний кут сонця, висоту верхнього шару хмар, оптичну глибину хмар, структуру прикордонного шару, кліматологічні профілі: температуру, тиск, вологість, концентрацію озону та розподіл хмарних крапель за розміром.	Пріоритетне використання
1.5	Dedieu-Deschamps-Kerr Model	Модель відрізняється від моделей GDM і MDV тим, що моделі ясного неба та хмарного неба розглядалися окремо.	Додаткові дані

1.6	Statistical Satellite Models	Моделі визначаються на основі регресії між параметрами сонячного випромінювання на поверхні землі (інструментальні спостереження) і даними супутникових спостережень. Параметри контролю включають сонячний зенітний кут, індекс хмарного покриву, коефіцієнт пропускання атмосфери разом із поточною яскравістю, мінімальна яскравість і максимальна яскравість кожного пікселя.	Пріоритетне використання
1.7	Hay-Hanson model	Одна з найпростіших статистичних супутникових моделей. Була розроблена для «Програми глобальних атмосферних досліджень». Модель НН заснована на лінійній регресії індексу ясності та поглинаючої здатності атмосфери.	Використання при доступі до інформації
1.8	Tarpley & Justus-Paris-Tarpley Models	Використовуються статистичні регресії інструментальних спостережень і супутникових даних з розрахунком індексу хмарності.	Високовитратна
1.9	Cano-HELIOSAT Model	Модель Cano-HELIOSAT базується на лінійній залежності між індексом ясності та індексом хмарності однієї точки в часі та просторі.	В якості методичної бази
1.10	Perez Operational Model	Однією з найбільш широко використовуваних статистичних супутникових моделей є операційна модель Переса. Модель Переса використовує модифіковану версія моделі чистого неба Кастена, яка визначає коефіцієнт каламутності, незалежний від маси повітря. Модель також дозволяє модифікувати алгоритм на основі вимірювання в режимі реального часу снігового або льодового покриву.	Високовитратна
1.11	Total Sky Imagers	Базується на обробці супутникових хмарних знімків для того, щоб охарактеризувати хмари та виявити їх мінливість, з метою формування прогнозу на 6 годин вперед. Будова хмар і їх розташування допомагає прогнозувати сонячне випромінювання.	Високовитратна

1.12	Wireless Sensor Network Systems	Фотоелектричний масив потужністю 1 МВт був оснащений 40 вузлами TelosB, обладнаними датчиками сонячного опромінення. Це дозволило в режимі реального часу вести спостереження та формувати статистичну базу даних для подальшого прогнозування.	Відсутня технічна реалізація на СЕС України
1.13	Numerical Weather Prediction Models	Модель базується на законах фізики атмосфери. Принцип полягає у аналізі поточного стану погоди та моделюванні, на цій основі, параметрів температури, вітру, освітленості та інших.	В якості методичної бази
1.14	Global Forecast System (GFS)	Однією з найвідоміших глобальних моделей NWP є Глобальна система прогнозів (GFS). Модель GFS підпорядковується Національному управлінню океанічних і атмосферних досліджень США і через кожні шість годин створює прогнози до 384 годин (16 днів) по сітці 28 км x 28 км для всього світу.	Пріоритетне використання. Інформація у відкритих джерелах.
1.15	The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	ECMWF надає прогноз погоди до 15 днів, включаючи опромінення сонячної поверхні та різну хмарність. Прогнози ECMWF показали їх високу якість для прогнозування вітрової та сонячної генерації.	Пріоритетне використання
1.16	Regional NWP Model	На відміну від глобальних моделей, регіональні моделі NWP є лише піддоменом глобальних моделей прогнозування зміни погодних умов. До цього класу моделей, зокрема, відносяться: Rapid Update Cycle (RUC)/RAPid refresh (RAP) Models; North American Mesoscale (NAM) Model; High Resolution Rapid Refresh (HRRR) Model; Weather Research and Forecasting (WRF) Model.	Можуть бути використані для обґрунтування регіональних моделей для умов України
2	Statistical Methods	Методи прогнозування на основі історичних даних сонячного опромінення поділяють на дві категорії: статистичні та методи навчання. Прикладами є регресії та експоненціальне згладжування, статистичні методи, нечіткі системи висновку, генетичний алгоритм, нейронні мережі, машинне навчання тощо.	

2.1	Time Series Models	Моделі часових рядів дають результат на основі історичних даних. Часовий ряд можна визначити як послідовність спостереження, виміряні в часі, наприклад, щогодини, щодня або щотижня.	Пріоритетне використання
2.2	Linear Stationary Models	В моделі стохастична частина - набір даних про сонячне випромінювання часто оформляється як стаціонарний процес.	Не передбачається
2.3	Auto-Regressive (AR) Models	Авторегресивні моделі отримали свою назву від факту, що поточне значення процесу можна виразити як кінцеву, лінійну комбінацію попередніх значень процесу.	Пріоритетне використання
2.4	Moving Average (MA) Models	Модель базується на методі ковзного середнього (MA).	Пріоритетне використання
2.5	Mixed Auto-Regressive Moving Average (ARMA) Models	Це математична модель, яка використовується для аналізу і прогнозування стаціонарних рядів в статистичних даних. ARMA об'єднує в собі прості моделі часових рядів: авторегресії (AR) і ковзне середнє (MA).	Пріоритетне використання
2.6	Mixed Auto-Regressive Moving Average Models with Exogenous Variables (ARMAX)	Модель ARMAX забезпечує покращення точності моделі ARMA шляхом включення зовнішньої інформації щодо часових рядів. Наприклад, у випадку сонячного прогнозу, похибка моделі прогнозування може бути зменшена шляхом включення інформації про еволюцію місцевої температури, відносну вологість, хмарність, швидкість вітру, напрям вітру, тощо.	Пріоритетне використання
2.7	Non-Linear Stationary Models	Нелінійні моделі дозволять точно описати складні нелінійні процеси, такі як: хаос, гістерезис і ефекти насичення або комбінацію кількох нелінійних проблем.	В якості методичної бази
2.8	Linear Non-Stationary Models	Модель базується на концепції, у відповідності до якої при аналізі нестаціонарних часових рядів час має відігравати фундаментальну роль,	В якості методичної бази

		наприклад, незалежної змінної в прогресії функції, або як нормалізований фактор при аналізі в еволюція явища з початкового стану.	
2.9	Auto-Regressive Integrated Moving Average Models (ARIMA)	Моделі ARIMA застосовуються в деяких випадках, коли дані свідчать про нестационарність, де початковий етап диференціювання (що відповідає «інтегрований» частині моделі) може застосовуватися один або кілька разів для усунення нестационарності.	Пріоритетне використання
2.10	Artificial Neural Networks	Штучна нейронна мережа є піддоменом штучного інтелекту. Існує багато архітектур ANN. Проте модель, як правило, застосовується для виконання двох типів завдань, а саме регресію та шаблон визнання. Обидва вони застосовуються для сонячного прогнозування опромінення.	Передбачається використати як основний принцип побудови моделі для умов України
3	Hybrid Methods	Гібридні моделі – це комбінація двох або більше прогнозів методи, щоб підвищити точність прогнозу. Тому їх також називають комбінованими моделями.	В якості методичної бази

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Розділ 1

1. [Закон України «Про ринок електричної енергії»](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19). Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
2. Закон України «Про альтернативні джерела енергії». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>.
3. [Договір про заснування Енергетичного Співтовариства](#). [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_926.
4. Директива Європейського парламенту й Ради Європи 2003/54/ЄС від 26 червня 2003 року. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_571.
5. Директива Європейського парламенту й Ради Європи 2003/55/ЄС від 26 червня 2003 року стосовно спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії, яка скасовує Директиву 96/92/ЄС. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_380#Text
6. Directive 2003/55/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 98/30/EC. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32003L0055>.
7. Regulation (EC) No 1228/2003 of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity (Text with EEA relevance). Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32003R1228>.
8. Директива 2001/77/ЄС Європейського Парламенту та Ради «Про створення сприятливих умов продажу електроенергії, виробленої з відновлюваних енергоджерел, на внутрішньому ринку електричної енергії» від 27 вересня 2001 року. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_503#Text

9. Директива Європейського парламенту й Ради Європи 2003/30/ЄС від 8 травня 2003 року Режим доступу: https://sae.gov.ua/documents/dyrektyva_2003_30_ES.pdf.

10. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011.

11. DIRECTIVES DIRECTIVE 2009/72/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC (Text with EEA relevance). Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0072&from=en>.

12. Директива 2003/54/ЄС від 26 червня 2003 року Європейського Парламенту та Ради Європейського Союзу стосовно спільних правил для внутрішнього ринку електроенергії, яка скасовує Директиву 96/92/ЄС Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_571#Text.

13. REGULATION (EC) № 714/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 July 2009 on conditions for access to the network for cross-border exchanges in electricity and repealing Regulation (EC) № 1228/2003 (Text with EEA relevance) Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009R0714&from=EN>.

14. DIRECTIVE 2005/89/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 January 2006 concerning measures to safeguard security of electricity supply and infrastructure investment (Text with EEA relevance). Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0089&from=EN>.

15. DIRECTIVE 2005/89/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 January 2006 concerning measures to safeguard security of electricity supply and infrastructure investment (Text with EEA relevance). Режим

доступу: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0089&from=EN>.

16. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast) (Text with EEA relevance.) Режим доступу: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>.

17. COMMISSION REGULATION (EU) 1222/2015 of 24 July 2015 establishing a guideline on capacity allocation and congestion management. Режим доступу: https://www.entsoe.eu/network_codes/cacm/

18. «Укренерго» сертифікований як оператор системи передачі європейського зразка за моделлю ISO. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/node/4362>.

19. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Порядку здійснення сертифікації оператора системи передачі електричної енергії № 1016 від 10.08.2017 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1016874-17>

Розділ 2

1. Зелено-вугільний парадокс / Вікіпедія. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Зелено-вугільний_парадокс.

2. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди» №868-р від 30.07.2021 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/868-2021-p#Text>.

3. Iryna Doronina, Vadym Hetman, Svitlana Moskalenko Green-Coal Paradox in Ukraine and in the World as a Challenge for State Regulation in the Energy Industry // EUROPEAN JOURNAL OF ECONOMICS AND MANAGEMENT, 2020, Volume 6, Issue 6, pp. 44-51. DOI: 10.46340/eujem.2020.6.6.4. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/347991070_GREEN-COAL_PARADOX_IN_UKRAINE_AND_IN_THE_WORLD_AS_A_CHALLENGE_FOR_STATE_REGULATION_IN_THE_ENERGY_INDUSTRY.

4. Gilbert Kollenbach, Mark Schopf Unilaterally optimal climate policy and the green paradox // [Journal of Environmental Economics and Management](#), 2022. Volume 113, 102649. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102649>. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0095069622000304>.
5. Теплоенергетика: зовнішні витрати і проблеми прийняття рішень / Під заг. ред. О.Ф. Балацького, О.М. Теліженка. – Суми: Видавництво «Слобожанщина», 2001. – 396 с.
6. Методи оцінки екологічних втрат: Монографія /За ред. д.е.н. Л.Г. Мельника та к.е.н. О.І. Карінцевої. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2004. – 288 с.
7. Frederick Van der Ploeg, Cees A. Withagen. [Is There Really a Green Paradox?](#) / [CESifo Working Paper. Series](#) 2963, 2010, CESifo. https://ideas.repec.org/p/ces/ceswps/_2963.html .
8. [Daniel Nachtigall](#), [Dirk Rübhelke](#) The green paradox and learning-by-doing in the renewable energy sector // [Resource and Energy Economics](#), 2016, 43(3), pp. 74-92. DOI:[10.1016/j.reseneeco.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2015.11.003). Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/287792170_The_green_paradox_and_learning-by-doing_in_the_renewable_energy_sector.
9. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» від 1.10.2014 р. № 902-р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-p#Text>.
10. Проєкт Національного плану дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року (НПД ВЕ 2030). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://saee.gov.ua/uk/pressroom/4091>.
11. Домогосподарства наростили потужність приватних СЕС у 2022 році на 78%. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/domohospodarstva-narostyly-potuzhnist-pryvatnykh-ses-u-2022-rotsi-na-78>.

12. Наказ Міністерства енергетики України «Про розрахунки з виробниками за «зеленим» тарифом» № 206 від 15.06.2022 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0692-22#Text>.

13. Постанова НКРЕКП «Про встановлення «зелених» тарифів на електричну енергію та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва для суб'єктів господарювання» №1235 від 30.09.2022 р. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-zelenih-tarifiv-na-elektrichnu-energiyu-ta-nadbavki-do-zelenih-tarifiv-za-dotrimannya-rivnya-vikoristannya-obladnannya-ukrayinskogo-virobnictva-dlya-subyektiv-gospodaryuva-2>.

14. Постанова НКРЕКП Про встановлення тарифу на послуги з передачі електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО» № 1788 від 21.12.2022 р. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-tarifu-na-poslugi-z-peredachi-elektrichnoyi-energiyi-nek-ukrenergo>.

15. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Змін до постанови НКРЕКП від 26 квітня 2019 року № 641» № 46 від 15.01.2021 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0046874-21#Text>.

16. [Омельченко В.](#) Заборгованість в секторі ВДЕ: шляхи виходу із кризи неплатежів / Центр Разумкова. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://razumkov.energy/meny/research/res-mission-possible/>.

17. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Змін до постанови НКРЕКП від 26 квітня 2019 року № 641» № 758 від 25.04.2023 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0758874-23#Text>.

18. Закон України «Про [ринок електричної енергії](#)». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.

19. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Правил ринку» № 307 від 14.03.2018 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18>

20. Закон України «Про внесення змін до розділу ХХ «Перехідні положення» Податкового кодексу України щодо забезпечення стабільного функціонування ринку природного газу протягом дії воєнного стану та

подальшого відновлення». Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2480-20#Text>.

21. Постанова Кабінету Міністрів України від 2 серпня 2022 р. № 889 «Про внесення змін до постанов Кабінету Міністрів України від 23 травня 2018 р. № 420 і від 27 грудня 2019 р. № 1175». Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/889-2022-п#Text>.

22. Міненерго представило річні квоти підтримки відновлюваної енергетики та графік проведення «зелених» аукціонів у наступному році (2021 рік). [Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://www.kmu.gov.ua/news/minenergo-predstavilo-richni-kvoti-pidtrimki-vidnovlyuvanoyi-energetiki-ta-grafik-provedennya-zelenih-aukcioni-v-u-nastupnomu-roci>.

23. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку видачі, використання та припинення дії гарантії походження електричної енергії для суб'єктів господарювання, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії» №771 від 24.07.2013 р. Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771-2013-п#Text>.

24. Директива 2018/2001/ЄС «Про заохочення використання енергії з відновлюваних джерел» (RED II) {DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)}. Режим доступу:
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC.

25. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії». Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#Text>.

26. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності зі зберігання енергії» №798 від

22.07.2022 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0798874-22#Text>.

27. «Сценарії реалізації енергетичної стратегії України до 2035 року» / Українська вітроенергетична асоціація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://uwea.com.ua/ua/news/entry/scenarii-realizacii-energeticheskoy-strategii-ukrainy-v-2035-godu/>.

Розділ 3

1. Програмний продукт «PVWatts». [Електронний ресурс]. Режим доступу: [PVWatts[®] Calculator https://pvwatts.nrel.gov](https://pvwatts.nrel.gov).

2. Інструменти для моделювання сонячних електростанцій. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://avenston.com/articles/performance-modeling-tools-overview/>.

3. Програмний продукт «System Advisor Model (SAM)». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://sam.nrel.gov>.

4. Програмний продукт «Helioscope». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://helioscope.aurorasolar.com>.

5. Програмний продукт «HOMER Pro». [Електронний ресурс]. The HOMER Pro[®] microgrid software by UL Solutions. Режим доступу: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.

6. Програмний продукт «Polysun Designer». [Електронний ресурс]. Ganzheitliche Energiesystemsimulationen für Gebäude- und Arealplaner. Режим доступу: <https://www.velasolaris.com/software/polysun-designer/>.

7. Програмний продукт «PVsyst». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pvsyst.com>.

8. Визначення оптимального кута нахилу сонячних батарей. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ecoelectrics.com.ua/novosti/iakii-kut-nahilu-soniachnih-batarei-optimalnii>.

9. Визначення площі необхідної для встановлення сонячної електростанції. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://rentechno.ua/ua/blog/ploscha.html>.

10. Особливості проектування сонячних електростанцій. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://rent techno.ua/ua/blog/bipv-design.html>.
11. Power supply for educational institutions: efficiency and alternatives: Collective monograph /edited by M. Sotnyk, Doctor of Technical Sciences. – Hamilton, Canada, Accent Graphics Communications & Publishing, 2020. – 146 p. Режим доступу: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/82133/3/Sotnyk_heating_system.pdf.
12. Стаднік М. І., Рубаненко О. О., Бондаренко С. В. ВИБІР ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – №1(96). – С. 166-175. Режим доступу: <http://repository.vsau.org/getfile.php/19579.pdf>.
13. Бабій С.М., Горкун А. В. ДО ПИТАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/37387/12440-46023-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
14. Bok Jong Yoo, Chan-Bae Park, Ju Lee Analysis of correlation of climate factors affecting solar power generation // International Journal of Engineering & Technology 7(3.3):354. DOI:10.14419/ijet.v7i2.33.14185. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/332662266_Analysis_of_correlation_of_climate_factors_affecting_solar_power_generation.
15. D. Matushkin, A. Bosak, L. Kulakovskiy ANALYSIS OF FACTORS FOR FORECASTING ELECTRIC POWER GENERATION BY SOLAR POWER PLANTS // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2020. – № 4. – С. 64-69. Режим доступу: <http://energy.kpi.ua/article/view/233597>.
16. Федорчук С. О. Забезпечення заявлених графіків генерації відновлюваних джерел енергії на основі концепції віртуальних електричних станцій. / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – 2019. – Харків, НТУ «ХПІ». – 24 с. Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/4bd0b099-1f8b-49f5-8ef6-b7a378dca8c9/content>.

17. Дерев'янку Д. Г. Особливості побудови та функціонування віртуальних електростанцій в умовах розвитку ОЕС України / Д. Г. Дерев'янку, Д. С. Горенко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 3 (45). – С. 61-69. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18721?locale=uk>.

18. Денисюк С. П. Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій / С. П. Денисюк, Д. С. Горенко // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 2. – С. 25-33. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2016_2_6.

19. Розпорядження Кабінету міністрів України «Про схвалення Концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року» № 908-р. від 14 жовтня 2022 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-p#Text>.

20. Мороз О. М, Мірошник О. О., Павлов А. О., Савченко О. А., Тоберт М. Ю. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ГЕНЕРАЦІЮ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, 2021. – № 2 (3). – С. 114-123. doi: 10.20998/2224-0349.2021.02.04. Режим доступу: <http://erec.khpi.edu.ua/article/view/247805/258608>.

21. Khagendra P. Bhandari, Jennifer M. Collier, Randy J. Ellingson, Defne S. Apul Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 47, July 2015, Pages 133-141. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500146X>.

22. Roshan R. Rao, Monto Mani, Praveen C. Ramamurthy. Review Article: An updated review on factors and their inter-linked influences on photovoltaic system performance // Heliyon, 2018. — Volume 4. – Issue 9, e00815. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00815>.

23. Monto Mani, Rohit Pillai Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 14, Issue 9, December 2010, Pages 3124-3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110002455>

24. Хотян А.А., Розен В.П., Чермалих О.В. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – № 4. – С.14-19. Режим доступу: <http://energy.kpi.ua/article/view/175615>

25. Деградація сонячних панелей відбувається: як і чому це відбувається? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.solargarden.com.ua/degradatsiya-sonyachnyh-panelej-yak-i-chomu-tse-vidbuvayetsya/>

Розділ 4

1. Закону України «Про ринок електричної енергії». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.

2. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 641 від 26.04.2019 р. «Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та купівлі електричної енергії за «зеленим» тарифом». Режим доступу: https://zakononline.com.ua/documents/show/381194_381259.

3. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 821 від 26.07.2022 р. «Про затвердження Змін до Порядку купівлі гарантованим покупцем електричної енергії, виробленої з альтернативних джерел енергії». Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-zmin-do-poryadku-kupivli-garantovanim-pokupcem-elektrichnoyi-energiyi-virobленоyi-z-alternativnih-dzherel-energiyi>.

4. СОУ НЕК 341.001:2019 «Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України». Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82648.

5. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>.

6. Butenko O. Оптимізація процесу вибору місця розташування сонячних електростанцій з використанням гіс-аналізу / О. Butenko, К. Zvyaschenko, К. Buravchenko, А. Nikitin // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2019. – Т. 1 (53). – С. 17-21. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.017>.

7. Стаднік М.І., Рубаненко О.О., Бондаренко С.В. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області / Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2016 – № 2 (94) – С. 104-114. Режим доступу: <http://repository.vsau.org/getfile.php/19567.pdf>.

8. Шведчикова І.О., Кравченко О.П., Романенко Ю.А., Козаков Е.В. Розробка бази даних для прогнозування сонячної генерації в програмно-технічному комплексі управління енергоспоживання локального об'єкта // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика», 2020 – №1 (22) – С. 55-61. <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2020-1-55-61>.

9. Reno, Matthew J., Hansen, Clifford W. [Identification of periods of clear sky irradiance in time series of GHI measurements](#), *Renewable Energy*, Elsevier, 2016, vol. 90(C), pages 520-531. DOI: 10.1016/j.renene.2015.12.031. Режим доступу: <https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v90y2016icp520-531.html>.

10. [Hannu-Pekka Hellman](#), [Matti Koivisto](#), [Matti Lehtonen](#) Photovoltaic power generation hourly modelling / [Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering \(EPE\)](#), Brno-Bystrc, Czech Republic,

2014. INSPEC Accession Number: 14394986. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6839426>.

11. Кузнецов М. П. Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії / М. П. Кузнецов, О. В. Лисенко // Відновлювана енергетика, 2017. – № 1. – С. 25-32. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2017_1_6.

12. Ninh Quang Nguyen, Linh Duy Bui, Binh Van Doan, Eleonora Riva Sanseverino, Dario Di Cara, Quang Dinh Nguyen A new method for forecasting energy output of a large-scale solar power plant based on long short-term memory networks a case study in Vietnam // [Electric Power Systems Research, Volume 199](#), 2021, 107427. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779621004089>.

13. Changsong Chen, Shanxu Duan, Tao Cai, Bangyin Liu Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network // Solar Energy, Volume 85, Issue 11, 2011, Pages 2856-2870. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X11003008>.

14. Muhammad Qamar Raza, Mithulananthan Nadarajah, Chandima Ekanayake On recent advances in PV output power forecast // Solar Energy, Volume 136, 2016, Pages 125-144. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X16302547>.

15. Sobrina Sobri, Sam Koohi-Kamali, Nasrudin Abd. Rahim Solar photovoltaic generation forecasting methods: A review // [Energy Conversion and Management, Volume 156](#), 2018, Pages 459-497. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417310622>.

16. Прогнозування генерації від змінної відновлюваної енергії (variable renewable energy). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://avenston.com/articles/vre-generation-forecasting/>.

17. D. K. Chaturvedi, Isha [Singh](#). Solar Power Forecasting: A Review // International Journal of Computer Applications, 2016, 145(6), pp. 28-50. DOI:10.5120/ijca2016910728. Режим доступу:

https://www.researchgate.net/publication/348418456_Solar_Power_Forecasting_A_Review.

Розділ 5

1. Наказ Міністерства оборони України № 516 від 29.09.2015 р. «Про затвердження Правил метеорологічного забезпечення польотів державної авіації України». Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1264-15#Text>.

2. Шендрик В.В. Система збирання, розміщення та аналізу даних [Текст] / В.В. Шендрик, С.М. Ващенко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 715. – С. 1-11. Режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/28812/1/meteorological%20.pdf>.

3. Інтерактивна інформаційна система збирання метеорологічних даних Коваленко К.О., Шендрик В.В., Парфененко Ю.В. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/28812/1/meteorological%20.pdf>.