

**Проект «Екологічний моніторинг наслідків війни проти України
та стратегія відновлення» Програми підтримки ОБСЄ для України**

АНАЛІТИЧНИЙ ЗВІТ
**щодо оцінки ризиків і вразливості енергетичного сектору України до
зміни клімату**

Виконавці:

Віра БАЛАБУХ, канд. геогр. наук., ст. н. співробітник,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України

Олександр ТЕСЛЕНКО, канд. техн. наук, ст. дослідник,
Інститут загальної енергетики НАН України

Олександр МАТВІЙЧУК, канд. техн. наук,
Інститут загальної енергетики НАН України

м. Київ – 2025

Цей звіт підготовлено за підтримки проекту «Екологічний моніторинг наслідків війни проти України і стратегія відновлення», який фінансується за рахунок позабюджетних коштів Організації з безпеки та співробітництва в Європі (ОБСЄ).

Зміст цієї публікації відображає думки, погляди, здобутки та висновки авторів і не обов'язково відображає погляди чи будь-яку офіційну позицію Організації з безпеки та співробітництва в Європі (ОБСЄ), її донорів чи держав-учасниць. ОБСЄ не несе жодної відповідальності за точність чи повноту будь-якої інформації, рекомендацій чи друкарських помилок.



ДОКУМЕНТ СЕД Мінекономіки АСКОД

Мінекономіки

Підписувач **Краснолуцький Олександр Васильович**
Сертифікат **04AF212836405D99040000006D603D00562AEE00**
Дійсний з **09.02.2026 0:00:00** по **08.02.2028 23:59:59**



6701-07/61191-03 від 02.07.2026

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ACER Агентство Європейського Союзу по співпраці органів регулювання енергетики (Agency for the Cooperation of Energy Regulators)

ENTSO-E Європейська мережа операторів системи передачі електроенергії (англ. European Network of Transmission System Operators for Electricity)

ENTSOG European Network of Transmission System Operators (Європейська мережа операторів газотранспортних систем)

LNG Зріджений природний газ (англ. Liquefied Natural Gas)

LPG Зріджений нафтовий газ (англ. Liquefied Petroleum Gas)

NECP Національний енергетичний та кліматичний план

SAIDI Індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (англ. System Average Interruption Duration Index)

TEN-E Транс'європейські енергетичні мережі

TYNDP 10-річний план розвитку мереж ЄС (Union-wide Ten-Year Network Development Plan)

WAM Сценарій з додатковими політиками та заходами (англ. with additional measures)

WEM Сценарій з наявними політиками та заходами (англ. with existing measures)

АЕС Атомна електростанція

ВВП Валовий внутрішній продукт

ВДЕ Відновлювані джерела енергії

ВЕС Вітряна електростанція

ГАЕС Гідроакмулювальна електростанція

ГЕС Гідроелектростанція

ГРМ Газорозподільна мережа

ГТС Газотранспортна система

ДВЗ Двигун внутрішнього згоряння

ЕСКО Енергосервісна компанія

ЕСУ Енергетична стратегія України до 2050 року
ЄБРР Європейський банк реконструкції та розвитку
ЄЗК Європейський зелений курс (англ. - European Green Deal)
ЕК Європейська комісія
ЄС Європейський союз
ЗЗЛГ Землекористування, зміни у землекористуванні та лісове господарство
КВВП Коефіцієнт використання встановленої потужності
ЛЕП Лінія електропередач
МГЕЗК Міжурядова група експертів з питань зміни клімату
МЕА Міжнародне енергетичне агентство
НВВ2 Національно визначений внесок України до Паризької угоди
НЕС Національна економічна стратегія на період до 2030 року
НКРЕКП (Регулятор) Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
НПЕК Національний план з енергетики та клімату до 2030 року
НПЗ Нафтопереробний завод
НПСВ Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок
НВВ Національно-визначений внесок України
ОБСЄ Організація з безпеки і співробітництва в Європі
ОГРМ оператор газорозподільної мережі
ОГТС оператор газотранспортної системи
ОЕС Об'єднана енергетична система України
ОКІ Об'єкти критичної інфраструктури
ООН Організація Об'єднаних Націй
ОПСГ Оператор газосховища
ОСП Оператор системи передачі електричної енергії
ОСР Оператор системи розподілу електричної енергії
ПГ Парникові гази

ПСГ Підземні сховища газу

РКЗК ООН Рамкова конвенція ООН про зміну клімату

РНБОУ Рада національної безпеки і оборони України

РТК - Репрезентативні траєкторії концентрації парникових газів

СЕС Сонячна електростанція

ТЕС Теплова електростанція

ТЕЦ Теплоелектроцентрально

УЗЕ Установка зберігання енергії

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1. Сучасний стан та перспективи розвитку енергетичного сектору України в короткостроковій (2025-2040 рр.) та середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.....	11
2. Перегляд політики та поточних ініціатив ЄС щодо адаптації енергетичного сектору до зміни клімату.....	27
2.1. Політика ЄС щодо запобігання зміни клімату	27
2.2. Політика ЄС з адаптації енергетичного сектору до зміни клімату.....	30
2.3. Огляд основних документів ЄС щодо адаптації енергетичного сектору до зміни клімату.....	32
2.4. Аналіз взаємозв'язків, завдання та ролі в законодавстві ЄС.....	42
2.5. Політика України з адаптації енергетичного сектору до зміни клімату.....	45
3. Уточнення кліматичних загроз, індикаторів кліматичних загроз для об'єктів видобутку та транспортування викопного палива, атомної енергетики, гідроенергетики, теплової енергетики, сонячної, вітрової та біоенергетики, мереж передачі та розподілу електроенергії, як підпадають під вплив кліматичних факторів.....	48
4. Тенденції зміни індикаторів кліматичної загрози для компонентів енергетики у сучасний кліматичний період та їхні ймовірні зміни в короткостроковій та середньостроковій перспективі.....	53
4.1. Тенденції зміни індикаторів кліматичних загроз для компонентів енергетики України у сучасний кліматичний період (1991-2020pp)	53
4.2. Ймовірні зміни індикаторів кліматичних загроз для компонентів енергетики України в короткостроковій та середньостроковій перспективі для сценарію РТК8.5.....	60

5. Кліматичні ризики, вразливість компонентів енергетичного сектору в Україні у коротко та середньостроковій перспективі для сценарію РТК8.5 та пріоритетні напрямки їхньої адаптації до зміни клімату.....	70
5.1. Методичні положення оцінки кліматичних ризиків та вразливості компонентів енергетичного сектору	74
5.2. Атомна енергетика.....	79
5.2.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості атомної енергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі.....	81
5.2.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості атомної енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.....	93
5.2.3. Пріоритетні напрямки адаптації атомної енергетики до зміни клімату.....	96
5.3. Теплова енергетика.....	98
5.3.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості теплової енергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі	99
5.3.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості теплової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі	108
5.3.3. Пріоритетні напрямки адаптації теплової енергетики до зміни клімату.....	111
5.4. Гідроенергетика.....	113
5.4.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для гідроенергетики у короткостроковій (2021-2040 рр.) перспективі.....	116

5.4.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для гідроенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.....	120
5.4.3. Пріоритетні напрямки адаптації гідроенергетики до зміни клімату.....	122
5.5. Вітрова енергетика.....	125
5.5.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для вітрової енергетики у короткостроковій (2021-2040 рр.) перспективі...	126
5.5.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для вітрової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі...	127
5.5.3. Пріоритетні напрямки адаптації вітрової енергетики до зміни клімату.....	133
5.6 Сонячна енергетика.....	135
5.6.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для сонячної енергетики у короткостроковій(2021 – 2040 рр.) перспективі.....	137
5.6.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для сонячної енергетики у середньостроковій(2041 – 2060 рр.) перспективі.....	139
5.6.3. Пріоритетні напрямки адаптації сонячної енергетики до зміни клімату.....	146
5.7. Біоенергетика.....	148
5.7.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для біоенергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі.....	150
5.7.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для біоенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.....	152
	158

5.7.3. Пріоритетні напрямки адаптації біоенергетики до зміни клімату.....	161
5.8. Видобуток і транспортування викопного палива.....	164
5.8.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі.....	165
5.8.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для видобутку і транспортування викопного палива у середньостроковій (2041-2060 рр,) перспективі.....	172
5.8.3. Пріоритетні напрямки адаптації видобутку і транспортування викопного палива до зміни клімату.....	175
5.9. Електромережі передачі та розподілу електроенергії.....	177
5.9.1. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для електромереж передачі та розподілу електроенергії у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі.....	179
5.9.2. Оцінка кліматичного ризику та вразливості для електромереж передачі та розподілу електроенергії у середньостроковій (2041-2060 рр,) перспективі.....	185
5.9.3. Пріоритетні напрямки адаптації електромереж передачі та розподілу електроенергії до зміни клімату.....	187
6. Рекомендації щодо розробки галузевого програмного документу з адаптації до зміни клімату для енергетичного сектору України	188
Висновки.....	199

ВСТУП

Глобальна зміна клімату стала однією з найнагальніших екологічних проблем, до вирішення якої прикута увага людства. За даними Всесвітньої метеорологічної організації¹ за останні 50 років кількість стихійних лих збільшилася вп'ятеро, що пов'язано зі зміною клімату, збільшенням кількості екстремальних погодних явищ та підвищенням якості звітності. Однак завдяки більш досконалим системам завчасного попередження та забезпечення готовності до лих та ліквідації їх наслідків кількість смертей, обумовлених ними, скоротилася майже втричі.

Зміна клімату суттєво впливає на енергетичний сектор, створюючи фізичні, технологічні та системні виклики. Енергосистема одночасно є і одним з суттєвих чинників, який обумовлює зміни клімату як джерело викидів парникових газів, і жертвою наслідків кліматичних змін, тому її адаптація до цих змін критично необхідна для забезпечення надійності, безпеки та стійкості енергосистеми. Зміна клімату вже ставить під загрозу стабільність енергосистеми, оскільки вона вразлива до різноманітних впливів зміни клімату. До них належать: підвищення температури навколишнього середовища та хвилі спеки, холоди та снігопади, сильна посуха, інтенсивні опади, підвищення рівня моря, урагани та лісові пожежі. Хоча ці наслідки відрізняються від одного регіону до іншого, вони продовжуватимуть впливати на всі регіони країни. Крім того, вплив на одну частину або сектор енергетичної системи або в одному регіоні може вплинути на інші частини системи або інші області.

Без адаптації енергосистеми до зміни клімату зростають ризики енергетичних криз, економічних втрат і соціальної напруги. Тому така адаптація не просто бажана, а стратегічно необхідна умова для стійкого розвитку енергетики. Внаслідок цього ідентифікація кліматичних загроз та

¹ За останні 50 років збільшилось кількість лих, пов'язаних з погодою – вони спричиняють більше втрат, однак забирають менше життів. <https://wmo.int/ru/media/news/za-poslednie-50-let-uvlichilos-chislo-svyazannykh-s-pogodoy-bedstviy-oni-prichinyayut-bolshe>

визначення об'єктивних індикаторів їх впливу на об'єкти з видобутку та транспортування викопного палива, атомної енергетики, гідроенергетики, теплової енергетики, сонячної, вітрової та біоенергетики, мереж передачі та розподілу електроенергії, які підпадають під вплив кліматичних факторів та розробка рекомендацій щодо мінімізації їхнього впливу набувають великого значення для забезпечення стійкості енергетичного сектору України.

У зв'язку з введенням воєнного стану в Україні відповідно до Указу Президента України від 24.02.2022 № 64/2022, та враховуючи положення постанови Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 26.03.2022 № 349 «Щодо захисту інформації, яка в умовах воєнного стану може бути віднесена до інформації з обмеженим доступом, у тому числі щодо об'єктів критичної інфраструктури» аналітичний звіт щодо адаптації енергетичного сектору України до змін клімату, включаючи процеси виробництва, перетворення, зберігання, передачі та розподілу енергії по проекту «Екологічний моніторинг війни проти України та стратегія відновлення» за програмою підтримки ОБСЄ складено з урахуванням закриття доступу до інформації, яка в умовах воєнного стану може бути віднесена до інформації з обмеженим доступом.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ В КОРОТКОСТРОКОВІЙ (2025-2040 рр.) ТА СЕРЕДНЬОСТРОКОВІЙ (2041-2060 рр.) ПЕРСПЕКТИВІ

До початку повномасштабного вторгнення російської федерації (24.02.2022 р.) енергосистема України характеризувалась наявністю надлишкових генеруючих потужностей, особливо теплової електрогенерації на вугіллі. За даними ENTSO-E, станом на 01.01.2022² їх номінальний обсяг становив близько 54,8 ГВт. Оператор системи передачі НЕК “Укренерго” оцінював встановлені потужності на рівні близько 56,5 ГВт. У зв’язку із втратою енергоємних виробництв на тимчасово окупованих територіях Луганської і Донецької областей України після 2014 року сумарна генеруюча потужність перевищувала максимальний рівень попиту (електричного навантаження) більш ніж у 2,5 рази, що спостерігалось в зимовий період в ОЕС України впродовж 2016-2022 рр. (приблизно 21-22 ГВт). Така надлишкова потужність забезпечувала значний виробничий потенціал для експорту електроенергії, зокрема в країни ЄС, який, головним чином, обмежувався пропускною спроможністю міждержавних перетинів мереж електропередачі.

На початок 2020 року генеруючі потужності Об’єднаної енергетичної системи України були зосереджені на:

- чотирьох атомних електростанціях (15 енергоблоків, з яких 13 – потужністю 1 000 МВт і 2 – потужністю 415 МВт та 420 МВт);
- каскадах з 8 гідроелектростанцій на річках Дніпро й Дністер із загальною кількістю гідроагрегатів – 103 одиниці, а також 3-х гідроакumuлюючих станціях (11 гідроагрегатів потужністю від 33 МВт до 324 МВт);

² The ENTSO-E Annual Report 2022 URL: <https://www.entsoe.eu/news/2023/07/31/entso-e-releases-today-the-annual-report-2022/>

- 12 ТЕС із блоками потужністю 150, 200, 300 і 800 МВт (75 енергоблоків, у тому числі потужністю: 150 МВт – 6 од., 200 МВт – 31 од., 300 МВт – 32 од., 800 МВт – 6 од.), а також 3-х великих ТЕЦ з енергоблоками 100 (120) МВт та 250 (300) МВт;

- потужність ВДЕ складала: СЕС – 6,872 ГВт, ВЕС – 1,314 ГВт, установки на біомасі – 0,208 ГВт.

Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну мало істотний вплив на електроенергетичний сектор. З одного боку, Україна змогла довести високий рівень стійкості енергетичної системи, пропрацювавши три тижні в ізолюваному режимі і приєднавшись до ENTSO-E, а в червні 2022 р. – розпочавши комерційний експорт електроенергії до ЄС. З іншого боку, масовані ракетні та дроніві атаки на енергетичну інфраструктуру спричинили значні руйнування і ушкодження об'єктів генерації та електричних мереж.

Велика частина електростанцій опинилася під окупацією – зокрема, Запорізька АЕС (6 000 МВт), Луганська, Запорізька та Вуглегірська ТЕС (близько 7 700 МВт). Каховська ГЕС (343 МВт) була підірвана і повністю зруйнована. На непідконтрольних Україні територіях знаходяться ТЕЦ (сумарною потужністю близько 490 МВт), значна частина вітрових та сонячних електростанцій, а також вугільні шахти – постачальники енергетичного вугілля. Внаслідок втрати істотної частини електрогенеруючих потужностей та можливостей передачі в енергосистемі Україна призупиняла експорт електроенергії до країн ЄС²³.

З березня 2024 р. росія відновила масштабні комбіновані атаки на енергетичну інфраструктуру ОЕС України, зосереджуючи їх передусім на об'єктах маневреної генерації – ТЕС і ГЕС. Також було знищено низку потужних ТЕЦ, що мали регіональне значення⁴.

Незалежний аналіз стану ОЕС України додатково ускладнюється директивною забороною оприлюднювати дані, а також ініціативними

³ Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua>

⁴ Національна енергетична компанія «Укренерго». URL: <https://ua.energy/>

рішеннями розпорядників даних чи суб'єктів звітування (Methodology for Short-term and Seasonal Adequacy Assessments) обмежити обсяг публічних даних або припинити їх публікацію під час дії військового стану. Наприклад, постановою Кабінету Міністрів України від 12 березня 2022 р. № 263 « Деякі питання забезпечення функціонування інформаційно-комунікаційних систем, електронних комунікаційних систем, публічних електронних реєстрів в умовах воєнного стану»⁵ було надано органам влади, державним підприємствам, установам та організаціям право зупиняти чи обмежувати роботу інформаційних систем, публічних електронних реєстрів та законом України від 3 березня 2022 року № 2115-IX «Про захист інтересів суб'єктів подання звітності та інших документів у період дії воєнного стану або стану війни»⁶ було надано дозвіл окремим суб'єктам господарювання не подавати звітність під час військового стану.

Через масштабну міграцію населення за кордон України та зменшення обсягів виробництва і бізнес-активності, попит на електроенергію в енергосистемі скоротився приблизно на 30-35 %³. Незважаючи на це, в умовах захоплення, руйнації і знищення енергетичних об'єктів, обсяг генерації залишається недостатнім для забезпечення внутрішнього попиту.

Для стабілізації роботи енергосистеми по всій території України почали застосовуватися масштабні планові та аварійні відключення електроенергії. Також для покриття внутрішнього дефіциту електроенергії Уряд розпочав роботу над створенням спеціальних фінансово-економічних механізмів, які, враховуючи відчутну різницю в цінах на електроенергію в країнах Східної

⁵ Деякі питання забезпечення функціонування інформаційно-комунікаційних систем, електронних комунікаційних систем, публічних електронних реєстрів в умовах воєнного стану (затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 12 березня 2022 р. № 263) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/263-2022-%D0%BF#Text>

Європи та Україні, дозволять зробити імпорт з країн ЄС економічно прийнятним⁶.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р було схвалено Енергетичну стратегію України на період до 2050 року⁷. Під час дії воєнного стану документ має закритий доступ, проте з новин та коментарів посадовців у відкритих джерелах можна сформулювати певне розуміння щодо основних стратегічних цілей та їх показників - задекларованим ключовим завданням стратегії є перетворення України на енергетичний хаб Європи. Відповідно, Україна має офіційний документ, який передбачає амбітні плани щодо трансформації власного енергетичного сектору в напрямі переважного розвитку відновлюваної та вуглецево нейтральної генерації із широким залученням інвестицій в енергетичний сектор. При цьому основні сподівання покладаються на приватні іноземні та українські інвестиції. Очевидно, що основний стримуючий фактор розвитку та трансформації енергетичного сектору України є війна та її наслідки. Під час війни Україна діє у шести ключових напрямках на підтримку енергетичного сектору України: 1) ремонт пошкоджених енергооб'єктів; 2) постачання Україні якомога більшої кількості малих децентралізованих генераторів; 3) розгортання локальних сонячних панелей, щоб забезпечити електроенергією лікарні, школи, громадські та житлові будівлі; 4) розширення максимального обсягу електроенергії, який можна експортувати в Україну з інших країн Європи; 5) розширення можливостей міжмережевої взаємодії на кордонах; 6) посилення ППО поруч з критично важливими об'єктами енергетичної інфраструктури. Попри виклики, пов'язані з воєнними діями, Україна продовжує впроваджувати стандарти ЄС та реалізовувати кліматичні проєкти.

⁶ Закон України «Про захист інтересів суб'єктів подання звітності та інших документів у період дії воєнного стану або стану війни» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2115-20#Text>

⁷ Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року (затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>

2024 рік для України в цьому напрямі є роком кліматичного діалогу⁸. ЕСУ містить низку основних цілей і заходів, які матимуть безпосередній вплив на навколишнє природне середовище та зміну клімату.

До 2050 р. в Україні

- передбачається заміщення більш сталим екологічно чистим виробництвом енергії генеруючих потужностей, що працюють із використанням вугілля та є одними з найбільших забруднювачів навколишнього природного середовища, перебувають на межі граничного ресурсу та фізичного зносу. Використання вугільної генерації буде скорочуватися до повного виведення з експлуатації у 2035 р. Однак реалістичність досягнення цієї цілі до 2035 року буде оцінена після завершення повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну з урахуванням стану та наявних потужностей, які залишаться в робочому стані після завершення бойових дій⁶.

При відновленні енергоблоків слід враховувати, що побудовані в 1960-1970-х роках українські ТЕС споживають на 30% більше вугілля на кВт-год, ніж в середньому по Європі, що свідчить про високу неефективність та значну зношеність енергоблоків радянського виробництва. З урахуванням екологічних директив ЄС щодо викидів забруднюючих речовин вугільна енергетика України потребує значних змін. Вимушене встановлення на українських ТЕС вискоєфективних очисних споруд значно здорожує вартість виробленої електроенергії. Собівартість такого оновлення ТЕС становитиме 1,2–1,3 млрд \$ на 1 ГВт потужності, а 1 ГВт нових потужностей коштує максимум 1,5 млрд \$, тобто, економічно доцільніше будувати нові теплоелектростанції, які відповідатимуть сучасним вимогам з енергоефективності та екологічності. Повна ж реконструкція фізично і

⁸ Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України URL:
<https://mepr.gov.ua/ruslan-strilets-2024-rik-pochatku-klimatychnogo-dialogu-v-ukrayini/>

морально зношених українських ТЕС, за підрахунками експертів, потребуватиме майже 30 млрд \$⁹.

Однак, вугільна генерація відіграє значну роль, як маневрена потужність, яка забезпечує балансування ОСУ України. В випадку форсованого розвитку потужностей на основі ВДЕ, які є енергоджерелами негарантованої потужності, повна заміна вугільних ТЕС потребуватиме впровадження нових енергетичних політик, що вдосконалення функціонування гідроелектростанцій (ГЕС/ГАЕС), ТЕС на комбінованому паливі (природний газ – біометан), газопоршневих та газотурбінних установок з використання природного газу (в межах його наявності для потреб енергетики), впровадження накопичувачів енергії, в тому числі довготривалого (сезонного) зберігання енергії, потужностей з метою забезпечення стійкості функціонування енергетичного сектору України⁷;

- *планується нарощування встановлених потужностей АЕС з будівництвом нових енергоблоків, а також реалізація проекту з власного виробництва тепловиділяючих збірок (до 2032 р.).* Відповідно до ЕСУ, третій енергоблок Хмельницької АЕС планується підключити до мережі вже у 2028 році, що дозволить збільшити базову генерацію на 1,1 ГВт. Поки що будівельна частина цього блоку готова на 80%. Два нові енергоблоки Хмельницької АЕС забезпечать додатково 2,2 ГВт базової потужності. Добудова блоків є частиною масштабнішого плану розвитку атомної енергетики в Україні, який передбачає також активне будівництво енергоблоків за технологією американської компанії Westinghouse⁷; забезпечення 100% населення природним газом власного видобутку як цільовий індикатор на 2030 р. до 21,5 млрд. куб.м (оптимальний) та 26,8 млрд. куб.м (оптимістичний). Впроваджується контроль та заходи щодо зменшення викидів парникових газів на об'єктах системи нафтопроводів,

⁹Обух В. 30 млрд доларів: щоб українські ТЕС були такі, як європейські. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2593914-30-mlrd-dolariv-sob-ukrainski-tes-buli-taki-ak-evropejski.html>

реалізація програми декарбонізації та підвищення енергоефективності системи нафтопроводів. У 2023 р. прийнято Закон України «Про мінімальні запаси нафти та нафтопродуктів»^{9,10}, що передбачає створення резервів на 90 днів чистого імпорту або 61 день внутрішнього споживання;

- передбачається впровадження та реалізацію проектів, спрямованих на зберігання вуглецю (CCUS), що дозволить нівелювати наявний залишкових об'єм викидів в 2050 році. Крім того, ЕСУ розглядає можливості альтернативного використання наявної інфраструктури для транспортування біометану, синтетичного метану та водню. Відповідно до проєкту Водневої стратегії України на період до 2050 року очікується початок виробництва відновлюваного водню у 2030 р. одночасно з введенням в експлуатацію Центральноєвропейського водневого коридору та досягнення обсягів експорту 0,3-0,4 млн.тон. на рік у 2035 р. та 1,5-2 млн.тон до 2050 р.⁷

ЕСУ містить стратегічну ціль щодо повної і всебічної інтеграції енергетичних ринків України з європейськими ринками шляхом забезпечення правової, технічної і економічної синхронізації, що супроводжується розширенням можливості торгівлі між суміжними ринками, посиленням конкуренції та ефективним функціонуванням внутрішнього ринку. Введення в експлуатацію високоманеврових потужностей з можливостей швидкого запуску (з включення з нуля до набрання повної потужності за 10-15 хвилин та швидкодіючих резервів на базі установок з зберігання електроенергії надавання можливості забезпечити ОЕС України необхідними резервами регулювання вимог відповідності у перспективі⁷. Як відомо, енергосистему України було синхронізовано з енергосистемою континентальної Європи (ENTSO-E) 16 березня 2022 р. Ця подія сталася в екстреному порядку через повномасштабну війну, що розпочалася 24 лютого 2022 р. Спочатку синхронізацію планували провести пізніше (в 2023 р.), після серії

¹⁰ Закон України «Про мінімальні запаси нафти та нафтопродуктів» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3484-20#Text>

випробувань. Проте через загрозу руйнування енергетичної інфраструктури процес було пришвидшено. Синхронізація дозволила Україні та Молдові отримувати екстрену підтримку від європейських енергосистем та забезпечила більш високу стійкість енергопостачання. У грудні 2023 р. Україна офіційно стала повноправним членом ENTSO-E. На початку 2025 р. було досягнуто домовленості щодо збільшення максимальної потужності імпорту електроенергії з Європи з 1,7 до 2,1 ГВт, що значно підвищило стійкість енергосистеми України¹¹. При цьому передбачається розбудова експортно-орієнтованого енергетичного сектору, розширення загальної потужності міждержавних перетинів ОЕС України з енергосистемами країн ENTSO-E до 6,2 ГВт до 2032 р.⁷

В Енергетичному співтоваристві позитивно оцінили законопроект про об'єднання енергоринків України та ЄС. Зареєстрований у Верховній Раді законопроект (реєстр. № 12087) про об'єднання енергоринків України та ЄС є позитивним кроком уперед і з його прийняттям Україна зможе завершити транспозицію європейського Інтеграційного пакета у сфері електроенергетики^{11,12}. Однак, як зазначає Головне науково-експертне управління Верховної Ради України процес імплементації приписів міжнародних документів у національне законодавство полягає не у механічному їх перенесенні у закони, а у викладенні у вигляді правових норм відповідно до вимог законодавчої техніки, під якою розуміється «система усталених теоретико-прикладних правил, вироблених на підставі багаторічної практики законотворчості, якими окреслено засоби і методи розробки та написання проектів законів, що забезпечують точну й повну відповідність положень, що викладаються, їх змісту і призначенню, вичерпний обсяг правового регулювання, ясність та доступність правового матеріалу тощо».

¹¹ Українська енергетика. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/ukraina-ne-povnistiu-vykorystovuie-limit-potuzhnosti-importu-elektroenerhii>

¹² Укрінформ. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3923497-v-energospivtovaristvi-pozitivno-ocinili-zakonoproekt-pro-obednanna-energorinkiv-ukraini-ta-es.html>

Зазначений законопроект було 7 квітня 2026 р. прийнято Верховною Радою України і 21 квітня 2026 р. Закон підписано Президентом України. Це свідчить про забезпечення, в основному, відповідності національного законодавства нормам acquis Європейського Союзу та створення передумов для сполучення ринку електричної енергії України з ринками країн-членів ЄС¹³.

В результаті модернізації електричних мереж у довгостроковій перспективі планується забезпечення зменшення перерв у електропостачанні за показником SAIDI (середня тривалість відключення електропостачання) до 150 хвилин у міській місцевості і 300 хвилин у сільській місцевості⁷.

Одним з ключових принципів ЕСУ є децентралізація енергетичного сектору: усі заходи повинні бути реалізовані з урахуванням стратегічної орієнтації на розвиток розподіленої генерації та контролю споживання. Створення інституційного середовища для участі активних споживачів на ринку електричної енергії та стимулювання розвитку розподілених джерел генерації електричної енергії. Регулятором (НКРЕКП) затверджено порядок продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 4 серпня 2021 р. за № 907-р¹⁴ щодо схвалення Стратегії енергетичної безпеки (пунктом 2.9 передбачено будівництво і запуск 1,5-2 ГВт високоманеврених потужностей на заміну вугільної генерації, у т.ч. з використанням незадіяних компресорних станцій ГТС).

11 грудня 2024 р. Міністерством енергетики України було оприлюднено проєкт Плану заходів з реалізації Енергетичної стратегії України на період до

¹³ Про внесення змін до деяких законів України щодо імплементації норм європейського права з інтеграції енергетичних ринків, підвищення безпеки постачання та конкурентоспроможності у сфері енергетики URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4834-20#Text>

¹⁴ Про схвалення Стратегії енергетичної безпеки (затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 4 серпня 2021 р. за № 907-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/907-2021-%D1%80#Text>

2050 року та звіту про його стратегічну екологічну оцінку².

Слід зазначити, що розпорядженням від 13 серпня 2024 р. № 761-р. Кабінет Міністрів України затвердив Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання^{14,15}. Таким чином фактично оприлюднено важливу складову реалізації ЕСУ на період до 2050 року.

Як на національному рівні, так і на регіональному (в рамках Енергетичного Співтовариства) Україна визначила ключові цілі до 2030 року, зокрема:

- скорочення викидів парникових газів на 65% порівняно з рівнем 1990 року;
- кліматична нейтральність енергетичного сектора до 2050 року;
- частка відновлюваних джерел енергії у структурі валового кінцевого енергоспоживання не менше 27%;
- первинне споживання енергії не більше 72 224 тис. т.н.е., кінцеве споживання енергії – 42 168 тис. т.н.е.;
- очікувана економія енергії у будівлях органів державної влади не менше 24,9 ГВт·год/рік;
- повна і всебічна інтеграція ринків електроенергії та природного газу України з європейським ринком;
- вільне ціноутворення на енергетичних ринках з механізмами підтримки вразливих споживачів;
- розвиток та фінансування інновацій та досліджень у секторі чистих технологій, відновлюваної енергетики та низьковуглецевого виробництва;
- підвищення конкурентоспроможності.

¹⁵ Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text14>

Стратегія державної екологічної політики України на період до 2030 року передбачає інтегрування екологічних вимог під час розроблення і затвердження документів державного планування, галузевого (секторального), регіонального та місцевого розвитку. Набув чинності Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики»¹⁶, який визначив правові та організаційні засади державної кліматичної політики, спрямованої на забезпечення низьковуглецевого та сталого розвитку України, її екологічної, продовольчої та енергетичної безпеки, досягнення кліматичної нейтральності, забезпечення пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї, виконання міжнародних зобов'язань України у сфері зміни клімату, удосконалення національної системи інвентаризації антропогенних викидів парникових газів із джерел та поглинання поглиначами парникових газів, забезпечення функціонування національної системи моніторингу та оцінки досягнення цілей державної кліматичної політики та прогнозування у сфері зміни клімату.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р. схвалено Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року¹⁷.

Враховуючи, що до зазначеного Плану увійшли розрахунки ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України» на базі моделі TIMES-Україна вважати можливим зазначені встановлену потужність та структура виробництва електроенергії у 2050 році взяти за основу дані розраховані за зазначеною моделлю за WEM (базовий) та WAM (оптимістичний) сценаріями (Рис.1.1-1.4).

¹⁶ Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text>

¹⁷ Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р.) URL: <https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df>

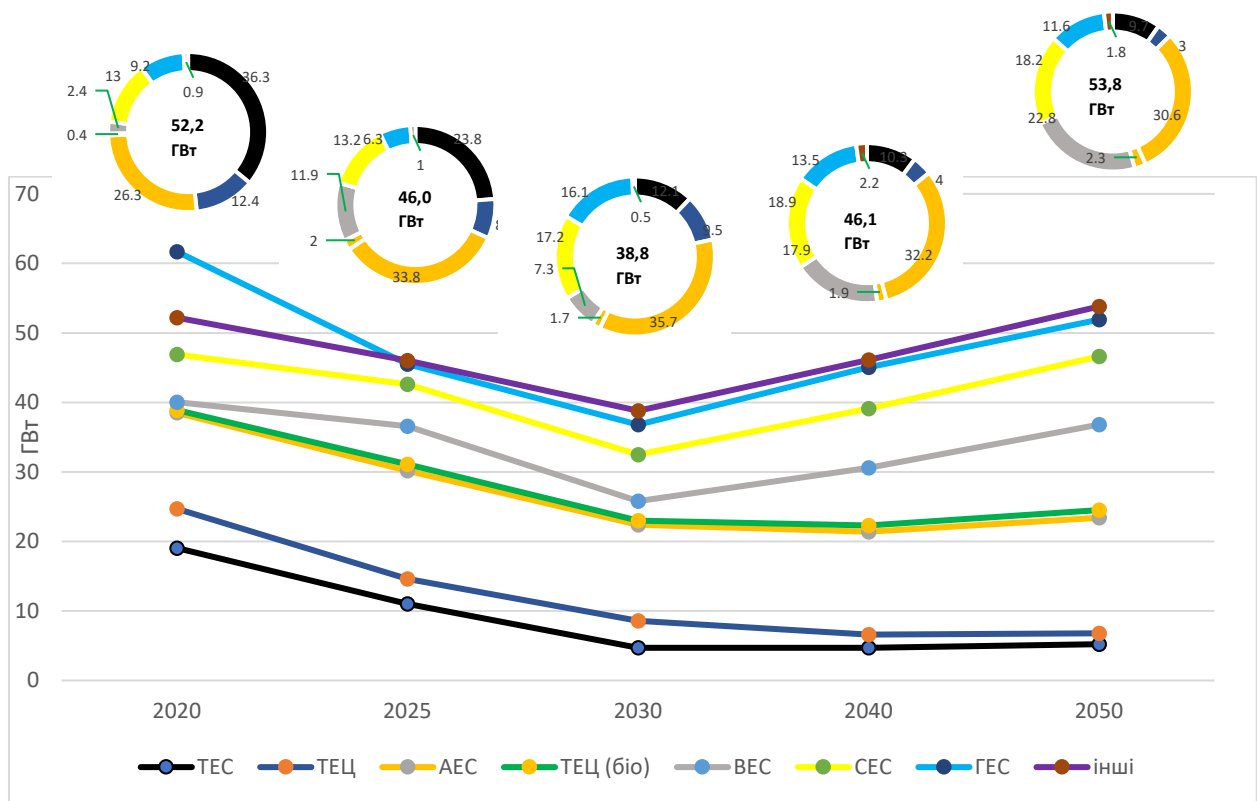


Рис.1.1 Встановлена потужність ОЕС України (варіант НПЕК – WEM)

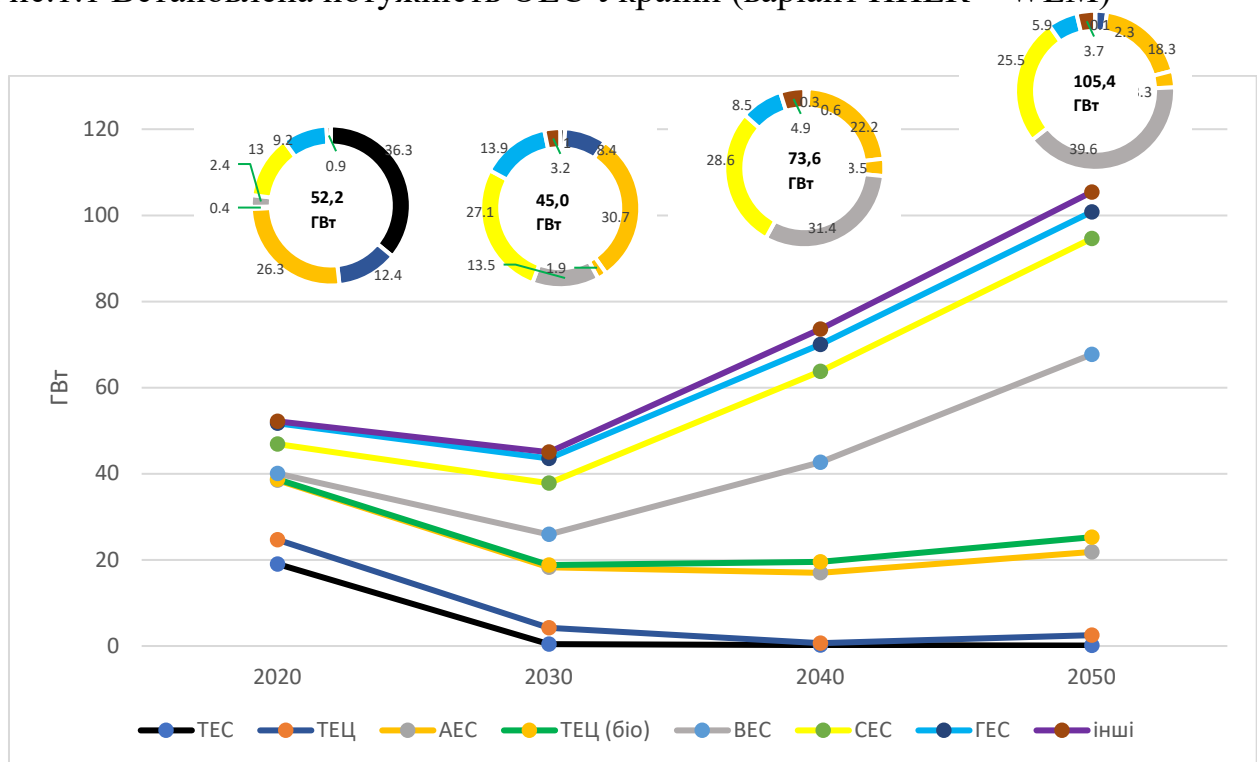


Рис. 1.2 Встановлена потужність ОЕС України варіант НПЕК – WAM)

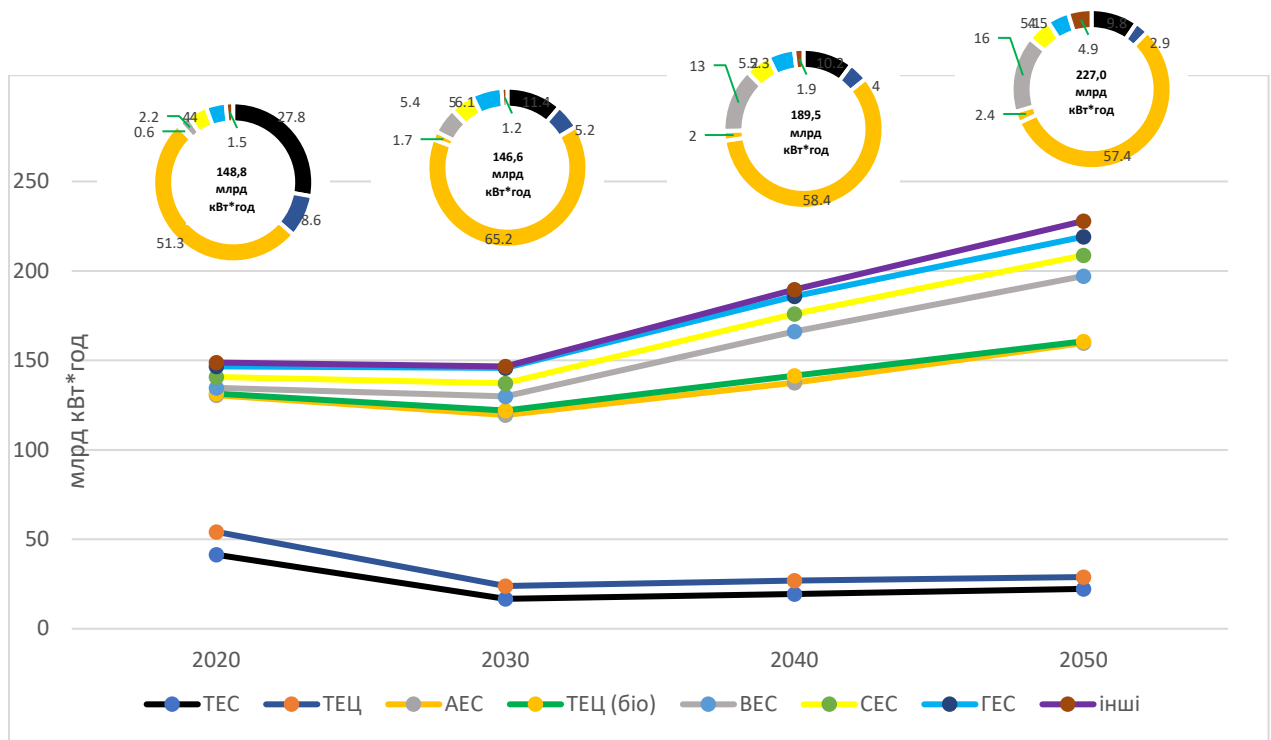


Рис. 1.3 Виробіток електроенергії (варіант НПЕК – WEM)

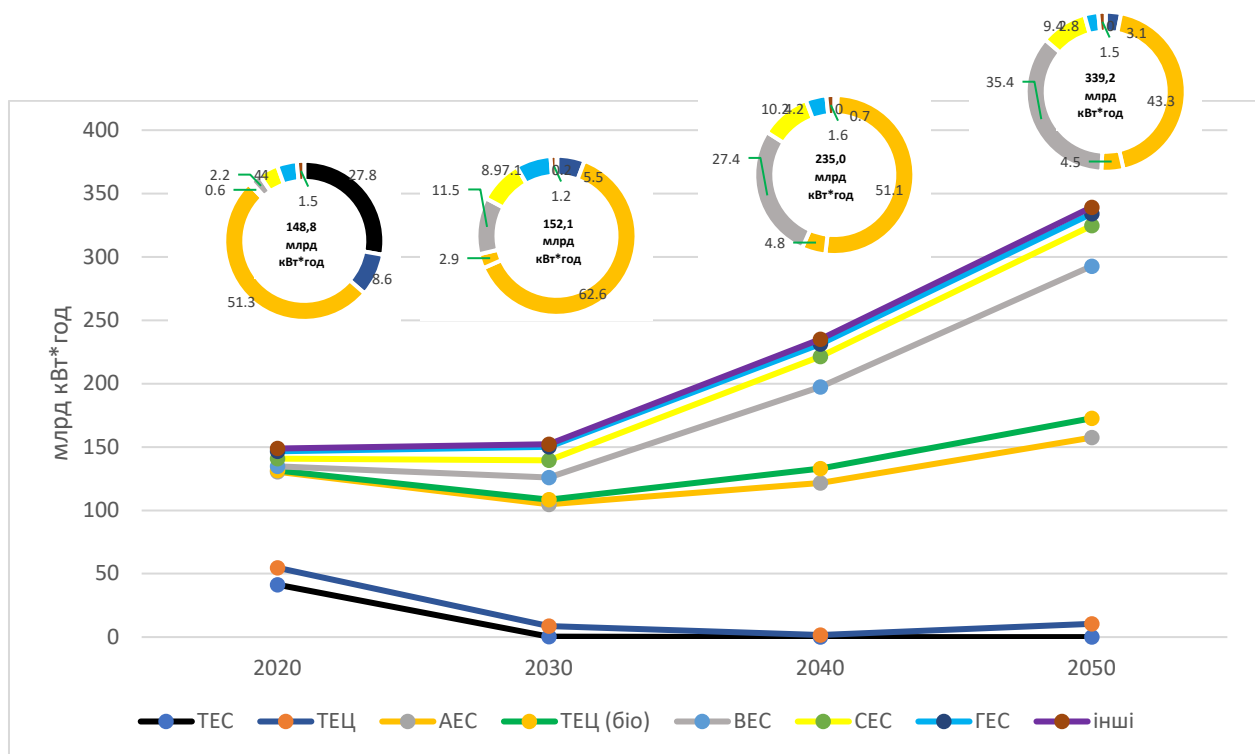


Рис. 1.4 Виробіток електроенергії (варіант НПЕК – WAM)

Оскільки ЕСУ до 2050 року є закритою, але відомо що вона має кілька сценаріїв розвитку безпеки та економіки, які залежать від термінів закінчення війни, темпів зростання ВВП, демографічної ситуації та інтеграції України до Європейського Союзу. Україна має забезпечити розвинену систему законодавства і регулювання, а також досить широкий набір політик та заходів у сфері енергетики та дотичних до неї сфер.

За сценарію WEM прогнозується зростання видобутку енергоресурсів, в першу чергу, видобутку уранової руди, а також відновлюваних енергоресурсів, тоді як за сценарієм WAM, окрім значного нарощування видобутку уранової руди, також мають бути забезпечені значні темпи освоєння потенціалу біоенергетики та вітроенергетики. При цьому, видобуток вуглецеємних викопних енергоресурсів буде скорочуватися під тиском декарбонізаційних та інших заходів.

В дослідженні також використано відкриту частину інформацію з конференції з відновлення України в Лондоні (21 червня 2023 р.), де Міністр енергетики України Герман Галущенко презентував Енергетичну стратегію України до 2050 року, як Стратегію майбутнього: Україна - це енергетичний хаб, який допоможе Європі позбутися залежності від росії. Зокрема, Україна має потенціал до 2050 р. наростити потужності вітрової генерації до 140 ГВт, сонячної – до 94 ГВт, накопичувачів енергії (energy storage) – до 38 ГВт, атомної генерації – до 30 ГВт, ТЕЦ та біоенергетичних потужностей – до 18 ГВт, гідрогенерації – до 9 ГВт¹⁸.

Разом з цим заслуговують на увагу прогнози інших аналітичних центрів, зокрема ДІКСІ груп, які розробляли сценарії з підготовки до проходження осінньо-зимового максимуму навантажень 2024/2025 рр.¹⁹. З урахуванням цих та інших досліджень наведено сценарій на Рис. 1.5-1.6.

¹⁸ Кабінет міністрів України. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/strategiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-iakyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosi>

¹⁹ <https://fileview.ukr.net/?url=https%3A%2F%2Fmail.ukr.net>

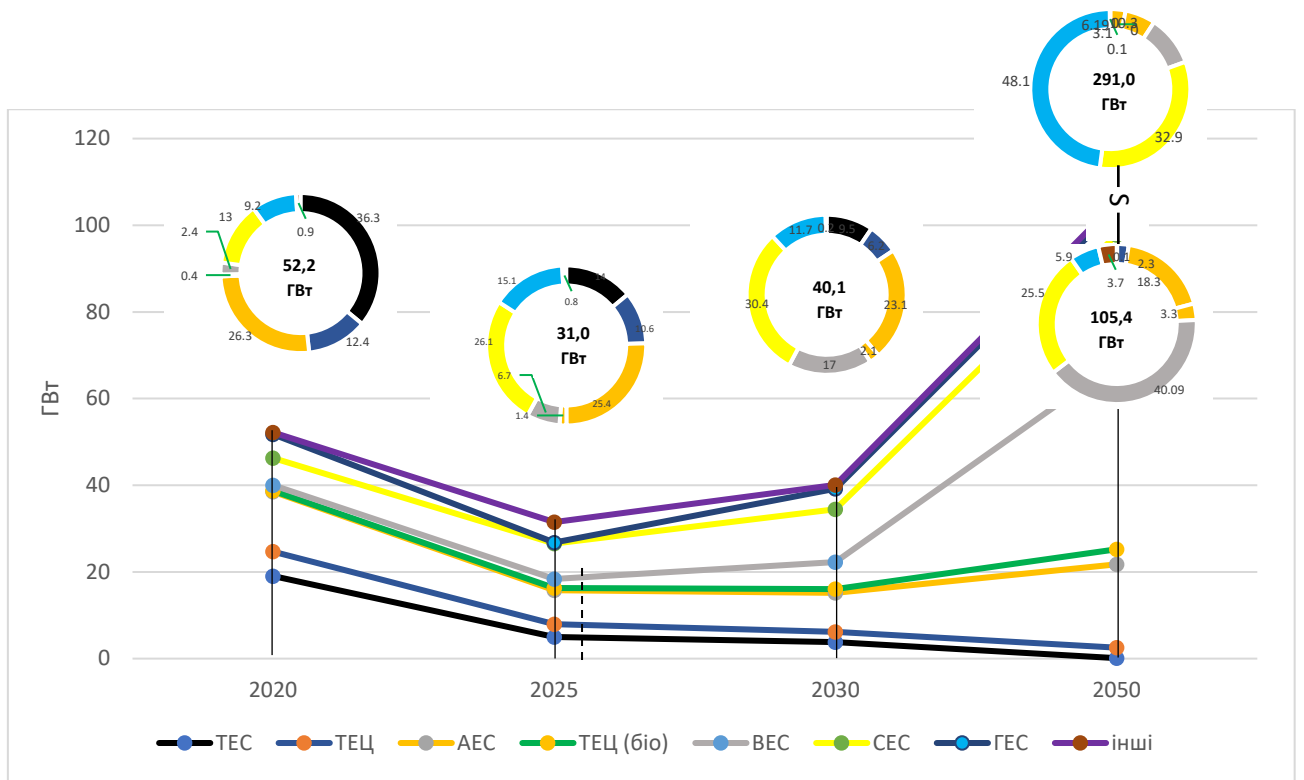


Рис. 1.5 Встановлена потужність (експертна оцінка)

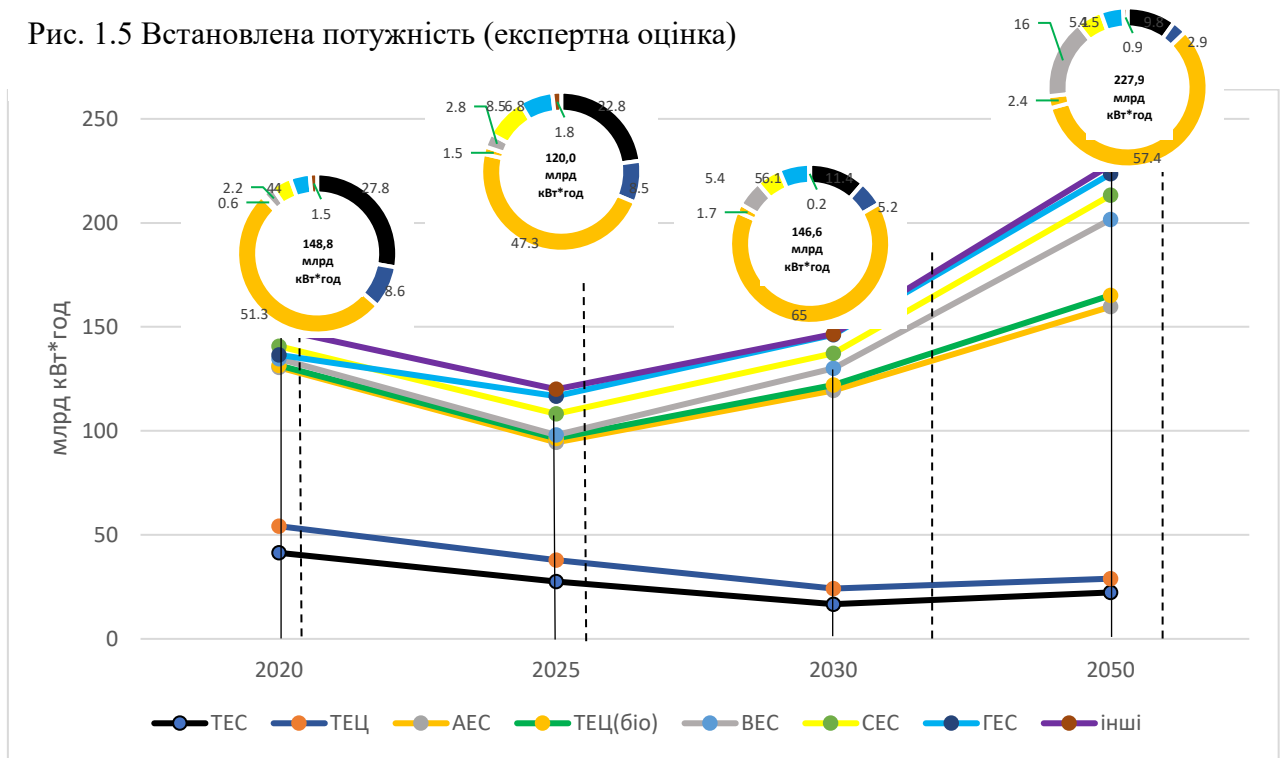


Рис. 1.6 Виробіток електроенергії (експертна оцінка)

Отже, в рамках виконання міжнародних зобов'язань в Україні:

- прийнято Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року;
- прийнято Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» із встановленими цілями до 2030 року та кліматичною нейтральністю до 2050 року;
- НЕК«Укренерго» приєдналося до механізму міждержавної компенсації (МТК) з 1 липня 2024 року;
- створено електронний реєстр Гарантій походження електроенергії, виробленої з відновлювальних джерел енергії (далі - ВДЕ) та запроваджено процес їх видачі Регулятором;
- усі сегменти ринків продовжують працювати, незважаючи на значну шкоду, завдану українській енергосистемі російською військовою агресією;
- прийнято закон про об'єднання енергоринків України та ЄС.

У 2022 р. було створено Фонд енергетичної підтримки України, що управляється Секретаріатом Енергетичного Співтовариства для відновлення критичної енергетичної інфраструктури України, в умовах широкомасштабних відключень та перебоїв у постачанні електроенергії внаслідок російських атак. Станом на кінець грудня 2024 р. сума внесків у фонд перевищила 1 млрд євро, наданих 30 донорами, включно з шістьма компаніями та недержавними організаціями. Внески до Фонду дали можливість фінансувати договори поставки для 56 енергетичних компаній, розташованих у 21-му регіоні України, придбати обладнання для розподіленої генерації, а також закупити необхідне обладнання для централізованого теплопостачання великих міст.

РОЗДІЛ 2

ПЕРЕГЛЯД ПОЛІТИКИ ТА ПОТОЧНИХ ІНІЦІАТИВ ЄС ЩОДО АДАПТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ

2.1. Політика ЄС щодо запобіганню зміні клімату

Європейський зелений курс²⁰ (ЄЗК, англ. - European Green Deal), офіційно представлений Європейською Комісією у Європарламенті 11 грудня 2019 р., є комплексом заходів, спрямованих на перетворення Європи на кліматично-нейтральний континент до 2050 р. Для цього передбачається скорочення на 55 % викидів парникових газів у ЄС до 2030 р. порівняно з рівнем 1990 р. ЄЗК визначає політику ЄС на найближчі роки у таких сферах як клімат, енергетика, біорізноманіття, промислова політика, торгівля тощо.

У червні 2021 р. Європейська Рада ухвалила запропонований Єврокомісією Європейський кліматичний закон (Регламент 2021/1119) (2021)²¹ (англ. - European climate law), що встановлює нову, амбітнішу мету скорочення викидів парникових газів щонайменше на 55 % до 2030 р. порівняно з рівнем 1990 р. Закон передбачає досягнення нульових викидів парникових газів для країн ЄС у цілому, переважно у спосіб скорочення викидів парникових газів, інвестицій в екологічні технології та в охорону навколишнього природного середовища; гарантує, що політика ЄС сприятиме досягненню цієї мети, а також, що всі сектори економіки та суспільства відіграють свою роль.

Європейський кліматичний закон охоплює заходи для відстеження прогресу та відповідного коригування дій на основі чинних систем, таких як процес управління національними енергетичними та кліматичними планами держав-членів, регулярні звіти Європейського агентства з навколишнього середовища та останні наукові дані про зміну клімату та її вплив. Прогрес в реалізації цього закону переглядатиметься кожні п'ять років відповідно до

²⁰ The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent.
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

²¹ European climate law. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum:4536626>

глобальних аналізів за Паризькою угодою. До вересня 2023 р., а потім кожні п'ять років, ЄК оцінюватиме узгодженість заходів ЄС та окремих держав. Також ЄК уповноважена надавати рекомендації державам-членам, дії яких несумісні з ціллю нейтральності клімату, а держави-члени будуть зобов'язані належним чином враховувати ці рекомендації або обґрунтовувати їх невиконання. Держави-члени також мають розробити та впровадити стратегії адаптації для посилення стійкості та зменшення вразливості до наслідків зміни клімату.

Європейська Комісія 14 липня 2021 р. презентувала програму боротьби зі зміною клімату до 2050 р., що отримала назву «Fit for 55»²². Передбачено, що заходи цієї програми дозволять скоротити викиди двоокису вуглецю в усіх сегментах європейської економіки, включно з виробництвом електроенергії, автомобільним і житловим секторами, а також судноплавством, авіацією та сільським господарством, забезпечити адаптацію до зміни клімату та інтеграцію пріоритетів кліматичної політики з програмами соціально-економічного розвитку країни.

На виробництво та використання енергії припадає 75 % викидів у ЄС, тому прискорення переходу до екологічно чистої енергетичної системи є вирішальним. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001²³ про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел встановлює підвищену мету: виробляти 40 % енергії з ВДЕ до 2030 р. Усі держави - члени мають сприяти цій меті, а також запропонувати конкретні цілі щодо використання відновлюваної енергії у транспорті, опаленні та охолодженні, будівлях та промисловості. Для досягнення кліматичних та екологічних цілей посилюються критерії стійкості використання біоенергетики, і держави-члени мають розробити прийнятні схеми підтримки біоенергетики з дотриманням

²²Fit for 55. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>

²³ Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_039-18#Text

каскадного принципу (енергія з біомаси має вироблятися у спосіб, що мінімізує надмірний руйнівний вплив на ринок біомаси та шкідливий вплив на біорізноманіття).

Щоб компенсувати значні витрати на запобігання зміні клімату у бюджеті ЄС, держави-члени повинні витратити всю свою виручку від торгівлі викидами парникових газів на проєкти, пов'язані з кліматом та енергетикою.

Щоб зменшити загальне споживання енергії, скоротити викиди та подолати енергетичну бідність, Директива Європейського Парламенту і Ради 2012/27/ЄС про енергоефективність²⁴ встановить амбіційніші щорічні цілі зменшення споживання енергії на рівні ЄС. Це допоможе визначити національні внески та майже подвоїть річні зобов'язання щодо економії енергії для держав-членів. Державний сектор повинен буде щороку реконструювати 3% своїх будівель, щоб запровадити проєкти реконструкції, створити робочі місця, зменшити використання та витрати енергії.

Система оподаткування енергоносіїв має захищати та вдосконалювати єдиний ринок ЄС та підтримувати зелений перехід, встановлюючи правильні стимули. Перегляд Директиви Європейської Ради 2003/96/ЄС про реструктуризацію рамок Співтовариства щодо оподаткування енергетичних продуктів та електроенергії²⁵ пропонує узгодити оподаткування енергетичних продуктів з енергетичною та кліматичною політикою ЄС, сприяти чистим технологіям, скасовувати застарілі пільги та знижені ставки, які наразі заохочують використання викопного палива. Нові правила спрямовані на зменшення шкідливих наслідків конкуренції з оподаткування енергоносіїв, забезпечують доходи держав-членів від зелених податків, які є менш шкідливими для зростання, ніж податки на працю.

Таким чином, загальні цілі ЄС у контексті запобігання зміні клімату:

²⁴ Директива Європейського Парламенту і Ради 2012/27/ЄС про енергоефективність.
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_017-12#Text

²⁵ Директива Європейської Ради 2003/96/ЄС про реструктуризацію рамок Співтовариства щодо оподаткування енергетичних продуктів та електроенергії.
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_015-03#Text

1. Кліматична нейтральність до 2050 р. – мета, закріплена в Європейському кліматичному законі.
2. Скорочення викидів парникових газів – на 55% до 2030 р. (порівняно з рівнем 1990 року).
3. Підвищення частки ВДЕ – до 42,5% до 2030 р.
4. Збільшення енергоефективності – зниження загального споживання енергії на 11,7% до 2030 р.

2.2. Політика ЄС з адаптації енергетичного сектору до зміни клімату

Внаслідок реалізації наведених вище напрямів та задач декарбонізації енергетичного сектору буде відбуватись трансформація паливно-енергетичного комплексу країн ЄС шляхом збільшення електрифікації; безвуглецевого виробництва; збільшення обсягів виробництва електроенергії з ВДЕ; інтеграції енергетичного сектору в загальну економіку країн ЄС.

Однак існують ризики зміни клімату та обумовлені ними природні явища, які негативно впливають для енергетичний сектор, а саме: екстремальна спека; сильні опади; повені; посуха; підвищення рівня моря, лісові пожежі тощо. На поточний час серйозні кліматичні ризики досягли критичного рівня і спостерігаються на всіх континентах земної кулі. Енергетична інфраструктура Європи не розрахована на прогнозований вплив зміни клімату, крім того ризик для енергопостачання може поширитися на інші сектори економіки країн ЄС.

Політика ЄС щодо адаптації енергетики до зміни клімату є ключовим елементом широкої кліматичної стратегії ЄС. Вона спрямована на підвищення стійкості енергетичних систем до наслідків зміни клімату, таких як екстремальні погодні явища, підвищення температури, посухи та повені. Адаптація енергетики передбачає дії щодо захисту енергетичної інфраструктури та зміни підходів до виробництва, передачі та споживання енергії.

Основні напрями ЄС політики з адаптації енергетики до змін клімату:

1. Інтеграція адаптації до енергетичної політики (планування) на всіх рівнях: Включення кліматичних ризиків до енергетичної стратегії та інфраструктурних проектів. Обов'язкове кліматичне тестування під час проектування та модернізації об'єктів енергетики.

2. Розвиток сталої енергетичної інфраструктури:

- *модернізація мереж*: підвищення стійкості електричних мереж до ураганів, екстремальної спеки або холоду;

- *децентралізація енергетики*: розвиток локальних, поновлюваних джерел енергії (сонячні панелі, вітрові турбіни, біомаса) зменшує залежність від великих, вразливих об'єктів;

- *інвестиції в "розумні мережі"* (smart grids), які гнучко реагують на зміни попиту та пропозиції.

3. Розвиток відновлюваних джерел енергії:

- *сталі ВДЕ* не тільки знижують викиди парникових газів, але й більш адаптивні до кліматичних ризиків (наприклад, геотермальна енергія менш схильна до погодних аномалій);

- *створення інфраструктури ВДЕ* з урахуванням кліматичних ризиків (наприклад, стійкі до бурі вітряки, сонячні панелі з термостійкістю тощо).

4. Фінансування та підтримка досліджень:

- *програма Horizon Europe* фінансує дослідження в галузі стійких енергетичних технологій та кліматичної адаптації;

- *створення Європейського кліматичного банку* та інвестиції через Європейський інвестиційний банк (ЄІБ) в адаптаційні заходи;

- *інструмент "Connecting Europe Facility"* підтримує стійкі енергетичні інфраструктури;

- *Фонд модернізації та інновацій* фінансує перехід до "зеленої" енергетики в уразливих країнах ЄС;

- *механізм справедливого переходу* допомагає регіонам, що залежать від вуглецевих копалин.

5. Співпраця на національному та регіональному рівнях:

- ЄС вимагає від країн-членів включення кліматичної адаптації до *Національних енергетичних та кліматичних планів (NECP)*;

- *підтримка транскордонних ініціатив*, наприклад, щодо об'єднання електромереж та координації адаптаційних заходів у прикордонних регіонах.

6. Моніторинг та оцінка вразливості:

- впровадження технологій *прогнозування кліматичних впливів* за допомогою штучного інтелекту.

- розроблення інструментів (наприклад, Climate-ADAPT – онлайн-платформа), які допомагають аналізувати вразливість енергетики до кліматичних змін та планувати заходи з адаптації.

2.3. Огляд основних документів ЄС щодо адаптації енергетичного сектору до зміни клімату

Ключові документи та ініціативи ЄС щодо запобігання змінам клімату та адаптації енергетичного сектору до цих змін взаємопов'язані між собою та є наступними:

- *Європейський кліматичний закон* (Регламент 2021/1119) (2021)²⁶ встановлює кліматичну нейтральність (скорочення викидів до нульового рівня) як юридично обов'язкову мету, що стимулює трансформацію всіх секторів, включаючи енергетичний сектор, до стійких та низьковуглецевих систем. Регламент встановлює рамки для незворотного та поступового скорочення антропогенних викидів парникових газів із джерел та збільшення абсорбції поглиначами, а також юридично обов'язкові кліматичні цілі ЄС. Також встановлює юридично обов'язкову кліматичну ціль на 2030 р. — скорочення викидів парникових газів на 55% (разом із цілями щодо ВДЕ та енергоефективності на 2030 рік). Адаптація до змін клімату є основним компонентом. ЄК має прийняти стратегію ЄС щодо адаптації. Кожна країна-

²⁶ European climate law. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum:4536626>

член ЄС має прийняти та впровадити національні стратегії адаптації, які повинні передбачати:

- вимоги інтеграції зусиль з адаптації до зміни клімату та пом'якшення його наслідків у відповідну політику, при проектуванні проектування енергетичної інфраструктури;

- вимоги встановлення багаторівневого діалогу з питань клімату та енергетики;

- вимоги *Пакету "Fit for 55"* (2021)²⁷ щодо заходів з прискорення енергетичного переходу шляхом перегляду й оновлення законодавства ЄС і впровадження нових ініціатив з метою забезпечення відповідності політики ЄС кліматичним цілям, погодженим Радою Європейського Союзу та Європейським парламентом.

- вимоги *Зелений курс ЄС* (European Green Deal)²⁸ – як стратегічну рамку сталого розвитку, яка передбачає набір політичних ініціатив, висунутих Європейською Комісією з загальною метою зробити Європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року.

- вимоги *EU Strategy on Adaptation to Climate Change* (2021)²⁹ щодо — необхідності адаптації до змін клімату всіх секторів ЄС, включаючи енергетику. Передбачає підвищення готовності та можливостей реагування на наслідки зміни клімату на місцевому, регіональному, національному та рівні ЄС, розробку узгодженого підходу та покращення координації. Стратегія враховує глобальні наслідки зміни клімату, такі як перебої в ланцюгах поставок або порушення доступу до сировини, енергії та продовольства, а також їхні наслідки для ЄС. Тому цей документ визначає рамки та механізми для підвищення готовності ЄС до поточних та майбутніх наслідків зміни

²⁷ Fit for 55. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>

²⁸ The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

²⁹ EU strategy on adaptation to climate change . https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en

клімату на новому рівні. Він створює основу для прийняття більш обґрунтованих рішень щодо адаптації в найближчі роки.

- вимоги *TEN-E Regulation*³⁰ — оновлений регламенту з трансєвропейських енергетичних мереж (2022), що передбачає стійкість проектів до кліматичних ризиків. Трансєвропейські енергетичні мережі (The Trans-European Networks for Energy, TEN-E), вперше прийняті у 2013 р. відповідно до Регламенту (ЄС) № 347/2013 (старий TEN-E), зосереджені на об'єднанні енергетичної інфраструктури країн ЄС шляхом встановлення правил для своєчасного розвитку та сумісності трансєвропейських енергетичних мереж. Регламент визначає відповідні категорії інфраструктури, пов'язані з електроенергією, накопиченням енергії, інтелектуальними електричними мережами, морськими мережами, воднем, електролізерами, транскордонною мережею вуглекислого газу та інтелектуальними газовими мережами. Основне обґрунтування полягає в тому, щоб заохочувати та сприяти співпраці країн у напрямку розвитку більш взаємопов'язаних енергетичних мереж, а також передбачати варіанти фінансування нової енергетичної інфраструктури. Новий TEN-E Regulation (2022) встановлює керівні принципи для своєчасного розвитку та сумісності енергетичної інфраструктури, пріоритетних коридорів та зон, що сприяють досягненню цілей щодо пом'якшення наслідків зміни клімату. Регламент також має на меті забезпечення взаємозв'язків, енергетичної безпеки, інтеграції ринку та систем, а також конкуренції, що вигідно всім державам-членам, а також доступності цін на енергоносії. Європейське кліматичне законодавство регулює ціль стійкості з точки зору адаптації до клімату відповідно до Паризької угоди³¹.

³⁰ Regulation (EU) 2022/869 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2022 on guidelines for trans-European energy infrastructure, amending Regulations (EC) No 715/2009, (EU) 2019/942 and (EU) 2019/943 and Directives 2009/73/EC and (EU) 2019/944, and repealing Regulation (EU) No 347/2013 <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/869/oj/eng>

³¹ Паризька угода. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text

- вимоги Регламент про управління (ЄС) 2019/1999: НПЕК та звітність³² вимагає інтегрованої звітності з питань енергетики та клімату за 5 вимірами: декарбонізація, енергоефективність, енергетична безпека, внутрішні енергетичні ринки та дослідження, інновації та конкурентоспроможність.

Національний план з енергетики та клімату (НПЕК) є фундаментальним документом планування, який поєднує цілі, політику та заходи держав-членів для досягнення їхніх кліматичних та енергетичних зобов'язань. Доручає державам-членам включати заходи щодо стійкості до клімату в НПЕК для захисту критичної інфраструктури. Що стосується наряду енергетичної безпеки, НПЕК повинен включати національні цілі щодо:

- збільшення диверсифікації джерел енергії та поставок з третіх країн, метою яких може бути зменшення залежності від імпорту енергії;
- підвищення гнучкості національної енергетичної системи;
- вирішення проблеми обмеженого або перерваного постачання джерела енергії з метою підвищення стійкості регіональних та національних енергетичних систем, включаючи часові рамки досягнення цілей.

Інтегрована звітність за НПЕК, включаючи енергетичну безпеку, забезпечує періодичний моніторинг, звітність та процеси перегляду, щоб забезпечити відповідність прогресу в адаптації інфраструктури кліматичним цілям ЄС: Впроваджувальний регламент 2020/1208³³ визначає структуру, формат, процеси подання та перегляду інформації про адаптацію). Інформація про національні дії з адаптації повинна включати огляд спостережуваних та ідентифікацію ключових майбутніх кліматичних небезпек (пов'язаних з

³² Governance Regulation (EU) 2019/1999: NECPs and reporting. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj/eng>

³³ Implementing Regulation 2020/1208. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/1208/oj/eng

температурою; пов'язаних з вітром; пов'язаних з водою та твердими масами), а також вразливість та адаптивну здатність.

Законодавство ЄС щодо енергетичного ринку³⁴ не визначає стійкість спеціально для енергетичного сектору, однак є загальний регламент щодо стійкості секторів економіки.

Регламент про готовність до ризиків (ЄС) 2019/941³⁵ має на меті забезпечення безперервності та надійності електропостачання під час екстремальних погодних явищ та встановлює правила співпраці між державами-членами ЄС та договірними сторонами для запобігання та підготовки до криз електропостачання і управління ними. Схему регулювання готовності до ризиків представлено на рис.2.1.



Рис. 2.1 - Регулювання готовності до ризиків

В регламенті 2019/941 визначається поняття «криза електропостачання», що є поточна або неминуча ситуація, за якої існує значний дефіцит електроенергії, як описано в планах готовності до ризиків, або за якої

³⁴ Electricity market design. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/electricity-market-design_en

³⁵ Risk Preparedness Regulation (EU) 2019/941. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/941/oj/eng>

неможливо постачати електроенергію споживачам. Криза може виникнути внаслідок стихійних лих та екстремальних погодних умов.

Пропозиція ENTSO-E³⁶ (методологія, затверджена ACER³⁷), що визначає регіональні сценарії криз електропостачання: охоплює такі ризики, як рідкісні та екстремальні природні лиха. ENTSO-E визначає регіональні кризові сценарії та оцінює сезонну та короткострокову адекватності, які передбачають суворі погодні умови. Компетентні органи визначають національні кризові сценарії та плани готовності до ризиків з регіональною співпрацею та враховують контекст третіх країн.

На основі сценаріїв криз електропостачання розробляються плани з чітко визначеними, прозорими, пропорційними та недискримінаційні національні, регіональні та двосторонні заходи:

- раннє попередження про потенційну та оголошену кризу електроенергетики, обмін інформацією та прозорість;
- співпраця між сторонами співробітництва є обов'язковою;
- співпраця сторін співробітництва – країн-членів є можливою.

Методологія ENTSO-E для визначення сценаріїв регіональних криз електроенергетики (зі змінами, внесеними у 2024 р.)³⁸ передбачає урахування наступних кліматичних небезпек: повені; посуха та пов'язана з нею нестача води; екстремальні погодні умови (включаючи шторми, екстремальні вітри, крижані бурі, снігопади, сильні опади, урагани, періоди похолодання, хвилі спеки); лісові пожежі; сейсмічна та вулканічна активність; інфекційні загрози, включно з пандемією; небезпеки космічної погоди.

³⁶ ENTSO-E (англ. European Network of Transmission System Operators for Electricity) — *Європейська мережа системних операторів передачі*

³⁷ ACER (*Агентство Європейського Союзу по співпраці органів регулювання енергетики*)

³⁸ Methodology to Identify Regional Electricity Crisis Scenarios in accordance with Article 5 of the REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on risk-preparedness in the electricity sector and repealing Directive 2005/89/EC URL: [https://acer.europa.eu/sites/default/files/documents/en/Electricity/CLEAN ENERGY PACKAGE/Documents/Methodology%20to%20Identify%20Regional%20Electricity%20Crisis%20Scenarios%20in%20accordance%20with%20Article%205%20of%20the%20Regulation_200106_submitted%20to%20ACER.pdf](https://acer.europa.eu/sites/default/files/documents/en/Electricity/CLEAN%20ENERGY%20PACKAGE/Documents/Methodology%20to%20Identify%20Regional%20Electricity%20Crisis%20Scenarios%20in%20accordance%20with%20Article%205%20of%20the%20Regulation_200106_submitted%20to%20ACER.pdf)

Методологія ENTSO-E для короткострокових та сезонних оцінок адекватності (2020 р.) охоплює такі невизначеності:

- ймовірність відключень елементів передачі;
- ймовірність незапланованих відключень енергоблоків;
- мінливість попиту, зокрема піки залежно від умов погоди ;
- мінливість виробництва енергії з відновлюваних джерел енергії;
- мінливість умов погоди та їхній вплив на попит та пропозицію.

Сезонні перспективи ENTSO-E досліджують на загальноєвропейському рівні безпеку електропостачання напередодні кожного зимового та літнього періодів³⁹. Зимовий прогноз ENTSO-E на 2024-2025 рр. включає Національні плани готовності до ризиків держав-членів ЄС, а також очікування щодо енергосистем України і Молдови, згідно *Директиві (ЄС) 2019/944 про електроенергію*⁴⁰ та *Національного десятирічного плану розвитку мережі ENTSO-E (TYNDP)*⁴¹. Передбачається забезпечення узгодженості TYNDP з загальносоюзним TYNDP та НПЕК. Оператори транспортних систем повинні включати до свого плану розвитку мережі заходи, здатні гарантувати «адекватність системи та безпеку постачання», щоб уникнути непотрібного розширення системи та передбачити споживання та транскордонну торгівлю. Оператори розподільчих систем у своєму плануванні мережі повинні підтримувати інтеграцію ВДЕ, сприяти розвитку накопичувачів енергії, реагування на попит та електрифікації транспортного сектору, а також надавати користувачам системи належну інформацію про очікуване розширення або модернізацію.

³⁹ Risk preparedness plans in the electricity sector by national competent authorities and Commission's opinions.URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-electricity-supply/risk-preparedness-plans-electricity-sector-national-competent-authorities-and-commissions-opinions_en

⁴⁰ Electricity Directive (EU) 2019/944. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj/eng>

⁴¹ Ten-Year Network Development Plans ENTSO-E. Final Scenarios Report. January 2025. URL: <https://2024.entsos-tyndp-scenarios.eu/>

Визначаються наступні критерії для розробки планів:

- важливість оцінки ризиків відсутності стійкості та необхідність інвестицій, пов'язаних зі стійкістю;
- оцінки операторів базуються на методологіях, які все частіше посиляються на стійкість, навіть безпосередньо;
- «кліматична стійкість» іноді згадується в методологіях оцінки, але «стійкість» є найбільш використовуваною концепцією для працездатності мережі;
- стійкість до природних збоїв буде частково вирішена шляхом забезпечення адекватності системи.

*Регламент TEN-E (ЄС) 2022/869*⁴² визначає положення, спрямовані на забезпечення своєчасного розвитку сумісних енергетичних мереж ЄС, має на меті підвищення стійкості енергетичної інфраструктури до неминучих наслідків зміни клімату визначає адаптацію до клімату як процес, що забезпечує досягнення стійкості енергетичної інфраструктури до потенційних негативних наслідків зміни клімату шляхом оцінки кліматичної вразливості та ризиків, зокрема за допомогою відповідних заходів адаптації.

TYNDP є основою для вибору проектів спільного інтересу (PCI) та проектів взаємного інтересу (PMI), які мають право на доступ до фінансування ЄС та прискорених процедур отримання дозволів. Проекти сприятимуть пом'якшенню наслідків зміни клімату та досягненню цілей ЄС у сфері енергетики та клімату на 2030 р. і в перспективі мети кліматичної нейтральності на 2050 р.

Критерії відбору проектів (Додаток IV до Регламенту TEN-E (ЄС) 2022/869) наступні:

- щодо електроенергії: безпека постачання, сумісність та безпечна робота системи, виміряні відповідно до аналізу, проведеного в останньому доступному загальносоюзному TYNDP в електроенергетиці з урахуванням

⁴² TEN-E Regulation (EU) 2022/869. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/869/oj/eng>

очікуваних змін екстремальних погодних явищ, пов'язаних з кліматом, та їх впливу на стійкість інфраструктури;

– щодо водневого напрямку: безпека постачання та гнучкість, що вимірюється шляхом розрахунку додаткової цінності проекту для стійкості, різноманітності та гнучкості постачання водню.

Наводяться різні аспекти стійкості та вразливості енергетичної інфраструктури внаслідок кліматичної небезпеки:

– для ТЕС – внаслідок вищої температури повітря та зниження доступності води відбувається зниження ефективності електростанцій;

– для ГЕС – внаслідок зміни (зменшення) опадів відбувається зменшення генеруючої потужності;

– для електромережі – підвищення температури, повені, шторми, лісові пожежі обумовлюють нижчу ефективність, ризик фізичних пошкоджень, перебоїв;

– для попиту на енергію - підвищення температури повітря та частіші хвилі спеки обумовлюють збільшення пікового попиту.

Для аналізу оцінки відбору проектів ЄС використовується чутливість різних типів критичної інфраструктури в Європі до кліматичних небезпек (див. таблицю 2.1).

Таблиця 2.1 - Чутливість різних типів критичної інфраструктури в Європі до кліматичних небезпек⁴³

Сектор	Тип інфраструктури	Хвилі тепла	Хвилі холоду	Посухи	Лісові пожежі	Річкові та прибережні повені та паводки	Сильні вітри
Енергетика	Викопні та атомні електростанції	Середній	Низький	Середній	Низький	Середній	Середній

⁴³ European climate risk assessment (EUCRA) ([ЄАОС, Європейська оцінка кліматичних ризиків, 2024](https://www.researchgate.net/publication/381011201_European_climate_risk_assessment_EUCRA)). DOI: [10.2800/204249](https://www.researchgate.net/publication/381011201_European_climate_risk_assessment_EUCRA)
https://www.researchgate.net/publication/381011201_European_climate_risk_assessment_EUCRA

	Біомасні та геотермальні електростанції	Середній	Середній	Високий	Високий	Середній	Низький
	Гідроелектростанції	Низький	Середній	Високий	Низький	Середній	Низький
	Сонячні електростанції	Ні	Середній	Ні	Низький	Низький	Низький
	Вітрові електростанції	Ні	Низький	Ні	Низький	Низький	Високий
Електромережі		Низький	Середній	Ні	Високий	Середній	Високий
Газопроводи		Ні	Низький	Ні	Високий	Низький	Ні

Аналіз витрат і вигод (ABB)⁴⁴ має вирішальне значення для інвестицій у мережі передачі та розподілу, оскільки він полягає у зважуванні витрат на конкретний проект та вигод.

Регламент TEN-E вимагає від ENTSO-E та ENTSO-G:

- розробити узгоджені проекти методологій для окремих секторів для гармонізованого АВВ для всієї енергетичної системи на рівні Союзу;
- спільно подати Комісії та ACER узгоджену та поступово інтегровану модель, яка забезпечить узгодженість між методологіями для окремих секторів;
- розробити спільні сценарії на основі рамок рекомендацій, опублікованих ACER (з довгостроковою перспективою та узгодженими з цілями);
- після розробки сценаріїв опублікувати звіти про прогалини в інфраструктурі, розроблені в рамках загальносоюзного TYNDP.

Європейська науково-консультативна рада оцінила проекти спільних сценаріїв та рекомендувала:

- а) ENTSO повинні враховувати кліматичні ризики у своїх сценаріях, щоб підвищити стійкість енергетичної інфраструктури ЄС до негативних наслідків зміни клімату;
- б) сценарії недостатньо враховують основні кліматичні ризики для інфраструктури, такі як посухи та повені;

⁴⁴ Cost-benefit analysis (CBA) URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cost-benefit-analysis>

в) кліматичні сценарії базуються на застарілих кліматичних даних та не враховують майбутні кліматичні тенденції;

г) сценарії враховують негативний вплив погодних умов лише на вітрову та сонячну енергетику, а не на всю енергетичну інфраструктуру.

Планування енергетичних мереж в ЄС здійснюється, зокрема, через TYNDP (Десятирічний план розвитку мереж) для всього ЄС, а також через визначення життєвого циклу проєктів передачі електроенергії. Це передбачає розроблення національних планів розвитку мереж у рамках ENTSO-E. Водночас Директива щодо стійкості критичних суб'єктів наразі ще не є юридично обов'язковою, однак її положення можуть застосовуватися при визначенні критичних суб'єктів інфраструктури.

*Директива (ЄС) 2022/2557 про стійкість критично важливих об'єктів*⁴⁵ встановлює зобов'язання для держав-членів ЄС вживати конкретних заходів для забезпечення безперешкодного надання основних послуг для підтримки життєво важливих суспільних функцій або економічної діяльності на внутрішньому ринку. Ця Директива створює загальну систему, яка враховує стійкість критично важливих об'єктів до всіх небезпек: природних чи техногенних, випадкових чи навмисних. Делегований Регламент ЄК (25 липня 2023 р.), що встановлює перелік основних послуг, зокрема в енергетичному секторі.

2.4. Аналіз взаємозв'язків, завдання та ролі в законодавстві ЄС

Законодавство ЄС у сфері клімату та енергетики — це складна система взаємопов'язаних нормативних актів, яка формує Європейську енергетичну політику в межах Європейського зеленого курсу. Воно спрямоване на декарбонізацію, зміцнення енергетичної безпеки, розвиток стійких інфраструктур та реагування на ризики. На рис.2.2 представлено ключові

⁴⁵ Critical Entities Resilience Directive (CER) Directive (EU) 2022/2557 URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj/eng>

зв'язки між окремими напрямами законодавства, що стосується Європейської енергетичної політики в межах Європейського зеленого курсу.

Кліматичне законодавство («Клімат») включає Європейський кліматичний закон (2021), який встановлює юридично зобов'язуючу ціль — вуглецева нейтральність до 2050 р. У ньому визначено, що енергетика є основною сферою скорочення викидів. Закон підтримується пакетом "Fit for 55" (підготовка до скорочення викидів на 55% до 2030 р.), що прямо пов'язує ринок електроенергії, мережі та інфраструктуру з кліматичними цілями. До цього напрямку законодавства також належать Стратегії адаптації до зміни клімату та Національні плани з енергетики та клімату.

Напрямок «Енергетика» включає Директиви про електроенергію та ринок електроенергії. Директива 2019/944 (Electricity Directive) є ключовою частиною Четвертого енергетичного пакета «Чиста енергія для всіх європейців», яка спрямована на створення гнучкого, конкурентного та інтегрованого ринку електроенергії. Вона забезпечує доступ третіх сторін, розділення постачання та передачі, розвиток розподіленої генерації (сонячна, вітрова). Ця Директива пов'язана з Директивами з енергоефективності та відновлюваної енергетики. До цього напрямку також належить законодавство, що стосується регулювання готовності до ризиків в електроенергетиці, зокрема Регламент (EU) 2019/941 про готовність до ризиків в електроенергетиці. Він координує міждержавні дії в разі перебоїв у постачанні первинних енергоносіїв, природних катастроф, кібератак, встановлює планування на випадок надзвичайних ситуацій, аналіз ризиків та співпрацю операторів систем передачі (TSO). Цей Регламент безпосередньо пов'язаний із законодавством про стійкість критичної інфраструктури (рис.2.2).

До законодавства про стійкість критичної інфраструктури «Стійкість» належить Директива про стійкість критичних об'єктів (CER Directive 2022/2557), яка набула чинності у 2023 р. і замінила Директиву 2008/114/ЕС. Вона охоплює енергетику, транспорт, водопостачання, цифрову інфраструктуру тощо. Ця директива вимагає від операторів критичних

об'єктів: оцінювати ризики (війна, тероризм, зміни клімату), розробляти плани безперервності діяльності, інформувати про інциденти і пов'язується із готовністю до ризиків в електроенергетиці та з законодавством у сфері кібербезпеки (NIS2).

Четвертим напрямком є законодавство, що стосується розвитку енергомереж TEN-E (Trans-European Energy Networks) і передбачає підтримку інфраструктурних проєктів спільного інтересу, інвестиції в інтерконектори, зберігання енергії, розумні мережі. Воно передбачає кліматичні критерії відповідності (проєкт не може суперечити цілям Європейського «зеленого» курсу), підтримує інтеграцію відновлюваних джерел і стійкість до ризиків, а також пов'язане з регламентами ACER/ENTSO-E щодо координації операторів (рис.2.2).

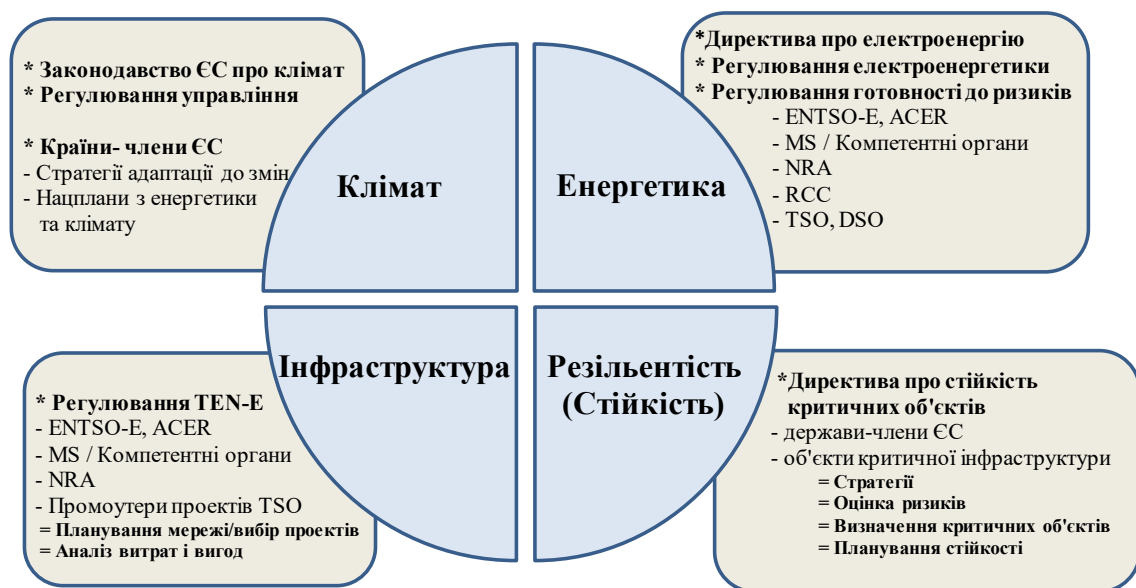


Рис. 2.2 - Взаємозв'язки, завдання та ролі в законодавстві ЄС

Регламенти ЄС (нормативні акти), представлені на рисунку 2.2, мають пряму дію та підлягають безпосередньому застосуванню в національних правопорядках держав-членів. Директиви ЄС підлягають транспозиції та подальшому впровадженню. Транспозиція законодавства є процесом прийняття, внесення змін або скасування національних правових норм з метою досягнення цілей, визначених актами законодавства ЄС. Вона може

здійснюватися шляхом адаптації національного законодавства, а не обов'язково дослівного відтворення тексту директиви. Перевагою транспозиції є її гнучкість, що дозволяє враховувати особливості національної правової системи при виконанні міжнародних зобов'язань.

2.5. Політика України з адаптації енергетичного сектору до зміни клімату

Пріоритети кліматичної політики України скориговані відповідно до основних законодавчих документів ЄС.

Україна тільки останнім часом активно включилася у формування власного зеленого курсу. При цьому формування державної кліматичної політики, гармонізованої з ЄЗК, передбачає перебудову власної економічної моделі та залучення масштабних інвестицій для модернізації енергетики України. Паралельно з декарбонізацією необхідно працювати над зменшенням енергоємності економіки, встановленням ринкових правил, справедливих ринків та збільшенням власного видобутку. З метою певної компенсації витрат на заходи з адаптації до зміни клімату необхідно запроваджувати дієві економічні механізми, спрямовані на реалізацію всієї виручки від торгівлі викидами на проєкти, пов'язані з кліматом та енергетикою. Це є також перспективним напрямом співпраці з ЄС у рамках «Fit for 55».

Реалізація цілей з декарбонізації економіки у рамках ЄЗК та Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди (НВВ2) потребуватиме залучення значних інвестицій. За розрахунками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, необхідна сума оцінюється у 102 млрд євро до 2030 р.⁴⁶.

Суттєвим внеском щодо реалізації кліматичної політики в Україні є прийняття на урядовому рівні програмних документів, зокрема розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. за № 587-р

⁴⁶ Аналітичний огляд Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/Analitychnyj-oglyad-NVV-lypen-2021.pdf>

щодо схвалення «Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року»⁴⁷ та розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року»⁴⁸.

Ці національні документи характеризуються наступними показниками:

- обмежений розгляд кліматичної вразливості;
- для досягнення мети зміцнення адаптивної здатності та стійкості соціальних, економічних та екологічних систем до зміни клімату, проведення секторальних досліджень з оцінки ризиків, вразливості та прогнозування зміни клімату в енергетичному секторі;
- впровадження Енергетичної стратегії України до 2050 року;
- підвищення гнучкості енергосистеми сприятиме зменшенню їхньої вразливості до фізичних та віртуальних загроз.

Закон України «Про ринок електричної енергії» (прийнятий у 13 квітня 2017 р. в редакції з доповненнями станом на 23 квітня 2026 р.) ще не повною мірою імплементує положення законодавства ЄС у сфері інтеграції електроенергетичних ринків:

- нормативно-правові акти щодо безпеки постачання електричної енергії, затверджені Міністерством енергетики, регулюють, зокрема, питання захисту об'єктів критичної інфраструктури;
- на їхній основі Міністерство енергетики щорічно здійснює оцінку ризиків для безпеки постачання електричної енергії на наступний період.
- до ризиків порушення безпеки постачання електричної енергії належать, зокрема, стихійні лиха та екстремальні погодні умови.

⁴⁷ Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80#Text>

⁴⁸ Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>

*Кодекс системи передачі електричної енергії*⁴⁹, розроблений НЕК «Укренерго», частково імплементує положення SO GL та ER NC. Зокрема, для оцінки короткострокової та сезонної адекватності оператор системи передачі враховує прогнозовані погодні умови та їх вплив на режими споживання електричної енергії, застосовує відповідні методології ENTSO-E, а також готує та подає відповідні сценарії до ENTSO-E.

Національний десятирічний план розвитку системи передачі (мережі)»
- непублічний через воєнний стан.

Концепція створення державної системи захисту критичної інфраструктури, схвалена Кабінетом Міністрів України на період до 2027 року⁵⁰, передбачає створення державної системи захисту критичної інфраструктури, спрямованої на забезпечення її стійкості до загроз усіх типів, зокрема природного і техногенного характеру, а також загроз, спричинених протиправними діями.

*Закон України про критичну інфраструктуру*⁵¹, включаючи енергетичну, визначає правові та організаційні засади створення та функціонування національної системи захисту критичної інфраструктури і є складовою законодавства у сфері національної безпеки.

⁴⁹ Про затвердження Кодексу системи передачі. Про затвердження Кодексу системи передачі <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>

⁵⁰ Про схвалення Концепції створення державної системи захисту критичної інфраструктури. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1009-2017-%D1%80#Text>

⁵¹ Про критичну інфраструктуру <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>

РОЗДІЛ 3

УТОЧНЕННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗАГРОЗ, ІНДИКАТОРІВ КЛІМАТИЧНИХ ЗАГРОЗ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ВИДОБУТКУ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА, АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ, ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, СОНЯЧНОЇ, ВІТРОВОЇ ТА БІОЕНЕРГЕТИКИ, МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЯК ПІДПАДАЮТЬ ПІД ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ

Кліматичні умови мають суттєвий вплив на всі етапи функціонування енергетичної системи. Виробництво, передача, споживання енергії, енергозбереження, а також видобування та транспортування палива — всі ці ланки енергетичних циклів прямо або опосередковано залежать від кліматичних чинників. Об'єкти та процеси в межах енергетичної інфраструктури функціонують у тісному зв'язку з погодними умовами, і будь-які зміни клімату можуть мати серйозні наслідки для їхньої надійності, ефективності та безпеки.

У зв'язку з цим надзвичайно важливо здійснювати уточнення кліматичних загроз та визначати відповідні індикатори для кожного з енергетичних секторів. Такий підхід дозволяє:

- ідентифікувати специфічні ризики для кожного циклу енергетичної системи;
- розробити адаптаційні стратегії, що враховують вплив саме тих кліматичних факторів, які є критичними для конкретного процесу;
- оптимізувати планування та інвестиції в енергетичну інфраструктуру, враховуючи сценарії змін клімату;
- підвищити стійкість енергетичної системи до екстремальних погодних явищ і довготривалих змін кліматичних умов.

Для кожного енергетичного циклу притаманні лише йому специфічні кліматичні впливи, які характеризуються окремими кліматичними

індикаторами. Наприклад, генерування енергії (теплові електростанції, ГЕС, ВДЕ) залежить від середньої за добу температури повітря, температури найхолоднішого періоду та окремих холодних п'ятиденків; температури найспекотнішого періоду та окремих спекотних п'ятиденків, повторюваності та інтенсивності небезпечних явищ погоди (гроз, граду, шквалу, дощу, снігопаду, ожеледі, налипання мокрого снігу, посух тощо). Робота ліній електропередачі (ЛЕП) та підстанцій піддається впливу ожеледно-вітрового навантаження; кількості днів із грозами, градом, шквалами, смерчами, сильними дощами та снігопадами; швидкост вітру та різких змін температури, які можуть спричинити пошкодження обладнання. Споживання електроенергії значною мірою визначається середньою температурою повітря протягом року; мінімальними та максимальними значеннями температури; сезонною амплітудою температур, що впливає на потреби в обігріві чи кондиціонуванні. Добування та транспортування палива (вугілля, газу, нафти) також залежать від кліматичних умов, зокрема, кількості опадів (які можуть ускладнювати доступ до родовищ); температурного режиму (що впливає на технічний стан транспортувальних систем); стану ґрунтів і дорожньої інфраструктури, що може змінюватися внаслідок підтоплень.

Уточнення кліматичних загроз та їхніх індикаторів дозволяє створити більш точну та адаптивну модель оцінки вразливості енергетичної системи, що є критично важливо в умовах посилення наслідків зміни клімату. Без такої деталізації заходи з адаптації залишатимуться загальними та менш ефективними.

Запропоновані в «Методичних рекомендаціях для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату»⁵² (Міндовкілля) можливі кліматичні загрози та

⁵² Про затвердження Методичних рекомендацій для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату

індикатори кліматичних загроз для енергетичного сектору потребують суттєвого доопрацювання з урахуванням національної науково-технічної документації.

Проведений аналіз метеорологічних та кліматичних чинників які впливають на об'єкти та всі етапи функціонування енергетичної системи дозволив виділити кліматичні загрози та індикатори кліматичних загроз для енергетичного сектору.. Перелік уточнених категорій, факторів та індикаторів кліматичних загроз для енергетичного сектору представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Можливі кліматичні загрози та індикатори кліматичних загроз для енергетичного сектору

Категорія	Фактор загрози	Індикатор
Температура повітря	Середня температура	Середня за рік, місяць, сезон температура повітря, °C
	Екстремальна температура	Максимальна та середня максимальна за рік, сезон, місяць температура повітря, °C
		Мінімальна та середня мінімальна за рік, сезон, місяць температура повітря, °C
		Температура найхолоднішого місяця, °C
		Температура найхолоднішої п'ятиденки за рік, °C
		Температура найтеплішого місяця, °C
		Температура найтеплішої п'ятиденки, °C
		Сильні та дуже сильні різкі міждобові зміни середньої за добу температури повітря, °C
		Добова амплітуда температури °C
		Річна амплітуда температури °C
		Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря яка перевищує 90 і 95 процентиль
		Кількість днів з мінімальною за добу температурою повітря яка нижче 10 і 5 процентиль
		Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 25°C і вище
		Максимальна тривалість безперервного періоду з максимальною за добу температурою повітря 25°C і вище

(затверджено наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 03.06.2023 № 386) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text>

		Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря від 30 до 34°C. Відсоток днів з максимальною за добу температурою 30°C і вище, %.
		Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище
		Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 40°C і вище
		Кількість днів з мінімальною за добу температурою повітря -20°C і нижче
		Кількість днів з мінімальною за добу температурою повітря -30°C і нижче
		Хвиля спеки: послідовна кількість днів(пять днів і більше) з максимальною за добу температурою яка перевищує 95 процентиля. Повторюваність хвиль спеки, їхня інтенсивність та потужність
		Хвиля холоду: послідовна кількість днів (пять днів і більше) з мінімальною за добу температурою яка менше 5 процентилю. Повторюваність хвиль холоду, їхня інтенсивність та потужність
	Теплозабезпеченість періоду	Величина градусоднів опалювального сезону
	Тривалість періодів	Величина градусоднів сезону кондиціонування
		Тривалість опалювального сезону з середньою за добу температурою повітря 10°C і нижче, 8 °C і нижче
		Тривалість холодного періоду з середньою за добу температурою повітря нижче 0 °C
		Тривалість літнього сезону з середньою за добу температурою повітря 15 °C і вище
		Тривалість періоду з активною вегетацією з середньою за добу температурою повітря 10°C і вище
Атмосферні опади	Кількість опадів	Кількість опадів за рік/ сезон/ місяць, мм Перерозподіл опадів протягом року
	Екстремальні опади	Максимальна кількість опадів за добу, за 12 годин і менше
		Максимальна кількість опадів за місяць
		Максимальна кількість опадів протягом 5 діб за рік, мм
		Максимальна кількість послідовних днів за рік з опадами за добу 1 мм і більше, 5 мм і більше, 10 мм і більше
		Загальна річна кількість опадів за дні, коли добова кількість опадів перевищує 95-й процентиль
		Загальна річна кількість опадів за дні, коли добова кількість опадів перевищує 99-й процентиль.
	Посухи	Максимальна тривалість бездощового періоду за місяць/сезон/рік

		Стандартизований індекс опадів (SPI) за місяць/сезон (SPI-1, SPI-3)
		Стандартизований індекс опадів - евапотранспірації (SPEI)
		Індекс посушливості Педя
		Гідротермічний показник Селянинова (ГТК)
	Лісопожежна посуха (пожежна небезпека)	Комплексний показник пожежної небезпеки за умов погоди
Вітер	Середня швидкість вітру	Середня за рік/місяць/ сезон швидкість вітру, м/с
		Міжрічна/ сезонна/ добова мінливість швидкості і напряму вітру
	Екстремальний вітер	Максимальна, середня максимальна за рік/місяць/ сезон швидкість вітру, м/с
		Кількість днів зі шквалом
		Кількість днів з швидкістю вітру 15 м/ с і більше
		Кількість днів з швидкістю вітру 25 м/ с і більше
Хмарність	Кількість загальної хмарності	Середня за рік, сезон, місяць загальна хмарність , бали
		Повторюваність ясного неба за рік, сезон, місяць за загальною хмарністю
Сонячна радіація	Сумарна сонячна радіація	Сума за місяць, сезон, рік сумарної сонячної радіації за ясного неба, МДж/м ²
Річний стік	Стрімкий раптовий підйом рівня води із затопленням прибережних територій (паводки)	Відносний рівень води у водному об'єкті, м Середньодобова витрата води у водотоку, м ³ /с
	Зміна режимів водопілля та межені	Дати початку та завершення водопілля Тривалість водопілля, діб Величина пікових витрати води під час водопілля, м ³ /с Витрата води водотоку в меженний період, м ³ /с Зміна внутрішньорічного розподілу річкового стоку
Небезпечні явища погоди	Складні відкладення ожеледі та паморозь, налипання мокрого снігу	Кількість випадків за рік зі складними відкладеннями ожеледі та паморозі, налипання мокрого снігу діаметром 11 мм і більше
	Ожеледь	Кількість випадків відкладень ожеледі діаметром 6 мм і більше за рік
	Гроза	Кількість днів з грозою за рік
	Град	Кількість днів з градом за рік. Кількість днів з градом діаметром 6 мм і більше за рік
	Смерч	Кількість смерчів на площі 1 млн, га за 30 років

Слід мати на увазі, що при прогнозуванні кліматичних ризиків у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі не всі із зазначених у табл.3.1 індикаторів кліматичних загроз для енергетичного сектору можуть бути обчислені за даними кліматичних моделей. Це стосується насамперед небезпечних явищ погоди. То ж це необхідно враховувати при виборі індикаторів для оцінки кліматичних ризиків підгалузей енергетики. Проте для оцінки їхніх ризиків у сучасний кліматичний період або в минулому їх можна використовувати.

РОЗДІЛ 4

ТЕНДЕНЦІЇ ЗМІНИ ІНДИКАТОРІВ КЛІМАТИЧНОЇ ЗАГРОЗИ ДЛЯ КОМПОНЕНТІВ ЕНЕРГЕТИКИ В КОРОТКОСТРОКОВІЙ ТА СЕРЕДНЬОСТРОКОВІЙ ПЕРСПЕКТИВІ ЗМІНИ ДО СЕРЕДИНИ ХХІ СТ.

4.1 Тенденції зміни індикаторів кліматичних загроз для компонентів енергетики України у сучасний кліматичний період (1991-2020 рр.)

Проведений аналіз кліматичних умов, що впливають на роботу енергетичної галузі України показав, що протягом останніх десятиліть відмічаються їхні суттєві зміни. Ці зміни можна оцінити порівнюючи між собою середні багаторічні значення за тридцятилітні періоди, так звані «кліматичні норми»⁵³ які є основою для планування в галузях економіки.

Встановлено, що протягом останніх десятиліть в Україні спостерігаються суттєві зміни кліматичної норми показників термічного режиму атмосфери, що впливають на роботу енергетичної галузі. Темпи підвищення температури повітря посилюються. Так, за даними NOAA⁵⁴ Україна належить до регіонів планети, де зміна середньої за рік температури повітря протягом останніх тридцяти років (1995-2024 рр.) відбувалась найвищими темпами (рис.4.1).

⁵³ <https://library.wmo.int/idurl/4/42558>

⁵⁴ <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413/global-temperature-trends-updated-through-2024>

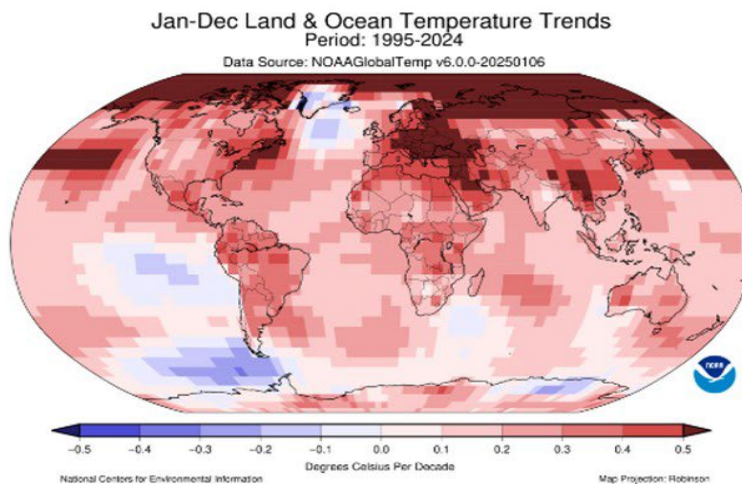


Рисунок 4.1 – Тренд середньої за рік приземної температури повітря у 1995-2024 рр. за даними NOAA⁵⁵

Значні зміни термічного режиму зумовили перехід аномалії середньої за рік температури повітря через 0 °С в Україні з кінця 90-х рр. XX століття (рис.4.2) .

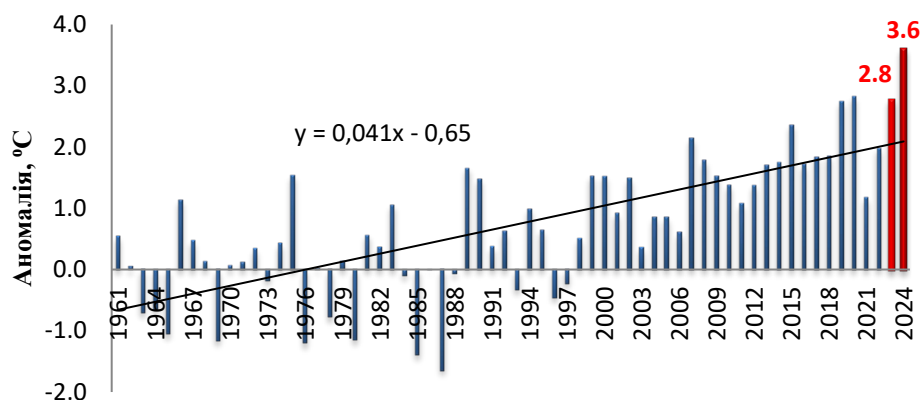
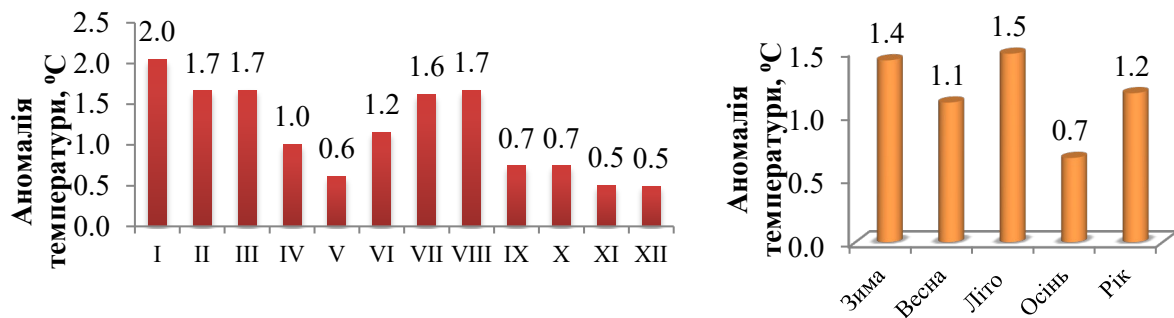


Рисунок 4.2 – Мінливість середньої за рік приземної температури повітря(T_{cp}) та її аномалій відносно базової кліматичної норми (1961-1990рр.) протягом 1961-2024 рр. в Україні⁵⁶

⁵⁵<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413/global-temperature-trends-updated-through-2024>

⁵⁶ З квітня 2014 року ДСНС України не має даних про погоду з мережі спостережень АР Крим та окремих регіонів Донецької і Луганської областей. Внаслідок великомасштабного вторгнення росії в Україну метеорологічні спостереження у 2024 році у зоні бойових дій та на окупованих територіях Харківської, Луганської, Донецької, Запорізької, Херсонської областей не проводились або проводились періодично. З АР Крим інформація знаходилась лише з 3 пунктів. Внаслідок цього встановити особливості кліматичних умов у 1991-2024рр. на всій території України неможливо. Виходячи із наявної інформації, достовірно визначити особливості кліматичних умов у цей період, можна лише для західного, центрального та північного регіонів України, а також для Одеської та Миколаївської областей

Сучасний кліматичний період (1991-2020 рр.) в Україні ймовірно найтепліший не лише за півстоліття, а й за увесь період інструментальних спостережень за температурою повітря (з 1890-х років). Середня за рік температура повітря у цей період в країні підвищилась на 1,2 °С відносно базової кліматичної норми (1961-1990 рр.). Найбільший внесок у зміну річної температури в Україні мали літній та зимовий сезони. Їхня середня за сезон температура зросла, відповідно, на 1,5 С° та 1,4 °С (рис.5.3). При цьому найбільш суттєво підвищилась температура повітря у січні (2,0 °С) та серпні (1,7 °С). Весною середня температура виросла на 1,1 °С. Цей ріст значною мірою зумовлений підвищенням температури у березні (1,7 °С). Температура повітря восени змінилась несуттєво (0,7 °С) .

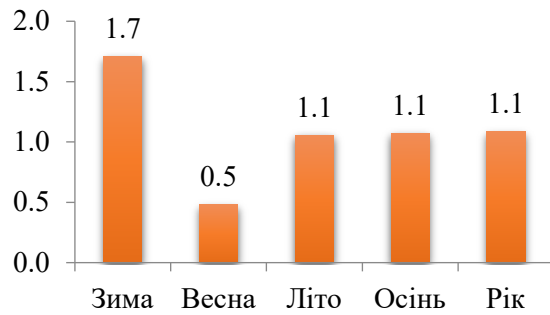


*дані для території України без АР Крим та окремих районів Донецької та Луганської областей

Рисунок 4.3 - Аномалія середньої за місяць, сезон, рік температури повітря у 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр.⁵⁶.

Середня за рік температура повітря за п'ятирічний (2020-2024 рр.) і десятирічний (2015-2024 рр.) періоди в Україні* були найвищими з 1961 р. і, ймовірно, за всю історію інструментальних спостережень (рис.4.4). Починаючи з середини 1980-х років кожне з десятиліть в Україні було теплішим, ніж попереднє

а) аномалія 2015-2024



б) аномалія 2020-2024

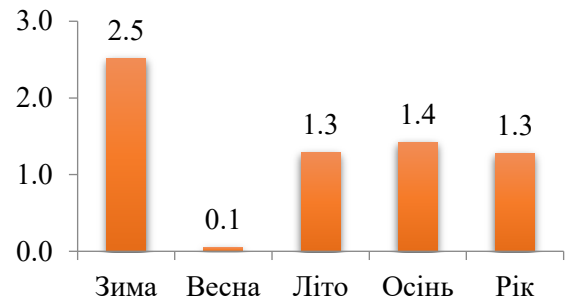


Рисунок 4.4 – Аномалія середньої за рік та сезон температури повітря відносно 1961-1990 рр.

Зростання середньої за рік та місяць температури повітря в Україні зумовлено збільшенням мінімальної та максимальної температури впродовж усього року. Наслідком значного зростання максимальної і, особливо, мінімальної температури повітря у холодний період року стало зменшення тривалості холодного періоду на 5-7 днів за 10 років, кількості днів з температурою повітря нижче -10°C та суворості зими. У багатьох регіонах країни зима з категорії “помірно сувора” перейшла до категорії “мало сувора”⁵⁷⁵⁸⁵⁹. Зменшилась і тривалість опалювального сезону, особливо у південних і західних областях країни та потреби у виробництві теплової енергії тепловими електростанціями і котельними. Протягом 1991-2020 рр. тривалість опалювального сезону зменшувалась у середньому на 5 днів за 10 років і на початку XXI ст. становила біля 160 днів у середньому в Україні і 140 днів у південному регіоні. Проте кількість днів з сильним морозом на значній

⁵⁷ Балабух В.О. Динаміка середньорічних показників температури повітря і кількості опадів в окремих ґрунтово-кліматичних зонах України//Л.В.Малицька, О.М.Лавриненко// Адаптація агротехнологій до змін клімату: ґрунтово-агрохімічні аспекти: колективна монографія (за науковою редакцією С.А. Балюка, В.В. Медведєва, Б.С. Носка).- Харків: Стильна типографія, 2018. 364 с., - С.14-44.

⁵⁸ Балабух В.О. Зміна екстремальних та небезпечних умов погоди, що впливають на енергетичну галузь України/ В.О. Балабух // Тези доповідей Першого Всеукраїнського Гідрометеорологічного З'їзду з міжнародною участю. Одеса: ТЕС, 2017. С..240-241

⁵⁹ Балабух В.О. Оцінювання сучасних змін термічного режиму України/В.О. Балабух, Л.В. Малицька// Геоінформатика, 2017.-№4(64)-С.5-20

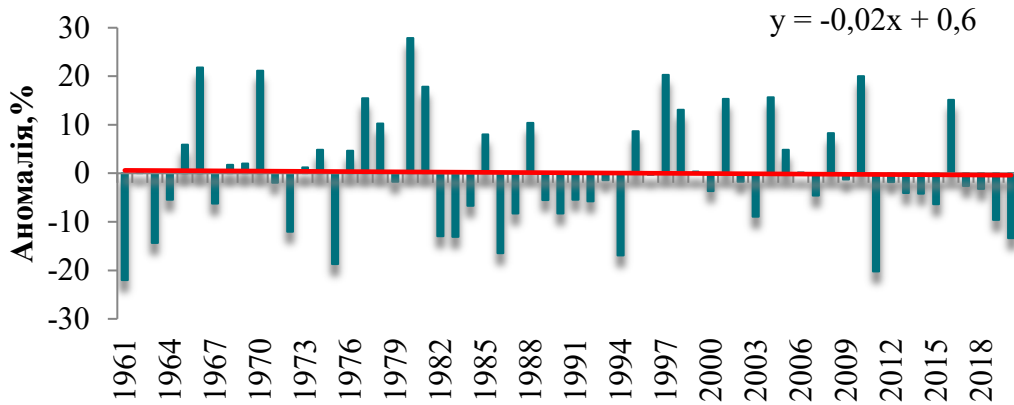
території країни не змінилась, що створює додаткові ризики для стабільної роботи енергетичних систем ОЕС України.

Суттєво зросла і кількість спекотних днів в Україні, коли максимальна температура повітря перевищує 25 °С. Ці зміни становлять у середньому 10 днів за 10 років і коливаються від 5-7 днів на заході до 12-15 днів за 10 років на півдні країни, де на початку ХХІ століття відмічалось уже до 90 спекотних днів за рік. Збільшується також тривалість періоду з такою температурою та кількість таких періодів, що зумовлює зростання витрат електроенергії на вентиляцію та кондиціювання.

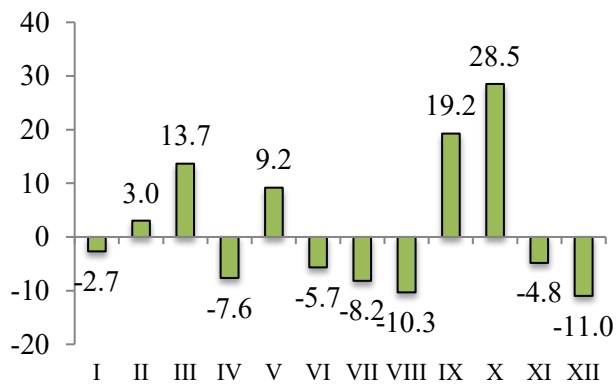
Суттєве підвищення температури повітря у холодний період зумовило збільшення кількості днів з дощем і зменшення кількості днів зі снігом в країні. Проте повторюваність днів з мокрим снігом суттєво зростає, збільшується і кількість випадків небезпечного та стихійного налипання мокрого снігу (7-8 випадків за 10 років). У теплий період ріст температури повітря в Україні супроводжується ростом вологовмісту тропосфери. Наслідком таких змін є збільшення нестійкості атмосфери, інтенсивності конвекції та зростання кількості днів з грозою, зливою, градом та шквалом протягом останніх десятиліть. В окремих регіонах країни збільшується не лише повторюваність цих явищ, а й їх інтенсивність.

Режим зволоження в Україні також зазнає значних змін^{57,58}. Річна кількість опадів в Україні з середини ХХ століття змінювалась не суттєво, проте, відбувся їхній перерозподіл між сезонами та місяцями: зростала їхня кількість восени, особливо у вересні і жовтні та зменшувалась, хоч і несуттєво, взимку (рис.4.4). Весною та влітку кількість опадів змінювалась несуттєво. Ці зміни були не однорідними на території країни.

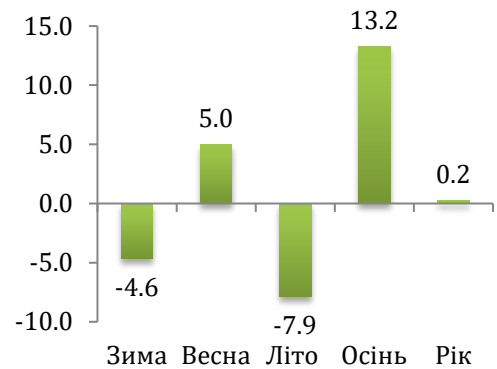
а)



б)



в)



*дані для території України без АР Крим та окремих районів Донецької та Луганської областей

Рисунок 4.4 Аномалія (%) середньої за місяць, сезон, рік кількості опадів у 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр.⁵⁶

Важливою характеристикою режиму зволоження є не лише кількість опадів, а й кількість днів з опадами, без опадів та тривалість дощових і посушливих періодів. Протягом останніх десятиліть в Україні відмічається тенденція до зменшення кількості днів з опадами, збільшення тривалості бездощового періоду, зростання інтенсивності опадів та їхньої зливової складової. Оскільки ці зміни у теплий період відбуваються одночасно із підвищенням температури повітря, особливо максимальної, це зумовлює збільшення кількості та інтенсивності посушливих явищ. Такі тенденції характерні уже не лише для степової частини України, а й для зони достатнього атмосферного зволоження, що охоплює Полісся та північні райони Лісостепу.

Зменшення кількості днів з опадами та збільшення посушливих періодів зумовлює зниження рівня води в річках та водосховищах, що негативно позначається на виробництві електроенергії гідроелектростанціями. Теплові та атомні електростанції потребують значних обсягів води для систем охолодження. Збільшення посушливих періодів та зниження рівня водних об'єктів створює проблеми з водозабезпеченням для цих об'єктів, особливо у теплий період року. Вразливою до цих змін є і біоенергетика. Якщо Україна розширюватиме виробництво біопалива з сільськогосподарських культур, то посухи можуть знизити врожайність біомаси, що вплине на доступність сировини для біоенергетичних установок.

Критично важливим чинником, що значно впливає на функціонування та ефективність енергетичних систем України є і вітровий режим. Аналіз даних за період з 1991 по 2020 рр. виявив чітку тенденцію до зниження середньої та максимальної за добу швидкості вітру на всій території країни. Такі зміни найбільш значимі зимою та восени. Зменшення вітрового потенціалу безпосередньо призводить до зниження обсягів генерації електроенергії ВЕС, що уповільнює темпи переходу України до "зеленої" енергетики та ускладнює досягнення цілей зі зменшення вуглецевого сліду та збільшення частки відновлюваних джерел у загальному енергетичному балансі. Такі зміни також можуть зумовити збільшення залежності від традиційних, часто імпортованих, джерел енергії, що негативно позначається на енергетичній безпеці країни. Крім того, спостерігається скорочення кількості днів із сильним вітром 15 м/с і більше. Такий вітер належить до небезпечних метеорологічних явищ⁶⁰ і може спричиняти обриви ліній електропередач, пошкодження опор та обладнання, що призводить до аварійних відключень, значних фінансових втрат та порушення стабільності енергопостачання. Такі явища, зокрема в умовах

⁶⁰ Український гідрометеорологічний центр. (2018). Настанова з метеорологічного прогнозування. Київ: УкрГМЦ.
https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteoprognozuvannia.pdf

військового часу, посилюють вразливість енергомережі до екстремальних явищ погоди. З іншого боку, саме стійкий та сильний вітер є критично важливим для ефективної роботи вітрових електростанцій. Отже, зменшення вітрового потенціалу безпосередньо впливає на обсяги виробництва "зеленої" енергії. У весняно-літній період інтенсивність цих процесів була меншою, зокрема у південних та східних областях України, де зниження швидкості вітру було не таким вираженим.

Незважаючи на загальне зменшення середньої швидкості вітру, дослідження також показують зростання повторюваності небезпечних та стихійних шквалів по всій території України. Ця тенденція є особливо помітною у північних та східних областях, де збільшується не лише їхня частота, а й середня та максимальна швидкість. Такі зміни зумовлюють додаткові виклики для енергетичного сектору, оскільки він має адаптуватися до меншої кількості днів із "корисним" вітром для ВЕС, одночасно готуючись до зростаючої загрози від руйнівних шквалів.

Ці зміни вказують на необхідність більш глибокого вивчення кліматичних тенденцій та їхнього впливу на енергетичну безпеку України.

4.2 Ймовірні зміни індикаторів кліматичних загроз для компонентів енергетики України в короткостроковій та середньостроковій перспективі для сценарію RTK8.5

Основним чинником що зумовлює інтенсивні зміни кліматичної системи у сучасний період є діяльність людини. За оцінками МГЕЗК⁶¹ саме вона сприяє підвищенню середньої за рік глобальної температури на 1,3-1,5 °C, у той час як внесок природних чинників коливається в межах $\pm 0,1$ °C. Наявність такого, явно вираженого чинника, дозволяє будувати ймовірні сценарії зміни клімату,

⁶¹ Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

залежно від зміни концентрації парникових газів і розвитку людства, відповідно.

Репрезентативні Траєкторії Концентрацій (РТК) (The Representative Concentration Pathways - RCPs) представлені Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату у П'ятій оціночній доповіді (AR5)⁶² моделюють різні шляхи розвитку викидів парникових газів, їхніх концентрацій в атмосфері та змін у землекористуванні протягом ХХІ століття. Кожен сценарій РТК визначає очікуваний обсяг додаткового радіаційного випромінювання до 2100 року порівняно з доіндустріальною епохою (1750 рік), спричинений людською діяльністю: РТК2.6 - 2,6 Вт/м²; РТК4.5 - 4,5 Вт/м²; РТК6.0 - 6,0 Вт/м²; РТК8.5 - 8,5 Вт/м². Усі сценарії РТК передбачають, що концентрація вуглекислого газу (CO₂) в атмосфері до 2100 року буде вищою, ніж зараз, через тривале зростання викидів CO₂ протягом ХХІ століття. Ці моделі є результатом поєднання прогнозів з кліматичних моделей, атмосферної хімії та глобального вуглецевого циклу. Розрахунки РТК прогнозують такі сумарні еквівалентні концентрації CO₂ до 2100 року (з урахуванням метану (CH₄) та закису азоту (N₂O))⁵⁸: РТК2.6 - 475 ppm; РТК4.5 - 630 ppm; РТК6.0 - 800 ppm; РТК8.5 - 1313 ppm.

За усіх сценаріїв РТК очікується підвищення глобальної середньої за рік температури повітря, інтенсивність якого зростатиме по мірі збільшення концентрації парникових газів. Так, за даними AR5 МГЕЗК⁵⁸, середні багаторічні значення глобальної приземної температури повітря у 2081–2100 рр. відносно 1986–2005 рр. можуть зрости від 0,3 - 1,7 °С (РТК2.6), 1,1 - 2,6 °С (РТК4.5) до 1,4 - 3,1 °С (РТК6.0) та 2,6 - 4,8 °С (РТК8.5). Ці сценарії є ключовим інструментом для розуміння потенційних кліматичних змін та розробки стратегій зі скорочення викидів та адаптації.

⁶² IPCC. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Оцінку вразливості енергетичного сектору до зміни клімату проводили для сценарію РТК8.5, який передбачає найбільшу кількість викидів до 2100 року і, відповідно, найбільші зміни у кліматичній системі. Оцінка за сценарієм РТК8.5 розглядається як стрес-тест високого рівня кліматичної небезпеки. Для підвищення надійності висновків результати доцільно порівнювати з помірним сценарієм РТК4.5 та низькоемісійним сценарієм РТК2.6. Такий підхід дозволяє відокремити ризики, які є стійкими за різних траєкторій кліматичних змін, від ризиків, характерних лише для високого сценарію потепління.

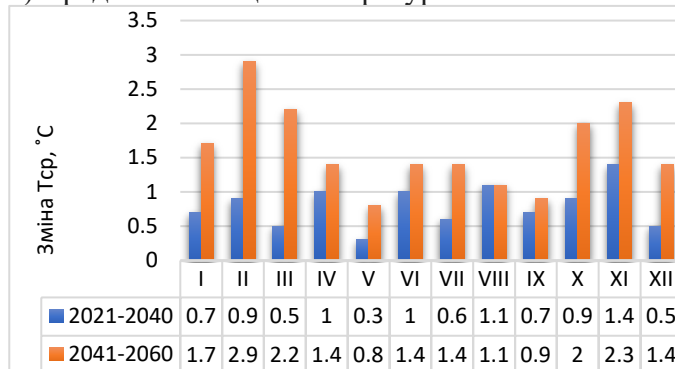
Для оцінки кліматичних індикаторів у сучасний кліматичний період використовували дані щоденних метеорологічних спостережень з 1991 по 2020 рр метеорологічної мережі України. Проекції зміни кліматичних індикаторів оцінювали за даними інтерактивного кліматичного атласу Copernicus⁶³, які отримані з проекту EURO-CORDEX. Визначались їхні ймовірні зміни (медіану, 95 та 5 процентилі) у короткостроковій (2021-2040 рр.) та середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі відносно 1991-2020 рр. для сценарію РТК8.5.

За реалізації сценарію РТК8.5 в Україні як у короткостроковій так і середньостроковій перспективі можна очікувати суттєву зміну температурного режиму. Підвищення температури повітря ймовірно спостерігатиметься протягом усього року (рис.4.5). Порівняно з сучасним кліматичним періодом (1991-2020 рр.) середнє багаторічне значення середньої за рік температура повітря у 2021-2040 рр. в Україні може стати вищими на 0,8 °С. Найбільший ріст середньої за сезон температури повітря очікується восени – 1,0 °С. Літо може стати теплішим на 0,9 °С, зима, – на 0,7 °С, а весна – на 0,6 °С. Суттєвий ріст температури повітря восени значною мірою буде зумовлений її підвищенням у листопаді (1,4 °С) та жовтні (0,9 °С). Влітку значного підвищення середньої за місяць температури можна очікувати у серпні (1,1 °С)

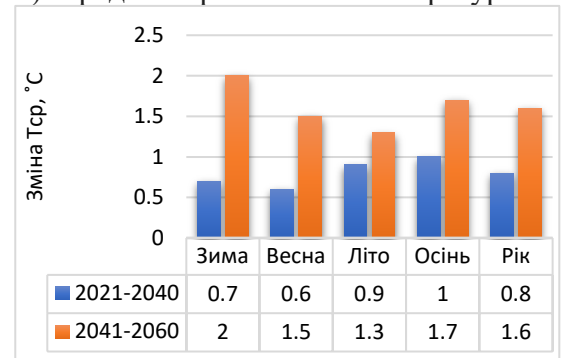
⁶³ Copernicus Interactive Climate Atlas: <https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas>

та червні (1,0 °C). Такі ж зміни температури будуть характерні і для квітня. Зимою найбільше підвищення температури очікується у лютому (рис.4.5).

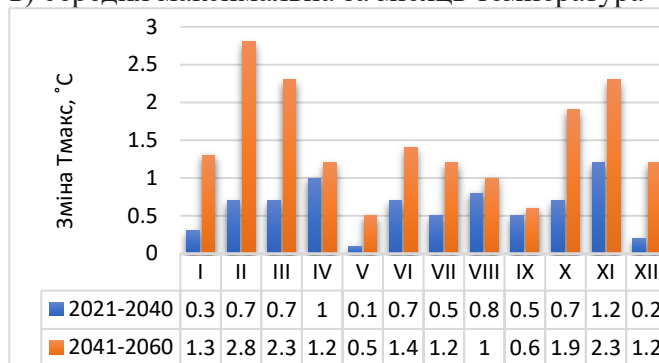
а) середня за місяць температура



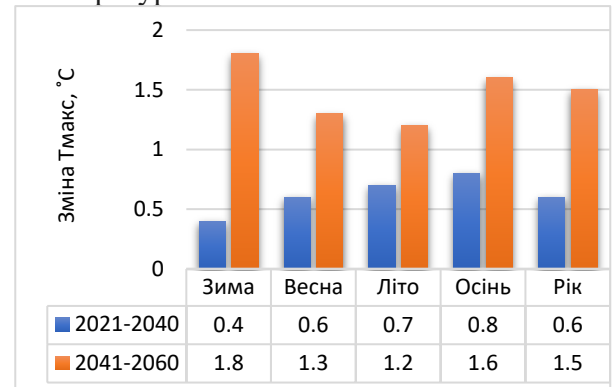
б) середня за рік і сезон температура



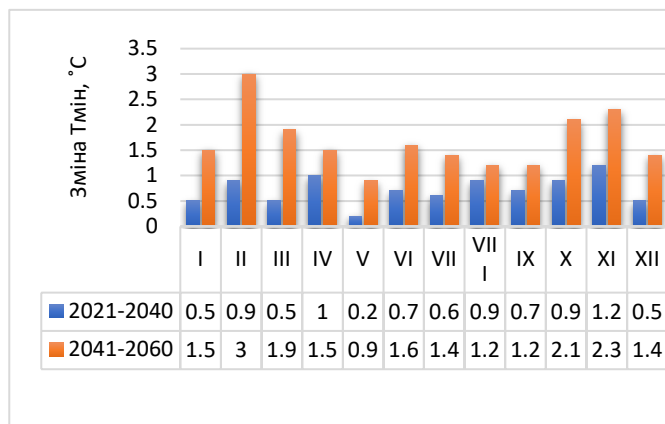
в) середня максимальна за місяць температура



г) середня максимальна за рік і сезон температура



д) середня мінімальна за місяць температура



е) середня мінімальна за рік і сезон температура

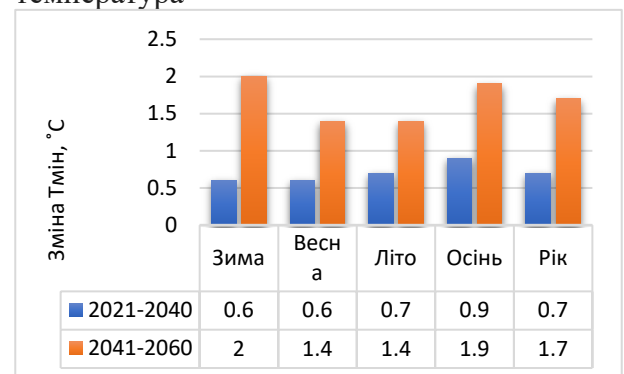


Рисунок - 4.5 Проекції зміни середньої (а, б), середньої максимальної (в, г) та середньої мінімальної (д, е) за місяць, сезон, рік температури повітря у 2021-2040 рр., 2041-2060 рр. відносно 1991-2020 рр. для РТК8.5

До середини ХХІ ст. в Україні можна очікувати подальше підвищення екстремальної температури повітря, як мінімальної, так і максимальної. Їхні середні за рік багаторічні значення у 2021-2040 рр. можуть збільшитись на

0,5- 0,6 °C відносно 1991-2020 рр., медіана на 0,9 -1,0 °C. До середини століття цей ріст посилиться і становитиме, відповідно 1,8-2,0 °C середнє, 1,8 °C - медіана. Можна очікувати суттєве підвищення екстремально високих значень як мінімальної так і максимальної температури, оскільки величина їхнього 95 процентилю може зрости до 2,5 °C (табл.4.1, рис.4.5).

У сучасний кліматичний період найменші зміни температури повітря в Україні відмічались восени (рис.4.3, 3.4). Проте, протягом останнього десятиліття намітилась тенденція до суттєвого підвищення як мінімальної так і максимальної температури в цей період, яка посилюватиметься і надалі. Очікується що у короткостроковій перспективі найбільший ріст екстремальної температури повітря в Україні спостерігатиметься восени, особливо у листопаді (рис.4.5). До середини століття ця тенденція збережеться і посилиться. До 2030 року суттєво зростатиме мінімальна і максимальна температура й літом. І хоча їхні середні за сезон аномалії температури ймовірно будуть однаковими (0,7 °C), проте суттєве збільшення величини 95 процентилю температури за сезон та, особливо, найтепліший місяць, свідчить про тенденцію до зростання повторюваності днів з аномально високою температурою в цей період (табл.4.1). Про це свідчить і підвищення кількості днів з максимальною за добу температурою повітря 35 °C і вище. Майже на два тижні може збільшитись кількість спекотних днів з максимальною температурою вище 25 °C , особливо у липні-вересні, з максимумом у серпні .У середині XXI ст. за рік на півдні України може спостерігатись майже 100 спекотних днів, з такою температурою .Такі зміни зумовлять збільшення середньої за сезон величина градусоднів для системи охолодження на 39,3 °C а її 95 перцентилі на 82 °C (табл.4.1). Тобто, в окремі роки протягом 2021-2040 рр. величина градусоднів для системи охолодження може більш ніж на 50% перевищувати сучасну кліматичну норму.

Таблиця 4.1 - Середні багаторічні значення (1991-2020 рр.) кліматичних показників температурного режиму що впливають на інфраструктуру енергетичного сектору України та їхні ймовірні зміни у коротко- (2021-2040 рр.) та середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Сценарій РТК8.5

Показник	Величина у 1991-2020	Ймовірна зміна середніх багаторічних значень					
		2021-2040 рр.			2041-2060 рр.		
		Медіана	5%	95%	Медіана	5%	95%
Середня за рік температура повітря, °C	9,2	0,9	0,3	1,5	1,8	1,1	2,4
Середня за зиму температура повітря, °C	-2,2	0,9	-0,3	2,7	1,8	0,7	2,7
Температура найхолоднішого місяця, °C	-3,1	0,8	-1,1	-1,8	1,8	0,1	3,1
Середня за літо температура повітря, °C	20,7	0,9	0,3	1,7	1,7	0,2	2,8
Температура найтеплішого місяця, °C	21,6	0,6	0,1	1,7	1,4	0,6	3,0
Середня максимальна за рік температура повітря, °C	12,9	0,9	0,3	1,4	1,8	1,0	2,4
Середня максимальна за зиму температура повітря, °C	0,3	0,8	-0,3	1,9	1,7	0,6	2,5
Середня максимальна за літо температура повітря, °C	25,1	0,8	0,1	1,8	1,7	0,7	2,8
Середня максимальна температура найтеплішого місяця	25,9	0,8	0,0	2,0	1,7	0,3	3,2
Середня мінімальна за рік температура повітря, °C	5,2	1,0	0,4	1,5	1,8	1,3	2,4
Середня мінімальна за зиму температура повітря, °C	-4,9	1,0	-0,3	2,2	1,9	0,7	3,0
Середня мінімальна за літо температура повітря, °C	15,7	0,9	0,4	1,5	1,8	1,1	2,6
Середня мінімальна температура найхолоднішого місяця, °C	-5,7	0,9	-1,0	2,1	2,2	0,1	3,6
Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, дні	1,0	1,9	0,8	5,0	4,0	1,1	10,0
Кількість днів з максимальною за добу	0.01	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,5

температурою повітря 40°C і вище, дні							
Величина градусоднів для системи опалення, °C	2824,2	-224,9	-38,6	-78,8	-448,5	-579,7	-287,5
Величина градусоднів для системи охолодження, °C	147,0	39,3	11,11	82,0	82,3	28,8	49,6
Кількість днів з Тмін нижче 0°C	112,5	-16,8	-28,9	-7,5	-30,4	-42,1	-18,3

5% - 5% процентилю, 95% - 95% процентилю

Протягом останнього десятиліття відмічався суттєвий ріст максимальної і особливо мінімальної температури й зимою. Очікується що він продовжиться і протягом 2021-2040 рр. Підвищення 95 процентилю на 2,0 °C свідчить про зростання повторюваності аномально теплих зим (табл.4.1). Проте зменшення величини 5% процентилю вказує на ймовірність того, що протягом цього періоду можливі й аномально холодні зими. Наслідком росту середньої, максимальної і мінімальної температури взимку буде зменшення кількості днів з від'ємною мінімальною за добу температурою повітря майже на 15% у короткостроковій перспективі. Такі зміни можуть зумовити зменшення величини градусоднів для системи опалення на 8%.

У середньостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 суттєве підвищення максимальної і мінімальної температури восени збережеться і посилиться. Середня максимальна і мінімальна за сезон температура повітря до середини століття може збільшитись на 1,6 - 1,9 °C, відповідно. Характерною особливістю зміни клімату в середині століття ймовірно буде значний ріст мінімальної і максимальної температури зимою, особливо у лютому (рис.4.5, табл. 4.1). Як наслідок, середня максимальна за зиму температура повітря до середини століття може підвищитись на 1,8 °C, середня мінімальна – на 2,0 °C, а їхній 95 процентилю на 2.5 °C - 3.0 °C. Такі зміни зумовлять суттєвий ріст середньої мінімальної і максимальної температури найхолоднішого місяця, найхолоднішої п'ятиденки, та зменшення величини градусоднів для системи опалення на 16%. , їхнього 95 процентилю майже на 10%, а 5 процентилю на 20%. Очікується що до 2050 року кількість

днів що потребують опалення зменшиться майже на два тижні, переважно за рахунок пізнішого початку опалювального сезону у жовтні.

Суттєве підвищення мінімальної і максимальної температури повітря приведе до значного (майже на два тижня), зменшення кількості днів з морозом у холодний період. Повторюваність сильних морозів з температурою повітря нижче -20°C у середині XXI ст. ймовірно суттєво зменшиться і спостерігатиметься рідше одного дня на десять років.

Зміна температурного режиму супроводжуватиметься і зміною режиму зволоження. (табл.4.2). Річна кількість опадів ймовірно суттєво не зміниться ні в короткостроковій, ні в середньостроковій перспективі. Проте 95% процентиль річної кількості опадів може зрости на 10-13%, а 5% процентиль зменшитись на 5%. Такі зміни максимальної і мінімальної кількості опадів свідчать про зростання їхньої неоднорідності, яка буде посилюватись у середньостроковій перспективі. Кількість опадів за зиму зросте, проте ці зміни будуть не суттєвими (2%). Кількість опадів що перевищують 95 процентиль у 2021-2040 рр. можуть зрости на 16%, а до середини століття на 20%. Слід зазначити що в середньостроковій перспективі суттєвого зменшення кількості опадів за зиму менше 5% на спостерігатиметься. Такі ж тенденції будуть характерні і для літнього періоду. (табл.4.2). Проте влітку ймовірне зменшення кількості опадів за сезон менше 5 процентиля на 13% до 2030 р. і на 18% до 2050 р. Такі зміни свідчать про збільшення дефіциту опадів відносно сучасного періоду. Дуже ймовірне зростання посушливості, яке буде посилюватись до середини століття, про що свідчить збільшення величини стандартизованого індексу опадів SPI-6, зростання максимальної тривалості бездощового періоду та збільшення випаровуваності. Одночасно із посиленням посушливості відмічатиметься і зростання інтенсивності опадів. Максимальна кількість опадів за добу до 2030 р. може зрости на 6,3%, а до середини століття на 9,1%. При цьому очікується збільшення як інтенсивності опадів менше 5 процентилі, так і екстремальних опадів, які перевищують 95 процентиль. Ці зміни посилюватимуться до середини століття. Такі ж тенденції характерні і для

максимальної кількості опадів за 5 діб (табл.4.2). Очікується збільшення кількості днів з опадами 10 мм і більше за добу на 7,1% у 2021-2040 рр. до 10,6% у 2041-2060 рр.. Майже на 22% може зрости кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу у короткостроковій перспективі і на 26,4% - у середньостроковій (табл.4.2).

Зростання дефіциту опадів та збільшення їхньої інтенсивності суттєво вплине на середньодобовий річковий стік. Його величина може збільшуватись до середини століття від 11,6% у 2021-2040 рр. до 16,1% у 2041-2060 рр. Проте для розподілу річкового стоку буде характерна велика мінливість з року в рік про що свідчить зростання його величини понад 95 центилів до 45% і зменшення нижче 5 центилів до 26% до середини століття, тобто чергування маловодних і багатоводних періодів.

Таблиця 4.2 - Середні багаторічні значення (1991-2020 рр.) кліматичних показників режиму зволоження що впливають на інфраструктуру енергетичного сектору України та їхні ймовірні зміни у коротко- (2021-2040 рр.) та середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Сценарій РТК8.5

Показник	Середні багаторічні значення у 1991-2020	Ймовірна зміна середніх багаторічних значень					
		2021-2040 рр.			2041-2060 рр.		
		Медіана	5%	95%	Медіана	5%	95%
Кількість опадів за рік, мм	600	3,2 %	-4,8	9,9	4,0%	-5,5	12,8
Кількість опадів за зиму, мм	125	2,0%	-7,8	15,9	7,0%	-0,7	20,3
Кількість опадів за літо, мм	192	2,0%	-12,9	14,2	-1,2%	-18,3	18,3
Максимальна кількість опадів за добу, мм	24,1	6,3%	1,5	11,1	9,1%	3,2	15,4
Максимальна кількість опадів за 5 діб, мм	50,2	5,4%	-0,8	10,6	7,8%	0,5	14,9
Кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, дні	119,9	0,3	-8,3	4,8	-1,6	-9,7	6,1
Кількість днів за зиму з опадами 1мм і більше за добу, дні	30,1	-1,6	-10,4	8,2	-0,9	-9,8	12,1

Кількість днів за літо з опадами 1мм і більше за добу, дні	31,5	-0,5	-12,2	11,8	-3,8	-15,3	10,4
Кількість днів за рік з опадами 10 мм і більше за добу, дні	10,4	7,1%	-2,6	19,5	10,6%	-3,9	29,0
Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, дні	1,3	22,5%	5,6	42,1	26,4%	6,0	63,0
Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	28,9	0,5	-2,0	3,5	1,	-2,7	5,1
Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців,бал	-0,2	0,1	-0,3	0,4	0,2	-0,3	0,5
Стандартизований індекс опадів - евапотранспірації (SPEI-6) за 6 місяців,бал	-0,3	-0,0	-0,4	0,2	-0,1	-0,5	0,3
Середня величина випаровування за рік, мм/день	1,6	2,7%	0,4	0,6	5,6%	1,5	8,7
Середня величина випаровування за зиму, мм/день	0,3	5,8%	-1,9	13,5	12,0%	3,2	20,4
Середня величина випаровування за літо, мм/день	3,0	2,1%	-0,4	7,3	4,5%	0,1	8,9
Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	0,3	11,6%	-19,0	44,8	16,1%	-26,2	45,3

До середини XXI століття в Україні очікуються помітні зміни вітрового режиму, сонячної радіації та хмарності, які безпосередньо впливатимуть на ефективність і просторово-часову мінливість генерації енергії з відновлюваних джерел (табл.4.3).

Таблиця 4.3 Середні багаторічні значення (1991-2020 рр.) кліматичних показників вітрового режиму, сонячної радіації та хмарності що впливають на інфраструктуру енергетичного сектору України та їхні ймовірні зміни у коротко- (2021-2040 рр.) та середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Сценарій РТК8.5

Показник	Середні багаторічні значення у 1991-2020	Ймовірна зміна середніх багаторічних значень					
		2021-2040 рр.			2041-2060 рр.		
		Me **	5% **	95%	Me	5%	95%
Середня за рік швидкість вітру, м/с	2,6	-0,2%	-1,7	1,4	-0,3%	-1,8	0,9
Середня за зиму швидкість вітру, м/с	2,9	0,0%	-2,6	2,1	0,5%	-3,1	3,1
Середня за літо швидкість вітру, м/с	2,4	-0,2%	-2,6	1,8	-0,8%	-2,8	1,7
Середня за рік загальна хмарність , (Середня площа хмарності) %	63,6	-0,4%	-2,3	0,9	-1,0%	-2,7	1,0
Середня за зиму загальна хмарність , %	81,5	-0,2%	-1,6	1,6	0,1%	-2,5	2,6
Середня за літо загальна хмарність , %	46,5	-0,4%	-4,6	1,5	-1,4%	-3,9	0,8
Сумарна за рік сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	133,2	-0,7	-2,8	3,4	-1,0	-4,3	3,2
Сумарна за зиму сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	47,6	-0,7	-2,8	0,6	2,0	-4,9	0,2
Сумарна за літо сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	221,8	0,2	-4,0	9,5	1,4	-6,0	8,1

Середня за рік і літо швидкість вітру ймовірно не суттєво зменшиться а за зиму - збільшиться, проте швидкість вітру яка перевищує 95 перцентиль ймовірно зросте, а яка нижче 5 перцентилі – зменшиться. Такі тенденції посилюватимуться до середини століття, особливо зимою. Зміна швидкості та повторюваності вітрів може призвести як до зростання, так і до зниження

виробітку електроенергії на окремих вітрових електростанціях, а також вплинути на стабільність їхньої роботи та навантаження на конструкції турбін.

Середня за рік хмарність суттєво не зміниться, а влітку до середини століття ймовірно зменшиться. Кількість сонячної радіації що досягає земної поверхні, за рік суттєво не зміниться, хоча і відмічається тенденція до її зменшення, яка посилюватиметься до середини століття. Проте влітку її кількість ймовірно зростатиме (табл.4.3).

Одночасно зміни режиму хмарності, прозорості атмосфери та надходження сонячної радіації визначатимуть продуктивність сонячних електростанцій, особливо у південних і центральних регіонах України. Очікуване зростання тривалості безхмарних і посушливих періодів потенційно може сприяти збільшенню виробітку сонячної енергії, однак цей позитивний ефект частково нівелюватиметься підвищенням температури повітря, що знижує ефективність фотоелектричних модулів. Крім того, зміни атмосферної циркуляції можуть посилити просторову та сезонну нерівномірність генерації ВДЕ, ускладнюючи балансування енергосистеми. Зростання повторюваності небезпечних явищ погоди — шквалів, сильних гроз, пилових бур, налипання мокрого снігу чи ожеледі — також створюватиме додаткові ризики пошкодження об'єктів відновлюваної енергетики та порушення їхньої експлуатації.

У сукупності ці процеси вимагатимуть адаптації систем прогнозування генерації ВДЕ, модернізації енергетичної інфраструктури, розвитку систем накопичення енергії та врахування кліматичних проєкцій під час планування нових об'єктів відновлюваної енергетики.

РОЗДІЛ 5

КЛІМАТИЧНІ РИЗИКИ ТА ВРАЗЛИВІСТЬ КОМПОНЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ У КОРОТКО ТА СЕРЕДНЬОСТРОКОВІЙ ПЕРСПЕКТИВІ ДЛЯ СЦЕНАРІЮ РТК8.5

Зміна клімату перестала бути абстрактною загрозою майбутнього, перетворившись на нагальну реальність, що докорінно впливає на всі сфери людського життя. Енергетична галузь, яка є одночасно і однією з головних причин кліматичних змін через викиди парникових газів, і вкрай вразливою до їхніх наслідків, перебуває в епіцентрі цих трансформацій. Клімат та його зміна суттєво впливають на розвиток енергетичної галузі. Цей вплив насамперед полягає у тому, що кліматичні ресурси визначають потребу в енергії різних регіонів країни і, відповідно, їхня зміна може суттєво змінити тепло- та енергоспоживання регіонів. Кліматичні умови також визначають особливості функціонування та техніко-економічні показники усіх типів електростанцій, тому їхня зміна приводить до необхідності коригування проектування та експлуатації електростанцій. Екологічні наслідки діяльності об'єктів енергетики також значною мірою обумовлені кліматичними умовами.

Підвищення температури повітря, води, ґрунту, збільшення частоти та інтенсивності екстремальних явищ погоди, а також зміна характеру випадіння опадів створюють безпрецедентні виклики для функціонування та сталого розвитку енергетичних систем у всьому світі і в Україні, зокрема. Зміна кліматичних умов безпосередньо впливає на здатність генерувати електроенергію з усіх типів джерел. Традиційна енергетика, що включає ТЕС та АЕС, стикається з проблемами, пов'язаними з підвищенням температури води. Ці станції потребують великих обсягів води для охолодження реакторів, конденсаторів парових турбін та іншого обладнання. В періоди аномальної спеки та посухи, коли рівень води у річках та водосховищах знижується, а її температура зростає, ефективність систем охолодження технологічного обладнання суттєво зменшується. Це може призводити до необхідності

зниження потужності або навіть тимчасової зупинки енергоблоків для уникнення перегріву, що ставить під загрозу стабільність енергопостачання.

ВДЕ, на які покладаються великі надії у запобіганні зміні клімату, також виявляються вразливими. Гідроенергетика безпосередньо залежить від водності річок. Зміна режиму опадів, тривалі посухи та малосніжні зими призводять до обміління річок та водосховищ, що істотно знижує гідроенергетичний потенціал виробництва електроенергії на ГЕС та ГАЕС. З іншого боку, інтенсивні зливи та паводки можуть створювати ризики для безпеки гідротехнічних споруд.

Зростання кількості сонячних днів позитивно впливає на розвиток сонячної енергетики, однак спостерігається зниження ефективності фотоелектричних панелей при їхньому перегріванні.. Хвилі спеки можуть зменшувати продуктивність сонячних станцій. Так, за температури повітря +25 °C і вище ефективність сонячних фотоелектричних станцій зменшується на 0,5% на кожен градус, внаслідок підвищення температури поверхні панелей^{64,65,66}. Крім того, збільшення хмарності або запиленості атмосфери через пилові бурі, лісові пожежі, що стають частішими, також негативно впливає на генерацію.

Вітрова енергетика залежить від стабільності та сили вітру. Зміна клімату зумовлює зміни глобальних та регіональних повітряних потоків, зміну режиму вітру. У деяких регіонах швидкість вітру може знизитися, що зменшить виробіток вітроелектростанцій. Водночас, зростання конвективної нестійкості атмосфери, зумовлює збільшення повторюваності сильних шквалів, смерчів, поривів сильного вітру що становить фізичну загрозу для вітрових турбін.

⁶⁴ Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends // Progress in Energy & Combustion Science. – 2004. – V. 30. – 367-416 p.

⁶⁵ Калиниченко В. А., Титко Р. Возобновляемые источники энергии Варшава – Краков – Полтава,- 2010. – 525 с.

⁶⁶ Дудюк Д. Л., Мазепа С. С. Нетрадиционная возобновляемая энергетика. Львов.- 2009. - 188 с.

Надзвичайно вразливою до екстремальних погодних умов є і енергетична інфраструктура – мережі електропередач, підстанції, газопроводи та нафтопроводи. Високі температури повітря можуть зумовлювати провисання проводів ліній електропередач, що збільшує ризик коротких замикань. Також можливий перегрів трансформаторів та іншого обладнання на підстанціях. Сильні вітри можуть пошкоджувати та руйнувати опори ЛЕП, обривати проводи, що призводить до масштабних відключень електроенергії. Налипання мокрого снігу та ожеледь створюють додаткове навантаження на лінії електропередач, що може спричинити їхній обрив. Затоплення підстанцій та іншого енергетичного обладнання може вивести його з ладу та потребуватиме тривалого й дороговартісного ремонту.

Потужні потоки води під час повеней та паводків розмивають ґрунт навколо підземних трубопроводів. Це може призвести до оголення труби, роблячи її вразливою до ударів уламків, що несе течія, та до втрати опори, що викликає провисання і деформацію. У гірських районах раптові паводки можуть повністю зруйнувати ділянки трубопроводів, прокладені через річки.

Перезволоження ґрунтів внаслідок інтенсивних опадів провокує зсуви, особливо на гірських схилах. Рухомі маси землі чи каміння мають величезну руйнівну силу, здатну змістити, зігнути або повністю розірвати секції трубопроводу, що опинилися на їхньому шляху. Для підводних трубопроводів та їхніх прибережних ділянок (так званих "лендфолів") головну небезпеку становлять шторми та підйом рівня моря. Потужніші хвилі та течії розмивають морське дно та берегову лінію, оголюючи труби та піддаючи їх ризику пошкодження якорями суден або рухом донних відкладень.

Навіть без екстремальних проявів, стає підвищення середньої температури повітря та ґрунту створює додаткові навантаження на трубопровідні системи. Наземні трубопроводи, особливо на довгих прямих ділянках, схильні до значного лінійного розширення під впливом високих температур. Якщо це не компенсується спеціальними інженерними рішеннями (компенсаційними петлями), в трубі виникає надмірна напруга стиснення, що

може призвести до викривлення ("втрати стійкості") та пошкодження. Підвищення температури навколишнього середовища нагріває нафту чи газ, що транспортується. Це може призводити до зміни їхніх фізичних властивостей. Наприклад, у газопроводах підвищення температури газу призводить до зростання тиску, що вимагає від компресорних станцій роботи в іншому, часто менш ефективному режимі для підтримки безпечних параметрів. Компресорні станції, що забезпечують рух газу по трубопроводу, самі потребують охолодження. В умовах аномальної спеки ефективність систем охолодження знижується, що може вимагати зниження продуктивності станції і, як наслідок, усього трубопроводу.

В умовах України, де енергетична інфраструктура додатково зазнає руйнувань внаслідок воєнних дій, кліматичні виклики створюють подвійне навантаження на її стійкість та надійність.

Зміна клімату впливає не лише на виробництво, але й на споживання енергії. Підвищення середніх температур, особливо влітку, призводить до стрімкого зростання попиту на електроенергію для кондиціонування повітря. Це створює пікові навантаження на енергосистему в періоди, коли генерація, як зазначалося вище, може бути обмежена через ту ж спеку. Водночас, тепліші зими можуть дещо знижувати попит на опалення, проте ця тенденція не є сталою і може перериватися періодами аномальних холодів, що також створює стрес для енергосистеми.

5.1 Методичні положення оцінки кліматичних ризиків та вразливості компонентів енергетичного сектору

В основі оцінки кліматичних ризиків та вразливості компонентів енергетичного сектору лежить концептуальна рамка оцінки вразливості та кліматичних ризиків яка ґрунтується на сучасних міжнародних підходах,

викладених у звітах МГЕЗК (спеціальному звіті SREX⁶⁷, AR5⁶², AR6⁶⁸) а також рекомендаціях щодо оцінки ризиків зміни клімату та адаптації до них⁶⁹. В AR6 окремо наголошено, що адаптація, пом'якшення зміни клімату, управлінські рішення, реакція суспільства самі можуть зменшувати ризики або створювати нові ризики (maladaptation). В основі концепції лежить ризик-орієнтований підхід, відповідно до якого кліматичний ризик розглядається як результат взаємодії кліматичної небезпеки, експозиції та вразливості системи. У межах цієї концептуальної рамки кліматична небезпека (hazard) характеризує потенційно небезпечні кліматичні явища, тенденції та зміни кліматичних умов, експозиція (exposure) визначає наявність населення, інфраструктури, природних ресурсів або видів діяльності у зоні впливу кліматичних чинників, вразливість (vulnerability) відображає схильність системи до негативного впливу зміни клімату та її обмежену здатність протидіяти цьому впливу. Вразливість розглядається як інтегральна характеристика, що формується під впливом: чутливості системи до кліматичних чинників та адаптаційної спроможності, яка визначає здатність системи запобігати негативним наслідкам, зменшувати потенційні збитки та пристосовуватися до змін клімату.

Концептуальна рамка оцінки ризиків передбачає поетапну оцінку кліматичних небезпек, експозиції, чутливості, адаптаційної спроможності, вразливості, інтегрального кліматичного ризику.

⁶⁷ IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp

⁶⁸ IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

⁶⁹ Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook – Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk. GIZ, 2017

Для кількісної оцінки використовується індикаторний підхід, за якого кожна складова характеризується системою відповідних показників. Індикатори підлягають нормалізації, агрегуванню та інтегруванню у комплексні індекси, що дозволяє порівнювати рівень ризику між секторами та регіонами, визначати найбільш уразливі компоненти системи, виявляти пріоритетні напрями адаптації до зміни клімату.

Під час проведення оцінки вразливості та ризиків енергетичної галузі України до зміни клімату також враховувалися положення Методичних рекомендацій для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату⁷⁰. Зазначені Методичні рекомендації адаптують концептуальні підходи ІРСС до умов України та визначають загальні принципи здійснення секторальної оцінки кліматичних ризиків, вразливості та адаптаційної спроможності

У прикладних індикаторних методиках оцінки кліматичних ризиків вразливість часто операціоналізують через співвідношення чутливості та адаптаційної спроможності, що узгоджується з концептуальною рамкою МГЕЗК⁷¹

$$R = f(H, E, V); \quad 5.1$$

$$V = f(S, AC); \quad 5.2$$

де R — кліматичний ризик (англ. Risk Index), підсумковий показник кліматичного ризику (0 – низький, 1 – критичний);

⁷⁰ Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату. Затверджено наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 03.06.2023 № 386. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text>

⁷¹ Zebisch, M., Schneiderbauer, S., Fritzsche, K., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., & Pedoth, L. (2023). Climate Risk Sourcebook. Eurac Research, IIASA, UNU-EHS, GIZ. https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/19122/1/giz_2023_Climate_Risk_Sourcebook.pdf

Н — небезпека (англ. Hazard index) — потенційно небезпечна подія або тенденція, пов'язана зі зміною клімату (наприклад, спека, посуха, повінь); визначає наскільки сильна загроза від зміни клімату для підсектору (шкала 0–1);

Е — експозиція (англ. Exposure index) — відображає ступінь впливу кліматичних змін на систему (в нашому випадку, підгалузей енергетики) у зонах впливу кліматичних загроз та визначає скільки об'єктів або потужностей знаходяться під ризиком;

V— вразливість (англ. Vulnerability index) — схильність системи (підгалузі енергетики) до негативних наслідків, яка визначає співвідношення чутливості до адаптаційної здатності;

S — чутливість (англ. Sensitivity index) — наскільки сильно система реагує на кліматичні зміни; визначає як сильно кліматичні умови впливають на роботу підсектору;

АС — адаптаційна спроможність (англ. Adaptive Capacity index) — здатність системи (підгалузі енергетики) адаптуватися до змін або зменшити шкоду (негативний вплив).

Загальна методологія оцінки вразливості та кліматичних ризиків для компонентів енергетичного сектору передбачає декілька кроків.

1. *Ідентифікація небезпек* - визначення ключових кліматичних небезпек для кожної складової енергетичного сектору та визначення індикаторів для кожної кліматичної небезпеки;

2. *Визначення діапазону змін та очікуваних середніх значень* кожного індикатору окремої складової у *коротко та середньостроковій перспективі*;

3. *Нормалізація* середніх значень кожного індикатору.

Оскільки індикатори мають різні одиниці виміру та діапазони значень, їх приводили до єдиної безрозмірної шкали (від 0 до 1). Це дало можливість їх порівнювати та комбінувати. Для оцінки кліматичної небезпеки застосовано метод нормалізації мін-макс масштабування з використанням формули:

$$N_i = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \quad (5.3)$$

де X_i – прогнозоване значення індикатора N_i , $X_{\min}$ та $X_{\max}$ – мінімальне (5 процентиль) та максимальне (95 процентиль) значення цього індикатора за досліджуваний період (2021-2040рр., 2041-2060рр.).

Оцінку індикаторів експозиції, чутливості та адаптаційної спроможності компонентів енергетичної системи здійснювали шляхом експертних обговорень, застосовуючи рейтингові значення за шкалою категорій від 1 до 5 балів, де 1 відповідає оптимальному значенню, найближчому до норми, а 5- критичному, найбільш віддаленому від норми. Для забезпечення порівнюваності показників проводили нормалізацію індикаторів експозиції, чутливості та адаптаційної спроможності шляхом приведення бальної шкали 1–5 до безрозмірного інтервалу 0–1 методом мін–макс нормалізації. Для оцінювання рівня впливу зміни клімату на індикатори використовували рекомендовану⁶⁴ шкалу (табл.5.1):

Таблиця 5.1 Категорії шкали оцінювання ризику

Значення індикатора	Рівень впливу	Бал
0,0 – 0,2	Дуже низький	1
0,21 – 0,4	Низький	2
0,41 – 0,6	Помірний	3
0,61 – 0,8	Високий	4
0,81 – 1,0	Дуже високий	5

4. *Визначення вагових коефіцієнтів значущості індикатора.* Окремі індикатори можуть мати різний ступінь впливу на функціонування, надійність та стійкість компонентів енергетичної системи. Тому при інтегральній оцінці кліматичних ризиків, експозиції, чутливості чи адаптаційної спроможності враховували відносну важливість кожного показника шляхом введення вагових коефіцієнтів значущості w_i

Ваговий коефіцієнт характеризує внесок окремого індикатора у формування інтегрального показника та відображає ступінь його впливу на

досліджувану систему. Для забезпечення коректності агрегування сума всіх вагових коефіцієнтів має дорівнювати одиниці:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad 5.4$$

де w_i — ваговий коефіцієнт i -го індикатора;

n — кількість індикаторів.

Визначення вагових коефіцієнтів здійснювали методом експертного оцінювання, за якого ваги визначались на основі думки фахівців у сфері енергетики та кліматології.

Використання вагових коефіцієнтів дозволяє підвищити обґрунтованість інтегральної оцінки та врахувати специфіку різних підсекторів енергетики.

5. *Агрегація індикаторів.* Після виконання нормалізації та зважування окремих індикаторів здійснювали їхню агрегацію — об'єднання в узагальнений інтегральний показник відповідної складової оцінки кліматичних ризиків. У результаті формується єдиний інтегральний індекс, який характеризує сумарний вплив певної групи індикаторів на енергетичну підсистему.

Агрегація індикаторів є важливим етапом оцінки кліматичних ризиків, оскільки компоненти енергетичної системи одночасно перебувають під впливом комплексу взаємопов'язаних кліматичних небезпек. Наприклад, підвищення температури повітря може супроводжуватися посухами, дефіцитом водних ресурсів, зростанням навантаження на енергосистему та збільшенням повторюваності небезпечних явищ погоди. Оцінювання кожного чинника окремо не дозволяє повною мірою врахувати їхню комбіновану та кумулятивну дію. Тому для комплексної характеристики кліматичних впливів доцільно визначати інтегральні індекси безпеки, експозиції, чутливості, адаптаційної спроможності та вразливості.

Інтегральні індекси формуються шляхом підсумовування нормалізованих індикаторів з урахуванням їхніх вагових коефіцієнтів. Такий підхід відповідає

сучасним міжнародним практикам багатокритеріального аналізу, що застосовуються у методиках оцінки кліматичних ризиків⁷⁰.

Загальний вигляд розрахункової формули інтегрального індексу кліматичної небезпеки має вигляд:

$$NI = \sum_{i=1}^n w_{hi} \times N_i \quad 5.5$$

де:

NI — інтегральний індекс небезпеки;

N_i — значення окремого і-го індикатора небезпеки, (нормалізованого до діапазону 0-1);

W_{hi} — ваговий коефіцієнт значущості і-го індикатора небезпеки,

n — кількість індикаторів небезпеки.

Для забезпечення коректності інтегральної оцінки сума вагових коефіцієнтів має дорівнювати одиниці.

Отриманий інтегральний індекс кліматичної небезпеки характеризує узагальнений рівень кліматичної небезпеки для конкретного підсектору енергетики.

Аналогічний підхід застосовувався для розрахунку інтегральних індексів експозиції, чутливості, адаптаційної спроможності.

5.1. *Визначення інтегрального індексу експозиції до змін клімату* — це ступінь, до якого система піддається впливу зміни клімату або екстремальних явищ погоди. Це об'єктивні фактори зовнішнього середовища, що не залежать від самої системи.

Загальний вигляд розрахункової формули інтегрального індексу експозиції має наступний вигляд:

$$EI = \sum_{i=1}^n w_{ei} \times E_i \quad 5.6$$

де:

EI — інтегральний індекс експозиції;

E_i — значення окремого і-го індикатора експозиції, (нормалізованого до діапазону 0-1);

w_{ei} — ваговий коефіцієнт значущості i -го індикатора експозиції:
($\sum_{i=1}^n w_{ei} = 1$);

n — кількість індикаторів експозиції.

5.2. Визначення інтегрованого індексу чутливості до зміни клімату.

Інтегральний індекс чутливості характеризує ступінь залежності підгалузі енергетики від кліматичних умов. Він відображає, наскільки суттєво зміна кліматичних індикаторів може впливати на ефективність, надійність, безпеку та безперервність функціонування енергетичної системи.

На відміну від експозиції, яка характеризує наявність об'єкта у зоні впливу кліматичної небезпеки, чутливість описує внутрішні властивості системи, що визначають її реакцію на кліматичні впливи.

Інтегральний індекс чутливості формується шляхом агрегування нормалізованих індикаторів чутливості з урахуванням їх вагових коефіцієнтів:

$$SI = \sum_{i=1}^n w_{si} \times S_i \quad 5.7$$

де:

SI — інтегральний індекс чутливості;

S_i — значення окремого i -го індикатора чутливості, (нормалізованого шляхом приведення бальної шкали 1-5 до безрозмірного інтервалу 0-1 методом мінімакс нормалізації);

w_{si} — ваговий коефіцієнт значущості i -го індикатора чутливості;

n — кількість індикаторів чутливості.

Для забезпечення порівнюваності результатів індикатори чутливості зазвичай нормалізуються до безрозмірного діапазону $[0;1]$, де 0 відповідає мінімальному рівню чутливості а 1 — максимальному рівню чутливості.

5.3 Визначення агрегованого індексу адапційної спроможності.

Адаптаційна спроможність (Adaptive Capacity, AC) — це здатність енергетичної системи, окремої підгалузі енергетики або енергетичного об'єкта пристосовуватися до фактичних чи очікуваних змін клімату, зменшувати негативні наслідки кліматичних впливів, підтримувати стійкість

функціонування та використовувати потенційні переваги, що можуть виникати внаслідок кліматичних змін.

Адаптаційна спроможність характеризує сукупність технічних, технологічних, організаційних, економічних, кадрових та управлінських можливостей системи реагувати на кліматичні виклики. Високий рівень адаптаційної спроможності сприяє зменшенню вразливості енергетичної інфраструктури та підвищенню її стійкості до небезпечних кліматичних явищ і довгострокових змін клімату.

На відміну від чутливості, яка характеризує ступінь залежності системи від кліматичних умов, адаптаційна спроможність відображає можливість системи компенсувати або послаблювати негативний вплив кліматичних чинників за рахунок впровадження адаптаційних заходів, модернізації обладнання, диверсифікації ресурсів, резервування потужностей, удосконалення систем управління та прогнозування.

Інтегральний індекс адаптаційної спроможності формується шляхом агрегування нормалізованих індикаторів адаптаційної спроможності з урахуванням їх вагових коефіцієнтів:

$$ACI = \sum_{i=1}^n w_{aci} \times AC_i \quad 5.8$$

де:

ACI — інтегральний індекс адаптаційної спроможності;

A_i — значення окремого індикатора адаптаційної спроможності, (нормалізованого шляхом приведення бальної шкали 1-5 до безрозмірного інтервалу 0-1);

w_{aci} — ваговий коефіцієнт індикатора адаптаційної спроможності, ($\sum_{i=1}^n w_{aci} = 1$)

n — кількість індикаторів адаптаційної спроможності.

6. *Оцінка кліматичного ризику.* Кліматичний ризик для окремого підсектору енергетичної галузі формується внаслідок взаємодії кліматичної небезпеки, експозиції та вразливості енергетичної системи.

Інтегральний індекс кліматичного ризику характеризує узагальнений рівень потенційних негативних наслідків зміни клімату для певного підсектору енергетики з урахуванням інтенсивності та ймовірності прояву кліматичних небезпек, ступеня експозиції енергетичної інфраструктури, чутливості системи до кліматичних впливів, рівня адаптаційної спроможності. Він дозволяє кількісно оцінити ступінь загрози для різних підсекторів енергетики, виконати їх порівняння між собою, визначити найбільш уразливі елементи енергетичної системи та обґрунтувати пріоритетність адаптаційних заходів.

Інтегральний індекс вразливості визначали через взаємодію чутливості та недостатності адаптаційної спроможності. Їхні вагові коефіцієнти для k -го підсектору енергетичної галузі приймали рівними, відповідно оцінку інтегрального індексу вразливості здійснювали за формулою:

$$VI_k = \left(\frac{SI_k + (1 - ACI_k)}{2} \right) \quad 5.9$$

Такий підхід дозволяє врахувати, що навіть за однакового рівня кліматичної небезпеки різні підсектори енергетики можуть мати суттєво відмінний рівень вразливості залежно від особливостей технологічних процесів, просторового розміщення об'єктів, рівня технічної модернізації, можливостей адаптації до зміни клімату.

Оцінку кліматичного ризику рекомендують⁶⁴ здійснювати за допомогою мультиплікативної моделі:

$$R_k = HI_k \times EI_k \times VI_k \quad 64 \quad 5.10$$

Проте, такий підхід приводить до надмірного зменшення інтегрального індексу ризику, характерного для мультиплікативних моделей. Оскільки для критичної інфраструктури, зокрема об'єктів енергетики, навіть помірні кліматичні небезпеки можуть мати суттєві соціально-економічні та екологічні наслідки для інтегральної оцінки кліматичного ризику доцільно

застосовуватися адитивний підхід^{72, 73} за якого нормалізовані індекси кліматичної небезпеки, експозиції та вразливості агрегуються у єдиний інтегральний показник ризику з урахуванням їхніх вагових коефіцієнтів.

Загальний вигляд розрахункової формули має вигляд:

$$R_k = w_H HI_k \times w_E EI_k \times w_v VI_k \quad 5.11$$

де:

R_k — інтегральний індекс кліматичного ризику для k-го підсектору енергетики;

HI_k — інтегральний індекс кліматичної небезпеки;

EI_k — інтегральний індекс експозиції;

VI_k — інтегральний індекс вразливості

w_H , w_E , w_v — вагові коефіцієнти відповідних складових ризику.

Для забезпечення коректності агрегування сума вагових коефіцієнтів повинна дорівнювати одиниці:

$$w_H + w_E + w_v = 1$$

За відсутності достатніх підстав для диференціації значущості окремих складових можуть використовуватися однакові вагові коефіцієнти:

$$w_H = w_E = w_v = 1/3$$

Оскільки всі складові інтегральних індексів попередньо нормалізуються до безрозмірного діапазону $[0; 1]$, інтегральний індекс ризику також змінюється у межах від 0 до 1, де значення, близькі до 0, відповідають низькому рівню

⁷² Sharma, J., Murthy, I. K., Esteves, T., Negi, P., Sushma, S., Dasgupta, S., Barua, A., Bala, G., & Ravindranath, N. H. (2018). *Climate vulnerability and risk assessment: Framework, methods and guidelines*. Indian Himalayas Climate Adaptation Programme (IHCAP). <https://waterknowledgehub.org/resource/climate-vulnerability-and-risk-assessment-framework-methods-and-guidelines>

⁷³ Asian Development Bank. (2017). *Climate change risk assessment guidelines*. Asian Development Bank. <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/357301/climate-change-risk-assessment.pdf>

кліматичного ризику; значення, близькі до 1, — дуже високому рівню ризику.

Для оцінки рівня кліматичного ризику застосовується шкала:

–0.0–0.2 — дуже низький ризик;

–0.2–0.4 — низький ризик;

–0.4–0.6 — помірний ризик;

–0.6–0.8 — високий ризик;

–0.8–1.0 — дуже високий ризик.

Нижче наведено результати оцінки кліматичного ризику для кожного окремого *k-20* підсектору енергетичної галузі, а саме, атомної енергетики, теплової енергетики, гідроенергетики, вітроенергетики, сонячної та, біопаливної енергетики та енергетичної інфраструктури.

Проте, отримані значення індексів кліматичного ризику не слід інтерпретувати як точковий прогноз. Вони відображають відносний рівень ризику за заданих кліматичних, соціально-економічних, технологічних та експертних припущень. Надійність результатів підвищується шляхом використання кількох сценаріїв зміни клімату, аналізу чутливості вагових коефіцієнтів та порівняння результатів між підсекторами енергетики.

5.2 Атомна енергетика

Атомна енергетика є одним із ключових елементів енергетичної безпеки України та важливою складовою низьковуглецевого енергетичного переходу. Водночас функціонування атомних електростанцій значною мірою залежить від природно-кліматичних умов, насамперед температурного режиму, водних ресурсів, гідрологічних процесів та повторюваності небезпечних і екстремальних явищ погоди. Сучасна зміна клімату, яка проявляється у зростанні температури повітря і води, збільшенні тривалості та інтенсивності хвиль спеки, посух, екстремальних опадів, сильного вітру, лісових пожеж та інших небезпечних явищ, створюють додаткові виклики для надійного та безпечного функціонування атомної енергетики.

Зміна клімату впливає як на технічні та виробничі характеристики АЕС, так і на економічну ефективність та екологічну безпеку їхньої експлуатації (рис.5.1). Найбільш вразливими є системи охолодження, водозабірні споруди, системи електропостачання власних потреб, відкриті розподільчі пристрої, допоміжна інфраструктура та системи аварійного резервування. Підвищення температури води та дефіцит водних ресурсів можуть призводити до зниження ефективності охолодження реакторних установок, обмеження потужності енергоблоків та збільшення ризику аварійних ситуацій. Одночасно зростання повторюваності екстремальних явищ погоди підвищує ризики пошкодження інфраструктури та виникнення каскадних порушень у роботі енергосистеми.

Щоб запобігти подальшим ризикам основними факторами здатності до адаптації слід вважати підвищення температурної стійкості, зокрема, ефективності систем охолодження; збільшення гідрологічної і радіаційної безпеки, інфраструктурна стійкість та технічна модернізація, гнучкість енергосистеми, зокрема її здатність до інтеграції з іншими джерелами енергії (рис.5.1).

Оцінка кліматичного ризику для АЕС є необхідною передумовою для розроблення ефективних заходів адаптації, підвищення стійкості енергетичної інфраструктури та забезпечення довгострокової безпеки функціонування галузі. Виконувалася вона відповідно до підходів IPCC⁷⁴, IAEA⁷⁵ та ISO 14091⁷⁶, У цьому розділі представлено оцінку кліматичного ризику для атомної енергетики України в коротко- і середньостроковій перспективі за реалізації

⁷⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H.-O. Pörtner et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

⁷⁵ International Atomic Energy Agency. (2011). *Climate change and nuclear power 2011*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/8402/climate-change-and-nuclear-power-2011>

⁷⁶ International Organization for Standardization. (2021). *ISO 14091:2021 adaptation to climate change — Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment*. International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/68508.html>

кліматичного сценарію РТК8.5, визначено основні кліматичні загрози, найбільш вразливі виробничі потужності та інфраструктурні елементи АЕС, а

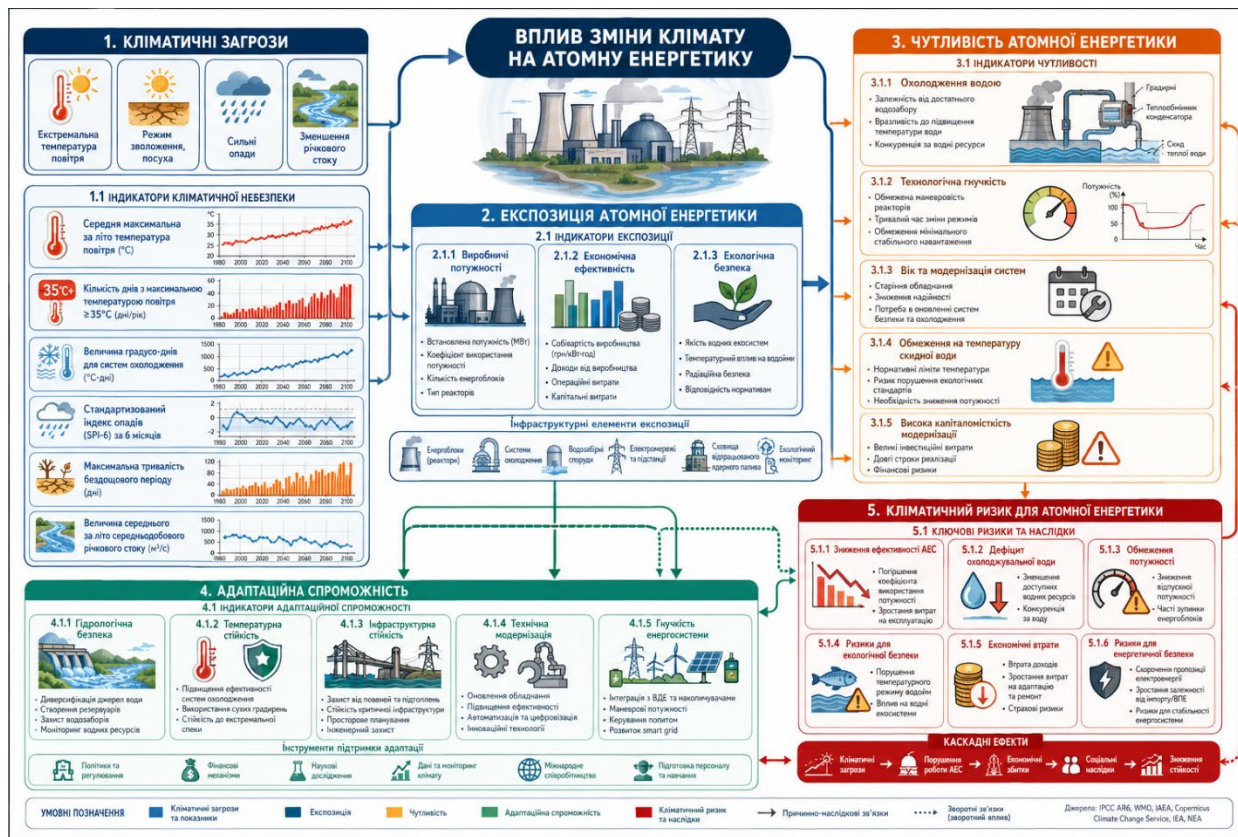


Рис.5.1 Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату в атомній енергетиці

також проаналізовано потенційні наслідки їхнього впливу на надійність, ефективність і безпеку функціонування галузі.

5.2.1 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для атомної енергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі. *Оцінка індексу небезпеки.* Кліматичними загрозами для атомної енергетики є зміна режиму випадіння опадів, зміна рівня води у водоймах, підвищення температури повітря, повені, небезпечні метеорологічні явища (смерчі, шквали, грози, сильні зливи). Проте, більшість сучасних кліматичних проєкцій не містять прямих оцінок змін повторюваності метеорологічних явищ через недостатню просторову роздільну здатність кліматичних моделей та складність відтворення конвективних процесів. Такі явища мають локальний, і короткочасний характер, тому їх прогнозування супроводжується значною невизначеністю. У зв'язку з цим у кліматичних дослідженнях зазвичай оцінюють не самі небезпечні явища, а зміни атмосферних умов, сприятливих для їх формування, зокрема температури, вологості, інтенсивності опадів опадів.

Для оцінки кліматичних загроз для атомної енергетики у коротко- та середньостроковій перспективі використовували такі індикаторами цих загроз як середню максимальну за літо температуру повітря, кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, величину градусоднів для системи охолодження, кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, максимальну тривалість бездощового періоду за рік, величину середнього за літо середньодобового річкового стоку.

Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для атомної енергетики у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Оцінка індикаторів кліматичної небезпеки для атомної енергетики у короткостроковій перспективі

№ п/п	Індикатор небезпеки HI^a	Вплив	Нормалізоване значення $HI^a *$	Ваговий коефіцієнт $w^a_{hi} *$	Внесок у індекс $HI^a \times w^a_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Підвищення температури води зменшення ефективності охолодження турбіни/генератора	0,50	0,2	0,1
2	Величина градусоднів для системи охолодження, °C	Збільшення навантаження у період максимального підвищення температури повітря, перегрів обладнання, скорочення ремонтного періоду	0,12	0,1	0,012
3	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	Зростання посушливості, зменшення води на охолодження та підвищення її температури води, зменшення ефективності охолодження,	0,36	0,25	0,09
4	Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, дні	Можливе зростання температур води понад допустимі межі, зниження ефективності роботи системи охолодження активної зони реактора та герметичної оболонки.	0,14	0,1	0,014
5	Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців	Дефіцит поди на охолодження	0,43	0,2	0,086
6	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,3	0,1	0,03
Інтегральний індекс небезпеки HI^a				1,00	0,41

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз внеску індикаторів кліматичної небезпеки в Інтегральний індекс кліматичної небезпеки HI^a показав, що найбільш небезпечними для атомної енергетики в короткостроковій перспективі є підвищення середньої максимальної за літо температури повітря та

збільшення максимальної тривалості бездощового періоду. Ці індикатори сприяють зростанню посушливості, зменшенню води на охолодження та підвищення її температури, підвищенню пожежної небезпеки і можуть не лише зменшити виробництво електроенергії через зниження ефективності охолодження реакторів а й спричинити їхню зупинку.

Отримане значення Інтегрального індексу кліматичної небезпеки ($HI^a = 0,41$) свідчить що у короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 атомна енергетика України матиме помірний рівень кліматичної небезпеки до зміни клімату і визначатиметься :

- зростанням середньої максимальної температури повітря літом на 0,7 °C, збільшенням її 95 процентилю на 2,0°C;
- збільшенням кількості спекотних днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище у середньому на 2 дні, 95% - на 5 днів;
- зростання інтенсивності опадів, зокрема збільшення кількості опадів 20мм за добу і більше на 22,5% а їхньої 95 процентилі на 42%;
- збільшенням тривалості бездощового періоду на 0,5-3,5 днів, Як наслідок він може у середньому тривати більше місяця
- збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 11,6%, При цьому величина 95% процентилі може зрости майже на 45%, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5% процентилі на 19%
- про посилення гідрологічної посухи.

Оцінка індексу експозиції. Під дією кліматичних загроз можуть перебувати об'єкти і системи виробництва енергії, трансформації та розподілу атомної енергії. Зміна клімату визначає новий набір умов для проектування, експлуатації та технічного обслуговування існуючої та планованої інфраструктури атомної енергетики, потребу в її модернізації, а отже економічну ефективність. Забезпечення балансу між доступністю енергоресурсів та попиту з боку різних секторів буде ставати дедалі більш визначним, оскільки зростаючий попит і розвиток нових технологій можуть

вимагати більше енергії в тих районах, де на даний час обсяги споживання відносно невеликі або енергоресурси менш доступні.

Індикаторами, які характеризують перебування об'єктів атомної енергетики під дією кліматичних загроз, можуть виступати виробничі потужності, економічна ефективність та екологічна безпека (табл.5.3).

Висока температура та дефіцит води, особливо у літній період, знижують фактичну доступну *виробничу потужність* атомних електростанцій як у короткостроковій, так і довгостроковій перспективі. Це явище напряму впливає на здатність АЕС генерувати електроенергію на максимальному рівні. Спека зменшує ефективність охолодження реактора та турбін що зумовлює зниження їхньої потужності. Цьому сприяє і висока температура води що використовується для охолодження. У періоди сильної спеки фактична потужність може знижуватись на 5–25%, а в окремих випадках — і до 50% або повної зупинки. Тривалий бездощовий період, посуха приводять до дефіциту води, обмежень за об'ємом водозабору і зрештою до зупинки реакторів або їхньої роботи на частковій потужності. Такий вплив кліматичних чинників приводить до зростання частоти технічного обслуговування через тепловий стрес, потребує модернізації охолоджувальних систем, збільшення витрат на неї, зменшення технічної доступності блоків.

Високі температури і дефіцит води негативно впливають на *економічну ефективність* виробництва енергії на АЕС, знижуючи прибутковість, підвищуючи витрати, створюючи ризики для інвестицій і загрожуючи стабільності енергосистеми. Обмеження роботи реакторів через перегрів чи нестачу охолоджувальної води приводять до зменшення виробництва електроенергії, відповідно менше електроенергії йде на продаж що впливає на доходи генеруючих компаній. Необхідність посиленого охолодження, очищення води, обслуговування систем зумовлює зростання експлуатаційних витрат на електроенергію для вентиляторів, насосів, ремонт. Тимчасове або вимушене відключення реактора, простої та аварійні зупинки приводять до втрати продукції, штрафів за порушення контрактів. Зростання коливань

температури води, збільшення її забруднення приводять до зношування обладнання, прискореного старіння систем і більш частих ремонтів. Обмежена пропозиція при високому попиті на електроенергію у спеку приводить до зростання ціни електроенергії, створює ризики її дефіциту. Нестабільність виробництва через кліматичні загрози створює ризики для інвесторів, що ускладнює залучення коштів для нових блоків.

Зміна температурного режиму і режиму зволоження негативно впливають і на *екологічну безпеку* АЕС. Сильна спека, дефіцит води, посуха зумовлюють порушення природних режимів водойм, перегрів екосистем, порушення нормативів скидання тепла та води також можуть приводити до потенційних аварій з екологічними наслідками. Зміна кліматичних чинників впливає на термічне забруднення водойм, ризик несанкціонованих скидів чи витоків, на прибережні та болотні екосистеми. При високих температурах вода, що повертається з систем охолодження, може нагріватися до 30–35 °C або більше. Це перевищує допустимі межі для багатьох водних організмів (особливо риби, ікри, ракоподібних). Втрачається здатність водойми до самоочищення, що провокує евтрофікацію (надмірний розвиток водоростей). Під час спеки обладнання працює в стресовому режимі, що збільшує ймовірність аварій, у т.ч. з витоками технічної чи радіоактивної води. У разі дефіциту води може бути порушений режим очищення, що створює ризик скидання недостатньо очищеної води. Зрештою коливання рівня води та температури порушують середовище існування птахів, земноводних, водної рослинності прибережних та болотних екосистем.

Проведена оцінка індикаторів експозиції для атомної енергетики, зокрема виробничих потужностей, економічної ефективності та екологічної безпеки показала, що їхній внесок в інтегрований індикатор експозиції майже рівнозначний з урахуванням впливу зміни кліматичних чинників у короткостроковій перспективі (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – Оцінка індикаторів експозиції для атомної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^a_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^a_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^a_{ei}^*$	Внесок у індекс $E^a_i \times w^a_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми	0,50	0,4	0,20
2	Економічна ефективність	Знижують прибутковість, підвищують витрати, створюють ризики для інвестицій	0,70	0,3	0,21
3	Екологічна безпека	Забезпечення норм радіаційної безпеки, цілісності системи зберігання радіоактивних відходів	0,80	0,3	0,24
Інтегральний індекс експозиції EI^a				1,00	0,65

Встановлено що атомна енергетика України має високий рівень експозиції ($EI^a = 0,65$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 до 2040 року, оскільки:

- має найбільшу частку у виробництві електроенергії;
- є надзвичайно економічно важливою на ринку електроенергії;
- має високі ризики для довкілля у разі виникнення аварій.

Оцінка індексу чутливості. Продуктивність і стабільність роботи АЕС також сильно залежать від впливу кліматичних чинників, зокрема наявності води, необхідної для стабільної роботи підприємств із виробництва енергії. Основними індикаторами чутливості атомної енергетики можуть бути залежність від охолодження водою, технологічна гнучкість, вік та модернізація систем, обмеження на температуру скидної води, висока капіталомісткість модернізації. Оцінку внеску цих індикаторів у Інтегральний індекс чутливості атомної енергетики S^a представлено в табл.5.4.

Таблиця 5.4 – Оцінка індикаторів чутливості для атомної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^a_i	Вплив	Нормалізоване значення S^a_i *	Ваговий коефіцієнт w^a_{si} *	Внесок у індекс $S^a_i \times w^a_{si}$
1	Залежність від охолодження водою	Обсяг води, потрібний для роботи	0,75	0,30	0,225
2	Технологічна гнучкість	Можливість реагування на перегрів / зміни температури	0,6	0,25	0,15
3	Вік та модернізація систем	Стан інфраструктури охолодження та захисту	0,7	0,20	0,14
4	Обмеження на температуру скидної води	Норми вимагають обмеження потужності	0,5	0,15	0,075
5	Висока капіталомісткість модернізації	Ускладнює технічну адаптацію	0,55	0,10	0,055
Інтегральний індекс чутливості SI^a				1,00	0,645

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз показав, що атомна енергетика України *матиме високий рівень чутливості* ($SI^a = 0,645$) до зміни клімату, оскільки:

- атомна енергетика суттєво залежить від дислокації, типу охолодження, віку блоку, а також рівня модернізації;
- АЕС побудовані до 1990-х мають низьку і помірну технологічну гнучкість (застарілі системи охолодження, обмежена автоматизація), що впливає на здатність адаптуватися до зміни клімату, підтримувати безпечну і ефективну роботу в нових кліматичних умовах, можливість змінювати режим роботи, готовність до інтеграції нових технологій охолодження, діагностики, управління ризиками;
- висока капіталомісткість модернізації ускладнює технічну адаптацію.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Основної метою адаптації енергетичних систем до зміни клімату є забезпечення сталого енергопостачання та збалансованості виробництва і споживання у часі та

просторі. Індикаторами адаптаційної спроможності атомної енергетики можуть бути *гідрологічна безпека, температурна стійкість, інфраструктурна стійкість, технічна модернізація, гнучкість енергосистеми* (табл.5.5).

Гідрологічна безпека — це стабільна доступність достатніх водних ресурсів (у необхідній кількості та якості) для забезпечення постійного охолодження реакторів і турбін, скиду теплового навантаження, підтримання екологічно допустимого режиму у водоймах. Її адаптаційна спроможність залежить від типу системи охолодження, джерела водопостачання, наявності резервуарів або альтернативних джерел води, інфраструктурної стійкості до повеней і паводків, стану моніторингу гідрологічних загроз, регулювання режиму річки (наявність ГЕС, шлюзів).

Температурна стійкість — це здатність АЕС підтримувати безпечну та ефективну роботу в умовах підвищених температур зовнішнього середовища (повітря, води) без погіршення показників надійності та екологічної безпеки. Залежність адаптаційної спроможності атомної енергетики від її температурної стійкості є критичною, оскільки АЕС — це теплотехнологічні установки, робота яких базується на контролі високотемпературних процесів. Порушення температурних режимів внаслідок зміни клімату (особливо часті хвилі спеки) безпосередньо впливає на ефективність, безпеку і стабільність роботи АЕС. Низька температурна стійкість призводить до зниження доступної електричної потужності влітку до 10–25%, вимушених зупинок реакторів у періоди екстремальної спеки, зростання операційних витрат на охолодження та обслуговування, збільшення технологічних і екологічних ризиків.

Інфраструктурна стійкість — це здатність усіх елементів інфраструктури атомної станції (споруд, енергетичних, охолоджувальних, зв'язкових, транспортних та захисних систем) витримувати вплив зовнішніх екстремальних подій, таких як: повені, паводки, сильні шквали, смерчі, тривалу спеку або сильні морози; лісові пожежі; перебої з енергопостачанням

чи водопостачанням; терористичні чи військові загрози. Залежність адаптаційної спроможності атомної енергетики від інфраструктурної стійкості є прямою і критичною, оскільки надійна інфраструктура забезпечує безпечну, безперебійну та ефективну роботу АЕС в умовах змін клімату та зростаючих природних і техногенних загроз. Інфраструктурну стійкість атомної енергетики забезпечують системи охолодження (градирні, насосні станції, трубопроводи), електромережі та підстанції, транспортна та логістична інфраструктура, зв'язок і системи моніторингу, резервні системи живлення (дизелі, батареї). Чим вища інфраструктурна стійкість — тим більша адаптаційна спроможність АЕС до кліматичних, техногенних і природних ризиків. Сучасна атомна енергетика потребує інфраструктури, здатної працювати в умовах нестабільного клімату, надзвичайних ситуацій та комбінованих загроз.

Залежність адаптаційної спроможності атомної енергетики від *технічної модернізації* є прямою і стратегічною: чим вищий рівень модернізації технологій, систем і обладнання на АЕС, тим вища здатність станції ефективно функціонувати та безпечно реагувати на нові кліматичні виклики, технологічні ризики й екологічні обмеження. Технічна модернізація АЕС охоплює оновлення охолоджувальних систем (включаючи градирні, теплообмінники, насосні станції), систем управління безпекою та автоматизації, реакторних і допоміжних систем (покращення теплоносіїв, захисту оболонки), електропостачання і резервного живлення, інфраструктуру моніторингу, раннього попередження та зв'язку, фізичного захисту, сейсмостійкості та протипожежної безпеки. Адаптаційна спроможність залежить від рівня модернізації. Так, для радянських проєктів без оновлень характерний низький рівень технічної модернізації АЕС, що зумовлює її високу вразливість до спеки, дефіциту води, збоїв. Часткова (вибіркова модернізація) зумовлює середню здатність до адаптації, обмежену маневреність. Повна модернізація із застосуванням сучасних рішень, інтеграцією цифрових систем сприяє високій адаптивності, стійкості до кліматичних викликів.

Адаптаційна спроможність атомної енергетики значною мірою залежить від гнучкості енергосистеми, в якій вона функціонує. Чим більш гнучкою є енергосистема — тим вищий потенціал для ефективної адаптації АЕС до кліматичних, техногенних та регуляторних змін, включаючи непередбачувані навантаження, інтеграцію відновлюваних джерел та надзвичайні події. Гнучкість енергосистеми — це її здатність швидко реагувати на зміни попиту і пропозиції електроенергії, стабільно працювати в умовах змін клімату, аварій чи криз, інтегрувати різні типи генерації, у т.ч. атомну, теплову, ВДЕ тощо, гарантувати баланс, безпеку і якість електропостачання. До компонентів гнучкості атомної енергетики належить оперативне балансування системи, яке дозволяє АЕС знижувати/підвищувати потужність при необхідності, що зменшує ризик перевантажень, перегріву. Акумуляуючі потужності (ГАЕС, батареї) дозволяють АЕС працювати стабільно, навіть при надлишку ВДЕ, забезпечуючи безперебійну роботу реактору. Наявність резервів потужності знижує тиск на АЕС під час пікових навантажень або спеки що сприяє підвищенню безпеки і тривалості служби обладнання. Інтелектуальне управління мережею (Smart Grid) дозволяє оптимізувати навантаження і режими роботи АЕС, підвищити її ефективність і передбачуваність.

Проведений аналіз внеску індикаторів адаптаційної спроможності для атомної енергетики у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Оцінка індикаторів адаптаційної спроможності для атомної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^a_i	Вплив	Нормалізоване значення $AC^a_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^a_{aci} *$	Внесок у індекс $AC^a_i \times w^a_{si}$
---	---	-------	--------------------------------------	-------------------------------------	---

1	Гідрологічна безпека	Стабільна доступність достатніх водних ресурсів (у необхідній кількості та якості) для забезпечення сталої роботи енергетики	0,5	0,25	0,125
2	Температурна стійкість	Здатність працювати під час аномальної спеки	0,4	0,20	0,08
3	Інфраструктурна стійкість	Захищеність від зовнішніх екстремальних подій	0,6	0,20	0,12
4	Технічна модернізація	Стан виконання заходів безпеки після Фукусіми	0,8	0,20	0,16
5	Гнучкість енергосистеми	Здатність до інтеграції з іншими джерелами енергії	0,6	0,15	0,09
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності <i>ACI^a</i>				1,00	0,58

*за експертною оцінкою авторів

Аналіз адаптаційної спроможності атомної енергетики України до зміни клімату показав, що в короткостроковій перспективі вона матиме *помірну здатність до адаптації* ($ACI^a = 0,58$):

- присутні інноваційні рішення щодо модернізації систем охолодження, повторного використання води в системах охолодження тощо ;

- доступні у достатніх кількості та якості водні ресурси для забезпечення сталої роботи енергетики. Винятком є Запорізька АЕС, яка після втрати Каховського водосховища внаслідок військових дій має проблеми із забезпеченням водою;

- АЕС генерують понад 50% електроенергії, але система ще недостатньо гнучка: обмежена кількість ГАЕС; повільна модернізація мереж; низький рівень автоматизації попиту/пропозиції; проблеми інтеграції з ВДЕ (наприклад, сонячні піки вдень зменшують потребу в атомній генерації).

Встановлені інтегровані індекси чутливості та адаптаційної спроможності дозволяють оцінити *інтегральний індекс вразливості V^a* атомної

енергетики_. Його величина становить 0,53 і свідчить про те що атомна енергетика в Україні має *помірний рівень* вразливості.

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпечності HI^a , експозиції EI^a , чутливості SI^a та адаптаційної спроможності ACI^a дозволили оцінити рівень кліматичного ризику R^a для атомної енергетики України. Отримане значення інтегрального індексу кліматичного ризику $R^c = 0,53$ свідчить що кліматичний ризик, зумовлений зміною клімату, має *помірний рівень впливу* на атомну енергетику України в короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5.

Водночас слід враховувати, що отримана оцінка характеризує узагальнений рівень ризику та не повною мірою відображає потенційні системні, каскадні та високонаслідкові ризики, характерні для об'єктів критичної інфраструктури, зокрема атомної енергетики. Крім того, результати оцінки суттєво залежать від обраної методики агрегування індикаторів, системи вагових коефіцієнтів та набору врахованих кліматичних небезпек.

5.2.2 Оцінка кліматичного ризику для атомної енергетики усередньоостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для атомної енергетики у середньоостроковій (2041-2060 рр,) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності сонячної енергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпечності, експозиції, та ризику на середньоострокову (2041-2060 рр,) перспективу.

Результати *оцінки інтегрованого індексу кліматичної небезпечності* для атомної енергетики, зумовленою зміною клімату у середньоостроковій перспективі представлено у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Оцінка індикаторів кліматичної небезпечності для атомної енергетики у середньоостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^a_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^a_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^a_{hi} *$	Внесок у індекс $H^a_i \times w^a_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Підвищення температури води зменшення ефективності охолодження турбіни/генератора	0,69	0,2	0,094
2	Величина градусоднів для системи охолодження, °C	Збільшення навантаження у період максимального підвищення температури повітря, перегрів обладнання, скорочення ремонтного періоду.	0,37	0,1	0,057
3	Максимальна тривалість бездошового періоду за рік, дні	Зростання посушливості, зменшення води на охолодження та підвищення її температури води, зменшення ефективності охолодження,	0,35	0,25	0,12
4	Кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, дні	Можливе зростання температур води понад допустимі межі, зниження ефективності роботи системи охолодження активної зони реактора та герметичної оболонки.	0,46	0,2	0,064
5	Стандартизовані й індекс опадів - евапотранспірації (SPEI-6) за 6 місяців	Дефіцит поди на охолодження	0,67	0,25	0,17
6,	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,37	0,15	0,05
Інтегральний індекс небезпеки H^c				1	0,54

*за експертною оцінкою авторів

Встановлено що у середньостроковій перспективі інтегрований індекс кліматичної небезпеки для атомної енергетики України, хоч і зросте порівняно з 2021-2040рр, проте також матиме *помірний рівень кліматичної небезпеки* ($H^c = 0,54$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8,5 і визначатиметься:

- зростанням середньої максимальної температури повітря літом на $1,2^{\circ}\text{C}$, її медіани на $1,7^{\circ}\text{C}$, а її 95 перцентилу на $2,8^{\circ}\text{C}$;
- збільшенням кількості спекотних днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище у середньому на 4 дні, 95% - на 10 днів;
- зростання інтенсивності опадів, зокрема збільшенням кількості опадів 20мм за добу і більше на 26,4% а їхньої 95 перцентилі на 63%;
- збільшенням тривалості бездошового періоду на 1,0-5,0 днів. Як наслідок він може у середньому тривати більше місяця;
- збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 16,1%. При цьому величина 95% перцентилі може зрости майже на 45,3%, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5% перцентилі на 26,2% - про посилення гідрологічної посухи. Тобто в середньостроковій перспективі в Україні збільшиться як ймовірність паводків, так і посух, що може становити загрозу для атомної енергетики.

Результати оцінки інтегрованого індексу експозиції атомної енергетики для атомної енергетики, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.7.

Таблиця 5.7 - Оцінка індикаторів експозиції для атомної енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^a_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^a_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^a_{ei} *$	Внесок у індекс $E^a_i \times w^a_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми	0,60	0,4	0,24
2	Економічна ефективність	Знижують прибутковість, підвищують витрати, створюють ризики для інвестицій	0,70	0,3	0,21
3	Екологічна безпека	Забезпечення норм радіаційної безпеки,	0,85	0,3	0,255

		цілісності системи зберігання радіоактивних відходів			
Інтегральний індекс експозиції EF^c				1,00	0,70

*за експертною оцінкою авторів

У середньостроковій перспективі *рівень експозиції* атомної енергетики України може зрости за рахунок збільшення внеску екологічної безпеки та виробничої потужності, порівняно з 2021-2040рр. і *матиме високий рівень* ($EF^a = 0,7$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8.5

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпечності HI^a і експозиції EF^a за умови не суттєвої зміни чутливості і адаптаційної спроможності дозволяють оцінити кліматичний ризик R^a для атомної енергетики України у середньостроковій перспективі. Його величина до середини століття збільшиться, порівняно з 2021-2040 рр, проте матиме *помірний рівень впливу* на атомну енергетику України за реалізації сценарію РТК8.5.

Отже, атомна енергетика в Україні у динамічному розрізі не піддається значною мірою ризикам зміни клімату: індекс кліматичного ризику є помірним у короткостроковій перспективі, несуттєво зростає у середньостроковій перспективі, проте також залишається на помірному рівні. Такий висновок має середню достовірність, оскільки фізика процесу добре обґрунтована, проте є невизначеність щодо майбутнього водозабезпечення, воєнних ризиків та стану інфраструктури.

Незважаючи на помірний рівень кліматичної небезпечності, високий рівень експозиції та чутливості до зміни клімату помірна адаптаційна спроможність атомної енергетики зменшує її вразливість до зміни клімату. Цьому сприяє реалізація інноваційних рішень щодо модернізації систем охолодження, повторного використання води в системах охолодження тощо.

5.2.3 Пріоритетні напрямки адаптації атомної енергетики до зміни клімату. Пріоритетні напрямки адаптації атомної енергетики до зміни клімату охоплюють технічні, організаційні та стратегічні заходи, спрямовані на

підвищення стійкості енергоблоків, систем охолодження, інфраструктури і управління ризиками у відповідь на кліматичні загрози. До них належать:

1. Підвищення стійкості до хвиль тепла і посух:

- модернізація систем охолодження (наприклад, використання замкнених або сухих систем замість проточних);
- оцінка і управління водними ресурсами, включаючи альтернативні джерела води для охолодження;
- впровадження технологій, менш чутливих до температури навколишнього середовища.

2. Зміцнення інфраструктури до екстремальних погодних умов:

- зміцнення будівель і систем до сильного вітру, ожеледі, налипання мокрого снігу, граду тощо;
- оцінка вразливості об'єктів до паводків, підтоплень і підняття рівня води у водосховищах.

3. Удосконалення управління ризиками та моніторингу;

- інтеграція кліматичних сценаріїв (RCP, SSP) у планування та ризик-менеджмент;
- розробка і впровадження систем раннього попередження для небезпечних явищ погоди;
- покращення кліматичного і гідрометеорологічного моніторингу на рівні майданчиків АЕС.

4. Забезпечення гнучкості в роботі енергосистеми:

- інтеграція АЕС в гнучкі енергосистеми, де можливе балансування з ВДЕ та іншими джерелами;
- оптимізація режимів роботи АЕС відповідно до кліматичних коливань попиту та доступності охолодження.

5. Адаптація нормативно-правової бази:

- актуалізація стандартів безпеки, що враховують нові кліматичні ризики;

- інтеграція вимог адаптації до зміни клімату в процедури ліцензування та оцінки впливу на довкілля (ОВД).

6. Підвищення адаптаційної спроможності персоналу і управління:

- навчання персоналу діям у разі екстремальних погодних подій;
- резервні плани та сценарії реагування на надзвичайні ситуації (heat stress, blackout, затоплення).

7. Залучення фінансування на кліматичну адаптацію:

- використання механізмів кліматичного фінансування (зелені облігації, підтримка від міжнародних партнерів);

- вартісна оцінка кліматичних ризиків для включення в стратегії управління активами.

8. Міжсекторальна та територіальна інтеграція:

- координація з водним господарством, агросектором, лісовим господарством, щоб запобігти конфліктам через ресурси (вода, земля);

- урахування місцевих кліматичних умов та соціально-економічного контексту при плануванні адаптаційних заходів.

5.3 Теплова енергетика

Теплова електрична станція є надійним і захищеним об'єктом критичної інфраструктури. Але важливою є проблема надійності роботи теплосилового обладнання на яке можуть впливати кліматичні чинники. Основними кліматичними загрозами, що можуть впливати на безпеку та ефективність роботи теплової енергетики слід вважати зміни у кількості атмосферних опадів, підвищенні температури повітря (рис.5.2).

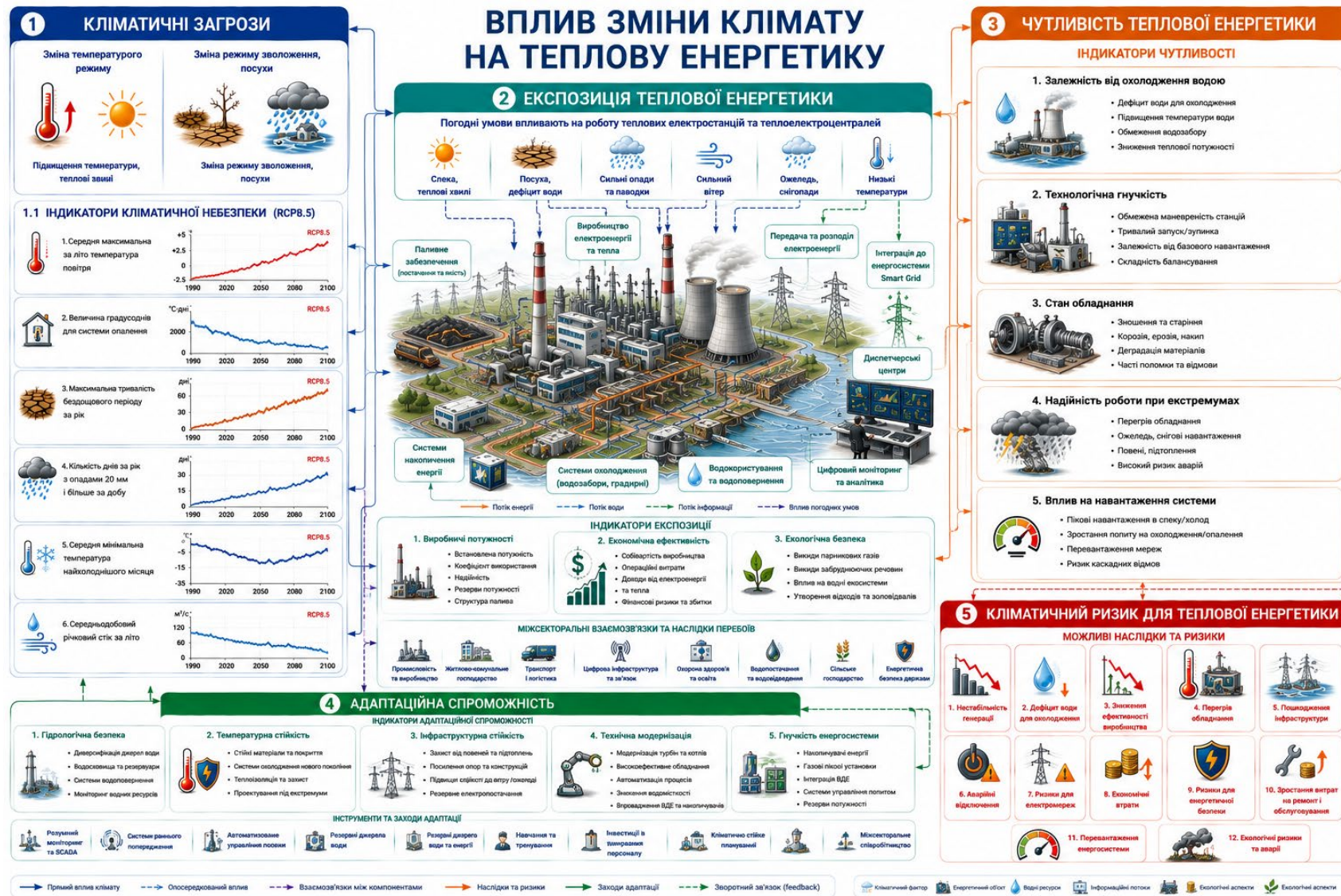


Рис.5.2 Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату в тепловій енергетиці

Під їхнім впливом безпосередньо перебувають такі об'єкти (системи) теплової електростанції, як система охолодження турбіни/ генератора, система зберігання палива (вугілля), система контролю викидів. Основними факторами чутливості є залежність від охолодження водою системи турбіна/генератор, технологічна гнучкість щодо ефективності згоряння палива, ефективність теплового перетворення (рис.5.2).

5.3.1 Оцінка кліматичного ризику для теплової енергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі. Оцінка індексу небезпеки.

Основними кліматичними загрозами для теплової енергетики є зміна кількості опадів і підвищення температури повітря. На теплову енергетику впливає і швидкість вітру. Проте очікується що вона зменшуватиметься як у короткостроковій перспективі, так і в середньостроковій, тому для оцінки кліматичних загроз, зумовлених зміною клімату її використовувати недоцільно. То ж для оцінки кліматичних загроз для теплової енергетики використовували такі індикаторами як середню максимальну за літо температуру повітря, кількість днів з максимальною за добу температурою повітря 35°C і вище, величину градусоднів для системи охолодження, кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, максимальну тривалість бездошового періоду за рік, середню мінімальну температуру найхолоднішого місяця, величину середнього за літо середньодобового річкового стоку.

Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для теплової енергетики у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Оцінка індикаторів кліматичної небезпеки для теплової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^T_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^T_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^T_{hi} *$	Внесок у індекс $H^T_i \times w^T_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Підвищення температури води зменшення ефективності охолодження	0,5	0,25	0,13

2	Величина градусоднів для системи опалення, °С	Визначає сезонне навантаження на ТЕС. режим роботи ТЕС, попит на теплову енергію, ефективність когенераційних установок	0,67	0,25	0,17
3	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік	Охолодження обладнання, нестача технічної води, проблеми з якістю води, пожежна небезпека	0,36	0,2	0,07
4	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Затоплення критичної інфраструктури, складів з паливом	0,12	0,1	0,01
5	Середня мінімальна температура найхолоднішого місяця, °С	Ускладнення роботи обладнання, підготовки палива (вугілля) до спалювання	0,32	0,1	0,03
6	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,3	0,1	0,03
Інтегральний індекс безпеки HI^T				1,00	0,44

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз внеску індикаторів кліматичної небезпеки в Інтегральний індекс безпеки HI^T показав, що найбільший вплив на роботу ТЕС здійснює величина градусоднів для системи опалення. Небезпечними для теплової енергетики в короткостроковій перспективі є й підвищення середньої максимальної за літо температури повітря та збільшення максимальної тривалості бездощового періоду. Ці індикатори сприяють зростанню посушливості, зменшенню води на охолодження та підвищення її температури, підвищенню пожежної небезпеки і можуть зменшити виробництво електроенергії. У періоди високих температур зростає споживання електроенергії на охолодження приміщень, що підвищує навантаження на мережу і самі теплоелектростанції. Неможливість дотримання температурного режиму та недостатня кількість води збільшують ризик аварій або аварійних зупинок.

Отримане значення Інтегрального індексу кліматичної небезпеки для теплової енергетики ($HI^T = 0,44$) свідчить що у короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 теплова енергетика України матиме помірний рівень кліматичної небезпеки до зміни клімату і визначатиметься:

- зростанням середньої максимальної температури повітря літом на $0,7^{\circ}\text{C}$, збільшенням її 95 перцентилю на $2,0^{\circ}\text{C}$;
- зростання інтенсивності опадів, зокрема збільшенням кількості опадів 20мм за добу і більше на 22,5% а їхньої 95 перцентилі на 42%;
- збільшенням тривалості бездошового періоду на 0,5-3,5 днів. Як наслідок він може у середньому тривати більше місяця;
- підвищенням середньої мінімальної температури найхолоднішого місяця на $0,9^{\circ}\text{C}$;
- збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 11,6%, При цьому величина 95% перцентилі може зрости майже на 45%, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5% перцентилі на 19%;
- посиленням гідрологічної посухи.

Оцінка індексу експозиції. Індикаторами, які характеризують перебування об'єктів теплової енергетики під дією кліматичних загроз, можуть виступати виробничі потужності, економічна ефективність та екологічна безпека (табл.5.9).

Висока температура повітря та дефіцит води є критичними кліматичними загрозами для теплової енергетики, оскільки безпосередньо впливають на виробничі потужності, ефективність та надійність роботи електростанцій.. Теплові електростанції використовують воду або повітря для охолодження турбін і конденсаторів. Підвищення температури повітря та води погіршує ефективність систем охолодження теплових електростанцій, що призводить до зниження ККД та втрати генерувальної потужності. За даними

досліджень^{77,78,79}, підвищення температури повітря на 1 °C може знижувати ефективність ТЕС приблизно на 0,1–0,5% та зменшувати доступну потужність на 1–2%.

Високі температури і дефіцит води негативно впливають на *економічну ефективність* виробництва енергії на ТЕС, оскільки зумовлюють одночасне зниження виробітку, зростання витрат та підвищення ризиків для стабільного функціонування. Через перегрів конденсаторів і зниження ефективності охолодження втрачається частина встановленої потужності. Дефіцит охолоджувальної води та підвищення температури водних об'єктів можуть обмежувати роботу теплових електростанцій, змушуючи їх знижувати потужність або тимчасово припиняти експлуатацію. Це призводить до скорочення виробництва електроенергії, зменшення доходів та зростання економічних втрат енергетичного сектору. За даними міжнародних досліджень^{77,80}, тривалі періоди спеки та водного дефіциту можуть суттєво впливати на генерацію електроенергії тепловими електростанціями⁸¹. Дефіцит води зумовлює вищу конкуренцію за ресурси що приводить до зростання вартості водозабору або очищення. У випадках жорстких екологічних обмежень (наприклад, ліміти на температурні скиди) можуть знадобитись інвестиції в модернізацію охолоджувальних систем.

⁷⁷ van Vliet, M. T. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Vogeley, S., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2012). *Vulnerability of US and European electricity supply to climate change*. *Nature Climate Change*, 2(9), 676–681. <https://doi.org/10.1038/nclimate1546>

⁷⁸ Mehdi, S. (n.d.). *The effect of ambient temperature to power plant efficiency*. Budapest University of Technology and Economics. <https://energia.bme.hu/~groniewsky/Egyeb/HM-HF/11.pdf>

⁷⁹ U.S. Energy Information Administration. (n.d.). *Power plant efficiency*. <https://www.eia.gov/>

⁸⁰ World Bank. (2013). *Turn down the heat: Climate extremes, regional impacts, and the case for resilience*. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/280511468336571420/pdf/715040ESW0P0950R0PUBLIC00Power0Water.pdf>

⁸¹ IEA. (2022). *Climate impacts on energy systems*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/climate-impacts-on-energy-systems>

Зміна температурного режиму (зокрема підвищення температури повітря і води) та режиму зволоження (посухи, дефіцит води, зменшення опадів) має серйозний вплив на екологічну безпеку ТЕС⁷⁷. Ці кліматичні зміни загострюють існуючі екологічні ризики, а також створюють нові, пов'язані з водними, повітряними і ґрунтовими ресурсами, біорізноманіттям і здоров'ям населення⁸². Підвищення температури повітря та недостатнє зволоження знижують об'єм і рівень води у річках, ставках, водосховищах. При скиданні нагрітої охолоджувальної води з теплових електростанцій у водні об'єкти може відбуватися перегрів водойм та порушення їх природного температурного режиму. Підвищення температури води сприяє зменшенню концентрації розчиненого кисню, погіршенню умов існування водних організмів, розвитку процесів деградації екосистем та може призводити до масової загибелі риби й інших гідробіонтів. Особливо небезпечними є тривалі періоди високих температур води, близьких або вищих за 28–30 °С для окремих типів водойм.⁸³⁸⁴ Скорочення водних ресурсів призводить до концентрації забруднень, оскільки із зменшенням об'ємів води розбавлення стічних вод стає недостатнім. Це підвищує концентрації хімічних домішок, важких металів, що скидаються ТЕС. Можливе порушення екологічних нормативів скидів навіть при дотриманні доз. Наслідком цього є хімічне забруднення річок, погіршення якості питної води, евтрофікація водойм⁸⁵.

Висока температура і посуха сприяють накопиченню шкідливих викидів у приземному шарі повітря (SO₂, NO_x, пилу, важких металів). У поєднанні з інверсією і відсутністю опадів ці викиди погано розсіюються і сприяють загостренню респіраторних хвороб у населення, високій концентрації озону,

⁸² Ganguli, P., Kumar, D., & Ganguly, A. R. (2015). *Water stress on U.S. power production at decadal time horizons*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1511.08449>

⁸³ Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.

⁸⁴ Encyclopaedia Britannica. (n.d.). *Thermal pollution*. <https://www.britannica.com/science/thermal-pollution>

⁸⁵ U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Thermal pollution and aquatic life*. <https://www.epa.gov/cooling-water-intakes/thermal-pollution-and-aquatic-life>

особливо у міських агломераціях, зростанню частоти днів із задухою і смогом⁸⁶.

ТЕС можуть сприяти локальному підвищенню температури та втраті вологи внаслідок термічного забруднення⁸⁷. В умовах зміни клімату це накладається на природну посуху, посилюючи деградацію прибережних екосистем, опустелювання територій, вразливість до лісових пожеж.

За високих температур та дефіциту води зростає й ризик перегріву обладнання, що приводить до аварійних ситуацій, пожеж, вибухів, порушення герметичності резервуарів, трубопроводів і, як наслідок, до витоку мазуту, реагентів, збоїв у системах очищення води або димових газів і зрештою до хімічного забруднення території^{88, 89}.

Проведена оцінка індикаторів експозиції для теплової енергетики, зокрема виробничих потужностей, економічної ефективності та екологічної безпеки показала, що їхній внесок в інтегрований індикатор експозиції майже рівнозначний з урахуванням впливу зміни кліматичних чинників у короткостроковій перспективі (табл.5.9).

Таблиця 5.9 – Оцінка індикаторів експозиції для теплової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^T_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^T_i^*$	Ваговий коефіцієнт w_{ei}^T	Внесок у індекс $E^T_i \times w_{si}^T$
1	Виробнича потужність	Забезпечення регулюючих потужностей енергосистеми	0,30	0,4	0,12
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,60	0,3	0,18

⁸⁶ World Health Organization. (2023). *Climate change and health*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

⁸⁷ U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Thermal pollution and aquatic life*. <https://www.epa.gov/cooling-water-intakes/thermal-pollution-and-aquatic-life>

⁸⁸ European Environment Agency. (2021). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2021*. <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2021>

⁸⁹ OECD. (2015). *Climate change adaptation: Guidance for disaster risk management and Natech risk reduction*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/>

3	Екологічна безпека	Збільшення викидів шкідливих речовин (золи), парникових газів	0,70	0,3	0,21
	Інтегральний індекс експозиції EI^T			1,00	0,51

Встановлено, що теплова енергетика України ймовірно *матиме помірний рівень експозиції* ($EI^T = 0,51$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 до 2040 року. Такий рівень значною мірою зумовлений тим що значна частина її об'єктів розташована в регіонах, де вже спостерігаються або прогножуються суттєві кліматичні зміни, однак рівень прямого кліматичного впливу є неоднорідним і не охоплює одночасно всі електростанції.

Водночас експозиція оцінюється як помірна, а не висока, оскільки кліматичні небезпеки мають регіонально неоднорідний характер, частина об'єктів розташована поза зонами найбільш небезпечних кліматичних впливів, теплова енергетика має певну технічну та територіальну диверсифікацію, значна частина інфраструктури вже проєктувалася з урахуванням широкого діапазону погодних умов, вплив окремих кліматичних чинників часто має поступовий, а не катастрофічний характер.

Крім того, експозиція теплової енергетики частково стримується наявністю резервних потужностей, можливістю маневрування режимами роботи та інтеграцією в об'єднану енергосистему. Проте в умовах подальшого потепління клімату, збільшення повторюваності хвиль спеки та дефіциту водних ресурсів рівень експозиції теплової енергетики зростатиме, особливо у південних та східних регіонах України.

Оцінка індексу чутливості. Продуктивність і стабільність роботи ТЕС значно залежать від впливу кліматичних чинників, зокрема наявності води, необхідної для стабільної роботи підприємств із виробництва електричної та теплової енергії. Основними індикаторами чутливості теплової енергетики можуть бути залежність від охолодження водою, технологічна гнучкість, вік та модернізація систем, обмеження на температуру скидної води, висока капіталомісткість модернізації. Оцінку внеску цих індикаторів у Інтегральний індекс чутливості S^c представлено в табл.5.10.

Таблиця 5.10 – Оцінка індикаторів чутливості для теплової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^c_i	Вплив	Нормалізоване значення S^c_i *	Ваговий коефіцієнт w^c_{si} *	Внесок у індекс $S^c_i \times w^c_{si}$
1	Залежність від охолодження водою	Обсяг води, потрібний для роботи	0,75	0.35	0.26
2	Технологічна гнучкість	Забезпечення ефективності згоряння різних видів палива	0,65	0.2	0.13
3	Стан обладнання	Зниження ефективності систем спалювання, зниження ККД	0,75	0.2	0.15
4	Надійність роботи при екстремумах	Збільшення використання палива	0,4	0.15	0.06
5	Вплив на навантаження системи	Забезпечує функціонування енергосистеми в режимах пікових навантажень	0,55	0.10	0.055
Інтегральний індекс чутливості S^c				1.00	0.68

* - за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз показав, що тепла енергетика України *матиме значний рівень чутливості* ($S^c = 0,68$) до зміни клімату в короткостроковій перспективі, оскільки тепла енергетика суттєво залежить від дислокації, типу охолодження, віку блоку, а також рівня модернізації. ТЕС побудовані в 1960-1970 роках мають низьку і помірну технологічну гнучкість (застарілі системи охолодження, обмежена автоматизація), що впливає на здатність адаптуватися до зміни клімату, підтримувати безпечну і ефективну роботу в нових кліматичних умовах, можливість змінювати режим роботи, готовність до інтеграції нових технологій охолодження, діагностики, управління ризиками; висока капіталомісткість модернізації ускладнює технічну адаптацію.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Основною метою адаптації енергетичних систем до зміни клімату є забезпечення сталого енергопостачання та збалансованості виробництва та споживання у часі та просторі. Індикаторами адаптаційної спроможності теплової енергетики можуть бути *гідрологічна безпека, температурна стійкість, інфраструктурна стійкість, технічна модернізація, гнучкість енергосистеми* (табл. 5.11). Визначення зазначених індикаторів для теплової енергетики ідентичні як і для атомної енергетики.

Залежність адаптаційної спроможності теплової енергетики від *технічної модернізації* є прямою і стратегічною: чим вищий рівень модернізації технологій, систем і обладнання на ТЕС, тим вища здатність станції ефективно функціонувати та безпечно реагувати на нові кліматичні виклики, технологічні ризики й екологічні обмеження. Однак, нажаль, впровадження заходів з модернізації ТЕС стримується у зв'язку із «зеленим» переходом, напрацьовується стратегія виведення з експлуатації ТЕС та доцільності їх відновлення внаслідок обстрілів з боку росії.

Проведений аналіз внеску індикаторів адаптаційної спроможності для теплової енергетики у короткостроковій перспективі представлено в табл.5.11.

Таблиця 5.11 – Оцінка індикаторів адаптаційної спроможності для теплової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC_i^c	Пояснення	Нормалізоване значення $AC_i^c *$	Ваговий коефіцієнт $w_{aci}^c *$	Внесок у індекс $AC_i^c \times w_{si}^c$
1	Гідрологічна безпека	Вплив зміни клімату на водні ресурси для охолодження	0,6	0,20	0,12
2	Температурна стійкість	Здатність працювати під час аномальної спеки	0,7	0,20	0,14
3	Інфраструктурна стійкість	Захищеність від фізичних загроз (війна, тероризм)	0,65	0,25	0,162

4	Технічна модернізація	Стан виконання заходів безпеки	0,6	0,20	0,12
5	Гнучкість енергосистеми	Здатність до інтеграції з іншими джерелами енергії	0,75	0,15	0,105
	Інтегральний індекс адаптаційної спроможності AC^c_i			1,00	0.65

* - за експертною оцінкою авторів

Аналіз адаптаційної спроможності теплової енергетики України до зміни клімату показав, що в короткостроковій перспективі вона має *помірну здатність до адаптації* ($ACI^T = 0,65$):

- присутні інноваційні рішення щодо модернізації систем охолодження, повторного використання води в системах охолодження тощо ;
- доступні у достатніх кількості та якості водні ресурси для забезпечення сталої роботи енергетики;
- до повномасштабної агресії росії ТЕС в Україні генерували близько 30–35% електроенергії та переважно забезпечували балансування енергетичної системи в умовах обмеженої кількості ГАЕС, повільної модернізації мереж, низького рівня автоматизації попиту і пропозиції, а також складної інтеграції ВДЕ (зокрема через денні піки сонячної генерації, що зменшують потребу в базовій генерації).

Встановлені інтегровані індекси чутливості та адаптаційної спроможності дозволяють оцінити *інтегрований індекс вразливості* V^T теплової енергетики). Його величина становить 0,52 і свідчить про те що теплова енергетика в Україні має *помірний рівень* вразливості.

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпеки HI^c , експозиції EI^T та вразливості V^T дозволяють оцінити кліматичний ризик R^T для теплової енергетики України. Отримане інтегральне значення кліматичного ризику $R^T = 0,49$ свідчить що кліматичний ризик, зумовлений зміною клімату, матиме *помірний рівень впливу* на теплову енергетику України в короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5.

5.3.2 Оцінка кліматичного ризику для теплової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для теплової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності теплової енергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу, з огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову (2041-2060 рр.) перспективу.

Результати оцінки інтегрованого індексу кліматичної небезпеки для теплової енергетики, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.12.

Таблиця 5.12 - Оцінка індикаторів кліматичної небезпеки та вразливості для теплової енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки $H^T i$	Вплив	Нормалізоване значення $H^T i^*$	Ваговий коефіцієнт w_{hi}^T *	Внесок у індекс $H^T i \times w_{hi}^T$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °С	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,69	0,25	0,17
2	Величина градусоднів для системи охолодження, °С	Збільшення навантаження у період максимального підвищення температури повітря, перегрів обладнання, скорочення ремонтного періоду	0,45	0,25	0,11
3	Максимальна тривалість бездошового періоду за рік, дні	Підвищення температури води, ускладнення системи охолодження турбіна/генератор	0,36	0,2	0,07
4	Середня мінімальна температура	Ускладнення роботи обладнання, підготовки палива (вугілля) до спалювання	0,62	0,1	0,06

	найхолоднішого місяця, °C				
5	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Затоплення критичної інфраструктури, складів з паливом	0,09	0,1	0,01
6.	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зменшення рівня води в річках, перегрів охолоджуючої води	0,37	0,14	0,05
Інтегральний індекс небезпеки HI^T				1,00	0,47

*за експертною оцінкою авторів

Встановлено що у середньостроковій перспективі інтегрований індекс кліматичної небезпеки для теплової енергетики України, хоч і зросте порівняно з 2021-2040рр, проте також матиме *помірний рівень кліматичної небезпеки* ($HI^T= 0,47$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8,5 і визначатиметься:

- зростанням середньої максимальної температури повітря літом на $1,2^{\circ}\text{C}$, її медіани на $1,7^{\circ}\text{C}$, а її 95 перцентилю на $2,8^{\circ}\text{C}$;
- зростання інтенсивності опадів, зокрема збільшенням кількості опадів 20мм за добу і більше на 26,4% а їхньої 95 перцентилі на 63%;
- збільшенням тривалості бездошового періоду на 1,0-5,0 днів, Як наслідок він може у середньому тривати більше місяця;
- підвищенням мінімальної температури найхолоднішого місяця на 2.2°C , а її 95 перцентилі на $3,6^{\circ}\text{C}$;
- збільшення середньої за добу величини річкового стоку влітку на 16,1%, При цьому величина 95% перцентилі може зрости майже на 45,3%, що свідчить про зростання загрози паводків, а зменшення 5% перцентилі на 26,2% - про посилення гідрологічної посухи, Тобто в середньостроковій перспективі в Україні збільшиться як ймовірність паводків, так і посух, що може становити загрозу для теплової енергетики.

Результати *оцінки інтегрованого індексу експозиції* для теплової енергетики, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.13.

Таблиця 5.13 – Оцінка індикаторів експозиції для теплової енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^T_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^T_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^T_{ei}^*$	Внесок у індекс $E^T_i \times w^T_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми	0,6	0,4	0,24
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,55	0,3	0,165
3	Екологічна безпека	Збільшення викидів шкідливих речовин (золи), парникових газів	0,8	0,3	0,24
Інтегральний індекс експозиції EI^T				1,00	0,65

*за експертною оцінкою авторів

У середньостроковій перспективі *рівень експозиції* теплової енергетики України може зрости за рахунок збільшення внеску екологічної безпеки та виробничої потужності, порівняно з 2021-2040рр. і матиме високий рівень ($EI^T = 0,65$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8.5.

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпечності NI^T і експозиції EI^T за умови не суттєвої зміни чутливості і адаптаційної спроможності дозволяють оцінити кліматичний ризик R^T для теплової енергетики України у середньостроковій перспективі. Отримане інтегральне значення кліматичного ризику $R^T = 0,55$ свідчить що кліматичний ризик, зумовлений зміною клімату в середньостроковій перспективі зростатиме проте матиме помірний *рівень впливу* на теплову енергетику України за реалізації сценарію РТК8.5.

Отже, не зважаючи на помірний рівень кліматичної небезпечності, високий рівень експозиції та чутливості до зміни клімату помірною адаптаційною спроможністю теплової енергетики зменшує її вразливість до зміни клімату. Як

наслідок, кліматичний ризик, зумовлений зміною клімату, має на неї помірний рівень впливу.

5.3.3 Пріоритетні напрямки адаптації теплової енергетики до зміни клімату. Пріоритетні напрямки адаптації теплової енергетики (ТЕС, ТЕЦ, когенераційні установки) до зміни клімату охоплюють заходи щодо зменшення вразливості до кліматичних загроз, зокрема спеки, посух, паводків, сильних опадів і вітру, з урахуванням залежності від водних ресурсів, палива і мереж. Нижче подано структурований перелік основних адаптаційних напрямків:

1. Підвищення стійкості до спеки і хвиль тепла:

- модернізація систем охолодження, перехід до більш ефективних систем;
- оптимізація графіка роботи обладнання в періоди екстремальної спеки для зниження навантаження;
- зменшення втрат продуктивності при підвищенні температури шляхом модернізації турбін і теплообмінників.

2. Адаптація до дефіциту водних ресурсів і посух:

- перехід на технології з меншим водозабором або замкнуті системи водообігу;
- використання очищеної стічної води або альтернативних джерел для технічного водопостачання;
- врахування прогнозів зміни річкового стоку у плануванні потужностей і нових ТЕС.

3. Захист від паводків, злив і екстремальних опадів:

- підняття рівня критично важливих об'єктів над рівнем можливого підтоплення;
- поліпшення дренажних і зливових систем, захист кабельних каналів;
- створення резервних систем електроживлення та управління у випадку затоплення.

4. Зміцнення до вітрових навантажень та інших стихійних явищ:

- посилення конструкцій дахів, градирень, димових труб, систем вентиляції.

- регулярна інвентаризація й укріплення об'єктів, що піддаються вітровому навантаженню.

5. Інтеграція гнучкості в роботу енергосистеми:

- розвиток гнучких режимів роботи (наприклад, часткове навантаження, швидке включення/вимкнення);

- інтеграція з ВДЕ та накопичувачами енергії, щоб зменшити залежність від однотипного навантаження;

- цифровізація управління енергоустановками з урахуванням кліматичних даних.

6. Удосконалення систем оцінки ризиків і планування:

- використання кліматичних сценаріїв (RCP, SSP) для оцінки довгострокових ризиків;

- проведення регулярних оцінок вразливості до зміни клімату за стандартами типу ISO 14091:2021⁷⁶;

- створення планів безперервності діяльності в умовах кліматичних потрясінь.

7. Підвищення кваліфікації персоналу і готовності до дій:

- навчання оперативного персоналу реагуванню на екстремальні кліматичні ситуації;

- регулярні тренування і симуляції кризових ситуацій (посуха, blackout, спека).

8. Актуалізація нормативно-правової бази:

- оновлення технічних регламентів з урахуванням кліматичних ризиків.

- впровадження вимог до врахування кліматичних загроз у проектуванні нових ТЕС.

9. Зменшення вуглецевого сліду і адаптація до зеленого переходу:

- перехід на менш вуглецевомістке паливо (газ, біомаса, водень);

- інтеграція CCS/CCU (уловлювання вуглецю) в проєкти нових потужностей;

- поєднання виробництва тепла й енергії з елементами "зеленого" переходу.

10. Координація з іншими секторами та територіями:

- узгодження дій із місцевими органами водного господарства, службами цивільного захисту;

- оцінка конкуренції за ресурси (воду, паливо, землю) в умовах зміни клімату.

5.4 Гідроенергетика

Гідроенергетика є однією з найчутливіших до кліматичних змін галузей енергетики, оскільки її ефективність безпосередньо залежить від природного водообігу. На функціонування гідроелектростанцій (ГЕС) та гідроакумуючих електростанцій (ГАЕС) істотно впливають температура повітря, кількість і характер опадів, сніговий покрив, рівень випаровування тощо. Зміни цих кліматичних факторів впливають на водні ресурси, що визначають доступність води, стабільність виробництва електроенергії, а також надійність і безпечну експлуатацію гідротехнічних споруд (рис. 5.3).

В Україні ГЕС і ГАЕС виробляють близько 7% електроенергії. Зазвичай такі станції використовують для покриття пікового навантаження в енергосистемі. ГАЕС зазвичай вночі перекачують воду в водосховища-накопичувачі, коли споживання низьке, а в години найбільшого попиту (вранці та ввечері) використовують її для генерації. Крім того, ГАЕС відіграють роль резерву, що дозволяє швидко реагувати на раптові дефіцити потужності в енергосистемі.

Однак виробництво електроенергії на ГЕС значною мірою залежить від обсягів річкового стоку — ключового компонента водного балансу. Річковий

стік визначається кількістю опадів, які, в умовах потепління, змінюють свій річний розподіл, інтенсивність, повторюваність та форму. Зростання температури повітря спричиняє також підвищене випаровування і частіші посухи, що зменшує обсяг води у річках і водосховищах, від яких залежить генерація енергії на ГЕС.

Серед основних кліматичних загроз, які впливають на ефективність роботи гідроенергетичних об'єктів, слід відокремити екстремальні температури повітря, посухи, зменшення річкового стоку, зміну режиму опадів. Ці чинники можуть безпосередньо впливати на гідротехнічні споруди — греблі, водосховища, турбіни, генератори, тощо (рис. 5.3).

Основним ресурсом для гідроелектростанцій є вода. Обсяг річкового стоку визначає як енергетичний потенціал, так і стабільність роботи станцій. У роки з дефіцитом води ГЕС можуть виробляти на 30–50% менше електроенергії ніж зазвичай. Особливо критичним є зменшення обсягів стоку влітку — у період зростаючого попиту на енергію (через зрошення, кондиціонування тощо).

Опади є ключовим джерелом води, тому їх кількість, інтенсивність, форма (сніг чи дощ) і сезонний розподіл визначають виробничу ефективність гідроенергетики. Дефіцит опадів сприяє посухам і зменшенню генерації енергії. Водночас інтенсивні опади можуть створювати надлишок води, що підвищує ризик паводків, які загрожують інфраструктурі гідроенергетики.

Підвищення температури повітря збільшує втрати води через випаровування (влітку в південних регіонах до 20–30% обсягу стоку). Теплі зими зменшують кількість снігу, що скорочує весняне водопостачання і повені — традиційне джерело весняного піку генерації. Раннє танення снігу знижує тривалість і потужність паводків, що зменшує доступний обсяг води навесні

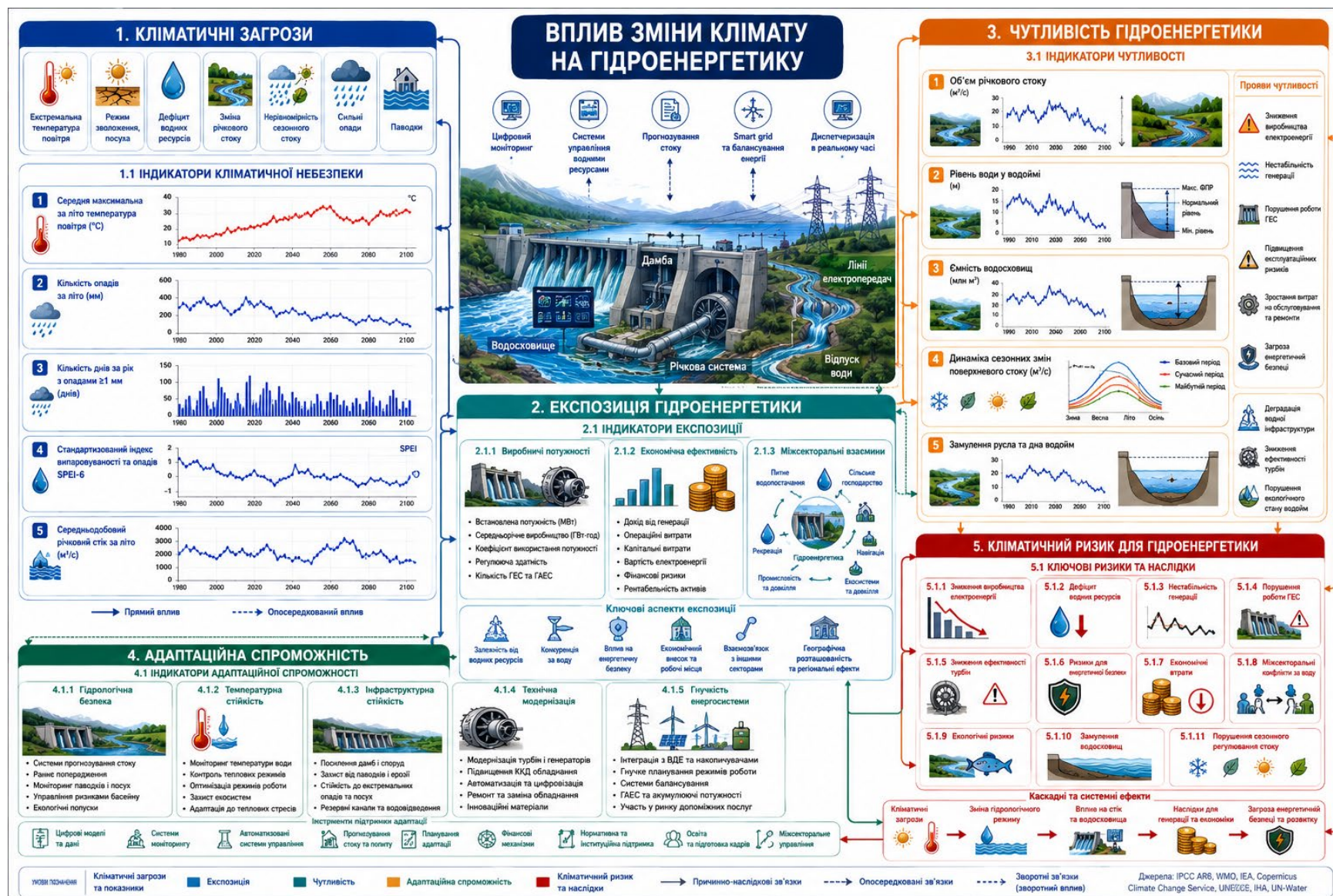


Рис. 5.3 - Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату на гідроенергетику

.5.4.1 Оцінка кліматичного ризику для гідроенергетики у короткостроковій перспективі.

Оцінка індексу кліматичної небезпеки. Основними кліматичними загрозами для гідроенергетики є підвищення температури повітря, збільшення випаровуваності, зміна кількості опадів та днів з опадами, зменшення річкового стоку. Для оцінки кліматичних ризиків для гідроенергетики використовували такі індикатори кліматичної небезпеки: середню за добу величину річкового стоку у літній період, середню максимальну температуру повітря і кількість опадів за літо, стандартизований індекс опадів та сумарного випаровування за теплий період (SPEI-6). Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для гідроенергетики у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Оцінка кліматичної небезпеки для гідроенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^i	Вплив	Нормалізоване значення $H^i *$	Ваговий коефіцієнт w_{hi}^*	Внесок у індекс $H^i \times w_{hi}$
1	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зміни у сезонності, обсягах води, виробництві електроенергії, тривалості паводків, маловоддя	0,3	0,4	0,12
2	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Зростання температур → зниження снігового покриву	0,5	0,2	0,1
3	Кількість опадів за літо, мм	Рівень води у водосховищі та стік річки, обсяг виробництва електроенергії, акумуляція води для наступних сезонів	0,48	0,1	0,048
4	Кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, дні	Рівень води у водосховищі та стік річк, баланс в енергосистемі	0,63	0,2	0,126
5	Стандартизований індекс опадів - евапотранспірації	Зменшення об'єму доступної води для генерації, зниження	0,67	0,1	0,067

	ї (SPEI-6) за 6 місяців	ефективності водосховищ-акумуляторів, зниження стабільності виробництва в піковий період			
Інтегральний індекс небезпеки HI^6			1	0,461	

Проведений аналіз показав, що в короткостроковій перспективі гідроенергетика України матиме помірний рівень кліматичної небезпеки ($HI^6 = 0,461$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5, зокрема через:

- підвищення температури повітря (середня максимальна за літо температура може у 2021-2040 рр. зменшитись на $0,8^{\circ}\text{C}$, порівняно з 1991-2020 рр.;
- зменшення кількості днів з опадами за рік, зменшення кількості опадів за літо;
- зростання випаровуваності і посушливості;
- зменшення обсягів річкового стоку за літо.

Оцінка індексу експозиції. Під впливом зміни клімату в короткостроковій перспективі ймовірно будуть такі характеристики гідроенергетики як стабільність виробничої потужності, економічна ефективність, міжсекторальні взаємини (табл.5.15).

Таблиця 5.15 – Оцінка експозиції для гідроенергетики у короткостроковій перспективі

№	Фактор експозиції E^2i	Вплив	Нормалізоване значення E^2i^*	Ваговий коефіцієнт w_{ei}^2	Внесок у індекс $E^2i \times w_{si}^2$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми (частка в виробництві $\sim 5\%$)	0,05	0,2	0,01
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення	0,70	0,4	0,28

		технічної модернізації			
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за водні ресурси з іншими секторами	0,70	0,4	0,28
Інтегральний індекс експозиції EI^p				1,00	0,57

У короткостроковій перспективі гідроенергетика України матиме помірний рівень експозиції ($EI^p = 0,57$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5, оскільки очікується зростання частки гідроелектроенергії у загальному виробництві електроенергії до 5%, розвиток інноваційних технологій ефективного перетворення енергії потоку води, потенційне зростання конкуренції за водні ресурси.

Оцінка індексу чутливості. Фактори чутливості гідроенергетики до зміни клімату включають рівень води у водосховищах, динаміку сезонних змін і загальний обсяг поверхневого стоку, гідроенергетичний потенціал водозбірного басейну, середній вік ГЕС, витрати на обслуговування в умовах зміни клімату (табл.5.16).

Таблиця 5.16 – Оцінка чутливості гідроенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^e_i	Вплив	Нормалізоване значення S^e_i *	Ваговий коефіцієнт w^e_{si} *	Внесок у індекс $S^e_i \times w^e_{si}$
1	Об'єм річкового стоку	Визначає доступний водний ресурс для виробництва електроенергії; зменшення стоку знижує генерацію ГЕС	0,9	0,30	0,27
2	Рівень води у водоймі	Впливає на напір води та ефективність роботи турбін; низький рівень може обмежувати роботу станції.	0,7	0,20	0,14
3	Ємність водосховищ	Визначає можливість акумулювання води та регулювання генерації; зменшення корисного об'єму підвищує ризик дефіциту води	0,4	0,20	0,08

4	Динаміка сезонних змін поверхневого стоку	Впливає на стабільність та прогнозованість виробництва електроенергії протягом року	0,6	0,15	0,09
5	Замулення русла/дна водойм	Зменшує корисний об'єм водосховищ, погіршує пропускну здатність та ефективність роботи гідротехнічних споруд	0,3	0,15	0,05
Інтегральний індекс чутливості SI^e				1,00	0,63

*- за експертною оцінкою авторів

У короткостроковій перспективі гідроенергетика України матиме високий рівень чутливості ($SI^e = 0,63$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5. що свідчить про потенційно сильний вплив змін клімату, обумовлений значною залежністю від водного стоку та зношеністю обладнання. Це вимагає врахування кліматичних трендів у стратегічному плануванні, інвестицій у модернізацію, посилення здатності до управління стоком (наприклад, за рахунок розумних систем прогнозування).

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Адаптаційна спроможність гідроенергетики до зміни клімату – це здатність гідроенергетичних систем (гідроелектростанцій, водосховищ, відповідної інфраструктури) пристосовуватися до несприятливих наслідків зміни клімату, мінімізувати ризики та збитки, спричинені цими змінами, а також використовувати потенційні можливості. Ця здатність залежить від наявності стратегічного планування адаптації, інституційної спроможності, фінансових ресурсів на модернізацію, гнучкості в експлуатації водосховищ, наявності системи моніторингу гідрометеорологічних і кліматичних чинників (табл.5.17).

Таблиця 5.17 – Оцінка адаптаційної спроможності гідроенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^e_i	Вплив	Нормалізоване значення $AC^e_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^2_{aci} *$	Внесок у індекс $AC^e_i \times w^2_{si}$
---	--	-------	-----------------------------------	----------------------------------	--

1	Переключання на інші джерела вироблення енергії у разі нестачі основного ресурсу	Знижує залежність енергосистеми від водності річок та забезпечує безперервність енергопостачання	0,7	0,25	0,18
2	Модернізація гідротурбін та генераторів, підвищення автоматизації	Підвищує ефективність роботи ГЕС, дозволяє виробляти більше електроенергії навіть за нижчих витрат води та покращує оперативне управління.	0,4	0,20	0,08
3	Система очищення русла/дна водойм	Зменшує замулення, підтримує корисний об'єм водосховищ і стабільну роботу гідротехнічних споруд.	0,6	0,15	0,09
4	Коригування графіку подачі води для збільшення генерації	Дозволяє ефективніше використовувати водні ресурси в періоди пікового попиту та дефіциту води.	0,6	0,20	0,12
5	Система зберігання запасів води для створення її надлишку	Підвищує стійкість до посух і сезонної нерівномірності стоку, забезпечує резерв води для стабільної генерації електроенергії.	0,3	0,20	0,06
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACF				1,00	0,53

*- за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз показав що у короткостроковій перспективі гідроенергетика України має помірну здатність до адаптації ($ACF^p = 0,53$) за сценарієм РТК8.5, оскільки підвищується гнучкість водного режиму, розвиваються програми адаптації та навчання персоналу, залучаються інвестиції для модернізації, присутня підготовка кваліфікованих кадрів, однак обмежена державна політика щодо кліматичної адаптації.

Оцінка індексу вразливості. Висока чутливість гідроенергетики України до зміни клімату у поєднанні з помірною адаптаційною спроможністю зумовлює формування помірного рівня її вразливості у короткостроковій перспективі. Розраховане значення інтегрального індексу вразливості становить $V^r = 0,5519$, що свідчить про суттєву залежність функціонування гідроенергетичних об'єктів від змін водного режиму, коливань річкового стоку, тривалості посушливих періодів, підвищення температури повітря та

зростання повторюваності небезпечних гідрометеорологічних явищ. Водночас наявність окремих адаптаційних заходів, зокрема регулювання режимів роботи водосховищ, модернізації обладнання та вдосконалення систем моніторингу, частково знижує негативний вплив кліматичних чинників..

Отримане значення інтегрального індексу кліматичного ризику $R^r=0,53$ свідчить про помірний рівень кліматичного ризику для гідроенергетики України у короткостроковій перспективі за сценарію RCP8.5. Незважаючи на відносно невисоке значення інтегрального ризику, результати оцінювання вказують на наявність потенційних загроз для стабільності функціонування галузі, пов'язаних зі зміною сезонного розподілу стоку, збільшенням частоти посух, маловоддя та екстремальних паводків. У майбутньому це може призводити до зниження ефективності виробництва електроенергії, ускладнення управління водними ресурсами та підвищення навантаження на енергосистему.

5.4.2 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для гідроенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.

Оцінку кліматичних ризиків для гідроенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності гідроенергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову перспективу.

Оцінка індексу небезпеки. Проведений аналіз індикаторів кліматичної небезпеки гідроенергетики у середньостроковій перспективі показав що вона має помірний рівень небезпеки ($HI^r = 0,52$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5. Цьому сприяє підвищення температури повітря (середня максимальна за літо температура може у 2021-2040 рр зменшитись на $1,7^{\circ}\text{C}$, порівняно з 1991-2020, зменшення кількості днів з опадами за рік, зростання випаровуваності і

посушливості, зменшення мінімальної величини річкового стоку літом майже на 25%.

Результати аналізу представлено у табл. 5.18.

Таблиця 5.18 - Оцінка індикаторів кліматичної небезпеки для гідроенергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^i	Вплив	Нормалізоване значення H^i *	Ваговий коефіцієнт w_{hi}^*	Внесок у індекс $H^i \times w_{hi}^*$
1	Середньодобовий річковий стік за літо, мм/день	Зміни у сезонності, обсягах води, тривалості паводків	0,37	0,4	0,148
2	Середня максимальна за літо температура повітря, °С	Зростання температур → зниження снігового покриву	0,69	0,2	0,138
5	Кількість опадів за літо, мм	Рівень води у водосховищі та стік річки, обсяг виробництва електроенергії, акумуляція води для наступних сезонів	0,5	0,1	0,05
3	Кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, дні	Рівень води у водосховищі та стік річки, баланс в енергосистемі	0,61	0,2	0,122
4	Стандартизований індекс опадів - евапотранспірації (SPEI-6) за 6 місяців	Зменшення об'єму доступної води для генерації, зниження ефективності водосховищ-акумуляторів, зниження стабільності виробництва в піковий період	0,63	0,1	0,063
Інтегральний індекс небезпеки HI^6				1	0,521

Рівень кліматичної небезпеки для гідроенергетики України у середньостроковій перспективі оцінено як помірний, оскільки прогнозовані зміни клімату вже створюватимуть відчутний вплив на умови функціонування галузі, проте більшість очікуваних змін не матимуть критичного або

катастрофічного характеру для роботи гідроенергетичних об'єктів у масштабах усієї країни. Значення інтегрального індексу кліматичної небезпеки ($HI^r = 0,52$) свідчить про наявність суттєвих кліматичних викликів, однак вони залишатимуться частково керованими завдяки природним та технічним особливостям функціонування гідроенергетики.

Помірний рівень небезпеки зумовлений тим, що хоча підвищення температури повітря, зростання випаровуваності, посушливості та зменшення літнього стоку негативно впливатимуть на водність річок, ці зміни відбуватимуться поступово та матимуть виражену регіональну й сезонну неоднорідність. У різних басейнах річок зміни водного режиму проявлятимуться по-різному: в одних регіонах можливе істотніше зниження стоку, тоді як в інших вплив буде менш вираженим або частково компенсуватиметься сезонним перерозподілом опадів.

Важливим чинником, який стримує перехід небезпеки до високого рівня, є наявність каскадів водосховищ на великих річках України, насамперед на Дніпрі та Дністрі. Водосховища забезпечують можливість багаторічного та сезонного регулювання стоку, накопичення водних ресурсів і часткового згладжування впливу короткочасних періодів маловоддя чи нерівномірного випадіння опадів. Це дозволяє підтримувати відносно стабільний режим роботи гідроелектростанцій навіть за несприятливих погодних умов.

Крім того, гідроенергетика є менш залежною від окремих екстремальних погодних явищ, ніж деякі інші види енергетики. Наприклад, на відміну від теплової енергетики, вона не потребує значних обсягів води для охолодження, а на відміну від сонячної чи вітрової енергетики — менш чутлива до короткочасних коливань погодних умов. Основні ризики для гідроенергетики формуються переважно через довгострокові зміни водності річок.

Водночас рівень небезпеки не можна вважати низьким, оскільки очікуване зменшення літнього стоку, підвищення температури води, збільшення тривалості посушливих періодів та можливе зростання частоти гідрологічних екстремумів можуть призводити до:

- зменшення виробництва електроенергії у маловодні роки;
- порушення оптимальних режимів експлуатації ГЕС;
- зростання конкуренції між енергетикою, водопостачанням, аграрним сектором і екосистемними потребами за водні ресурси;
- збільшення навантаження на системи управління водосховищами;
- посилення ризиків замулення, евтрофікації та деградації водних екосистем.

Таким чином, помірний рівень кліматичної небезпеки для гідроенергетики України відображає поєднання двох тенденцій: з одного боку — посилення негативного впливу потепління та змін водного режиму, а з іншого — наявність природних і технічних механізмів, які поки що дозволяють частково компенсувати ці впливи та підтримувати функціонування галузі

Оцінка індексу експозиції показала що у середньостроковій_ перспективі гідроенергетика України матиме високий рівень експозиції ($E^P = 0,73$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 Результати аналізу експозиції у табл. 5.19.

Таблиця 5.19 – Оцінка індикаторів експозиції для гідроенергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^zi	Вплив	Нормалізоване значення E^zi *	Ваговий коефіцієнт w_{ei}^2 *	Внесок у індекс $E^zi \times w_{si}^2$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми (частка в електровиробництві ~4,5 %)	0,05	0,2	0,01
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,90	0,4	0,36
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за водні ресурси з іншими секторами	0,90	0,4	0,36
Інтегральний індекс експозиції EI^P				1,00	0,73

Високий рівень експозиції зумовлюється значною просторовою поширеністю гідроенергетичної інфраструктури, залежністю каскадів ГЕС від

басейнових процесів, що охоплюють великі території, високою чутливістю річкового стоку до зміни температури та режиму опадів, зростанням ризику тривалих маловодних періодів, збільшенням частоти екстремальних гідрологічних явищ — паводків, злив, різких коливань стоку, підвищенням конкуренції за водні ресурси між енергетикою, аграрним сектором, водопостачанням та екосистемними потребами.

Водночас високий рівень експозиції не означає автоматично високий рівень кліматичного ризику чи критичну вразливість галузі. Експозиція характеризує насамперед ступінь контакту системи з кліматичними впливами. Частина негативних наслідків може пом'якшуватися завдяки наявності водосховищ, можливостям регулювання стоку, модернізації обладнання та адаптаційним заходам. Проте сама природа гідроенергетики робить її однією з найбільш кліматозалежних складових енергетичного сектору України, що і зумовлює високий рівень експозиції до зміни клімату.

У середньостроковій перспективі вразливість гідроенергетики України до зміни клімату посилиться внаслідок подальшого зростання кліматичних навантажень, насамперед змін водного режиму річок, збільшення тривалості посушливих періодів, зростання температури повітря та підвищення повторюваності екстремальних гідрометеорологічних явищ. Незважаючи на реалізацію окремих адаптаційних заходів, їхня ефективність є недостатньою для повної компенсації зростаючих кліматичних загроз.

Внаслідок зростання кліматичної небезпеки та вразливості інтегральний індекс кліматичного ризику для гідроенергетики України у середньостроковій перспективі також підвищиться і становитиме $R^r=0,60$. Отримане значення відповідає помірному рівню кліматичного ризику з тенденцією до його переходу у високий. Це свідчить про посилення потенційного негативного впливу зміни клімату на функціонування гідроенергетичного сектору України за сценарієм RCP8.5 у середньостроковій перспективі.. Очікувані зміни кліматичних умов можуть суттєво впливати на стабільність функціонування гідроенергетичних об'єктів, ефективність виробництва електроенергії та

надійність енергопостачання. Найбільш уразливими залишаються аспекти, пов'язані зі зменшенням водності річок у теплий період року, нерівномірністю сезонного стоку, ризиком маловоддя та підвищенням навантаження на водогосподарські системи.

Отже, гідроенергетика в Україні *суттєво залежить від клімату, зміна якого чинить помірний тиск на її генерацію*, від скорочення обсягів води до загроз для інфраструктури. До середини століття цей тиск посилиться. Для забезпечення надійності та сталості функціонування ГЕС необхідна гнучка адаптаційна політика, що охоплює модернізацію обладнання, водне господарство, інтеграцію альтернативних джерел енергії та екосистемний підхід до управління водними ресурсами.

5.4.3 Пріоритетні напрямки адаптації гідроенергетики до зміни клімату. Адаптація до кліматичних ризиків гідроенергетики повинна передбачати комплекс заходів, що включають:

1. Посилений моніторинг кліматичних змін та їх впливу на водні ресурси, розробка точних прогнозів водного стоку для оптимізації роботи ГЕС.

2. Оптимізація управління водними ресурсами: впровадження інтегрованого управління водними ресурсами, що дозволяє ефективно розподіляти воду між різними секторами (енергетика, сільське господарство, водопостачання) в умовах мінливого клімату. Це може включати:

- регулювання рівня води у водосховищах для запобігання повеням або забезпечення водопостачання під час посух;

- розробку гнучких графіків виробництва електроенергії.

3. Модернізація та зміцнення інфраструктури:

- будівництво або модернізація гребель та водосховищ для збільшення їхньої стійкості до екстремальних явищ та збільшення ємності для зберігання води;

- вдосконалення систем управління водним стоком;

- застосування новітніх технологій для підвищення ефективності ГЕС за умов нестабільних водних ресурсів.

4. Диверсифікація джерел електрогенерації: зменшення залежності від одного джерела енергії шляхом розвитку інших видів відновлюваної енергетики (сонячна, вітрова) для компенсації можливих перебоїв у роботі ГЕС.

5. Міжсекторальна співпраця: координація дій між енергетичним, водним, сільськогосподарським та іншими секторами для розробки комплексних стратегій адаптації.

6. Дослідження та інновації: проведення наукових досліджень для кращого розуміння та прогнозування впливу зміни клімату на гідроенергетику та розробка нових технологій і підходів до адаптації.

5.5 Вітрова енергетика

Зміна клімату впливає на вітрову енергетику через зміну вітрового режиму, зростання частоти екстремальних явищ погоди та температурних коливань. Серед основних кліматичних загроз — зміна швидкості вітру, шквали, зледеніння, спека, сильні опади, посухи, лісові пожежі та ерозія ґрунтів. Ці фактори можуть призводити до зниження ефективності генерації, підвищення зношення обладнання, аварійних зупинок та зростання витрат на технічне обслуговування (рис.5.4).

5.5.1 Оцінка кліматичного ризику для вітрової енергетики у короткостроковій перспективі. Швидкість вітру є визначальним фактором для вітроенергетики, що впливає на обсяги виробництва, вибір технологій та операційні ризики (рис.5.4). Зміна клімату призводить до коливань вітрових режимів та безпосередньо впливає на рентабельність та надійність ВЕС. Оскільки потужність вітроенергетичних установок приблизно пропорційна кубу швидкості вітру, зменшення швидкості вітру на 10% може призвести до зниження виробітку електроенергії майже на 27%. Навіть невеликі зміни швидкості вітру можуть мати значний вплив а зменшення середньої швидкості вітру призводить до значного зниження виробництва електроенергії.

Зростання швидкості вітру підвищує виробіток електроенергії, але може спричинити перевантаження турбін або автоматичне їх вимкнення при перевищенні граничної швидкості (зазвичай 25 м/с), збільшує механічне навантаження на конструкції (лопаті, вежу).

Хоча вітрова енергія насамперед залежить від швидкості вітру, температура також відіграє важливу роль у роботі турбін, щільності повітря та технічній надійності обладнання (рис.5.4). Висока температура повітря може призводити до перегріву електронних компонентів (інвертори, трансформатори), зниження ефективності систем охолодження турбіни, зменшення терміну служби матеріалів (наприклад, мастил, ізоляції), автоматичних відключень при перевищенні допустимого температурного порогу. Низька температура повітря (нижче -20°C) може викликати обмерзання лопатей, що приведе до зниження або повної втрати генерації, пошкодити гідравлічні системи та електроніку, зумовити зупинку турбіни через технічні обмеження⁹⁰⁹¹.

Сильні опади (зливи, тривалі дощі, мокрий сніг) впливають на вітроенергетику переважно опосередковано — через інфраструктурні, технічні та логістичні чинники⁹² (рис.5.4). Інтенсивні опади можуть спричиняти ерозію та розмивання ґрунтів навколо фундаментів вітротурбін, що знижує їхню довгострокову стійкість і потребує додаткового укріплення конструкцій. У холодний період року мокрий сніг і переохолоджений дощ можуть призводити до обмерзання лопатей, дисбалансу ротора, зниження ефективності генерації та аварійної зупинки турбін

⁹⁰ [GE Vernova](#). (n.d.). *Wind turbines for cold climate operations*. Retrieved May 15, 2026, from GE Vernova Cold Climate Packages

⁹¹ [DNV](#). (n.d.). *Cold climate operation of wind turbines*. Retrieved May 15, 2026, from DNV Cold Climate Operation of Wind Turbines

⁹² [National Renewable Energy Laboratory](#). (n.d.). *Wind turbine icing research*. Retrieved May 15, 2026, from NREL Wind Turbine Icing Research

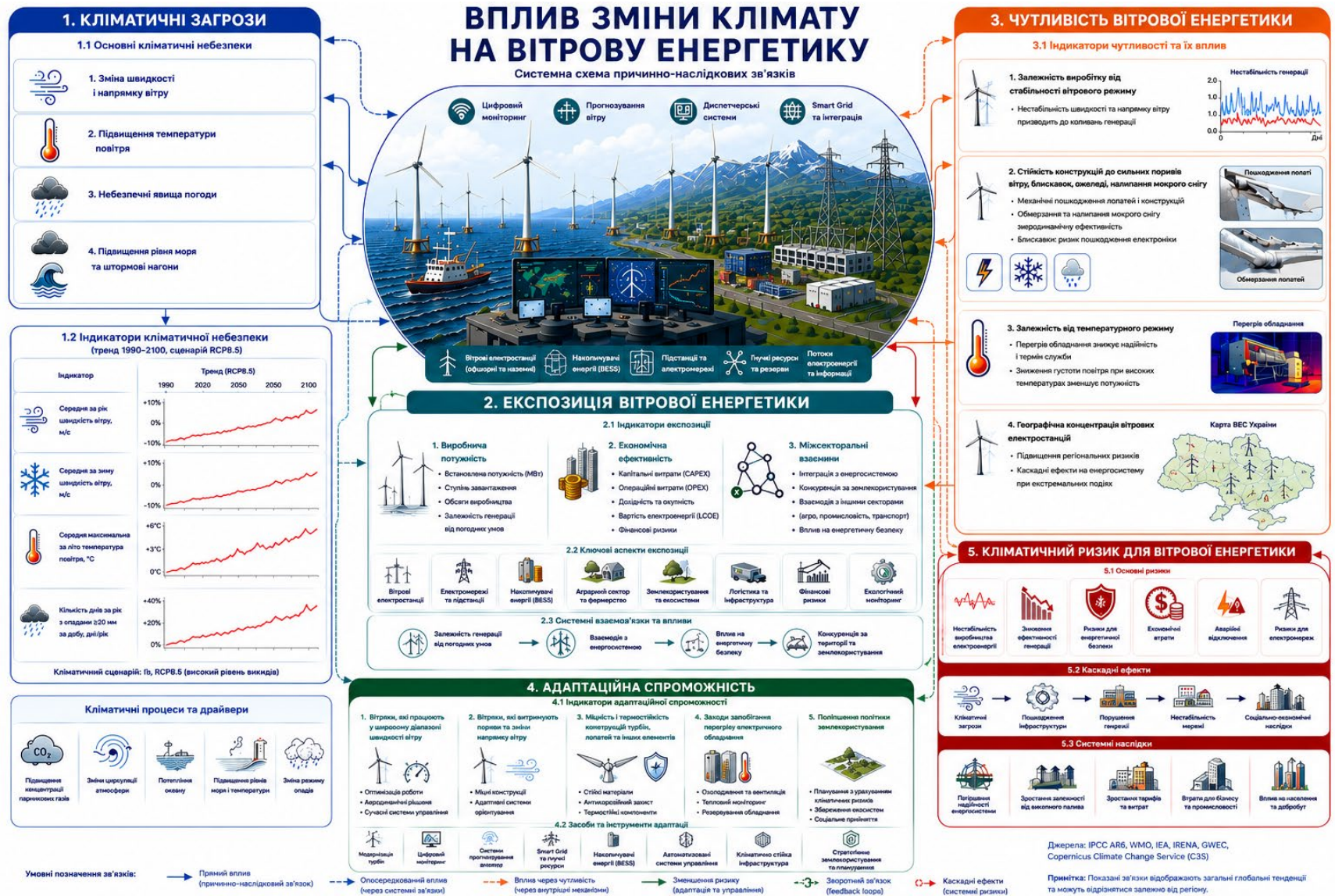


Рис. 5.4 - Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату на вітроенергетику

Кліматичні загрози можуть знизити фактичну генерацію ВЕС на 5–30% у певні роки, викликати простоювання техніки, зменшити тривалість роботи на повній потужності, а також прискорити деградацію обладнання. Це знижує енергетичну надійність, економічну дохідність та довгострокову окупність проектів.

Оцінка індексу небезпеки. Кліматичними загрозами для вітрової енергетики є зміна швидкості вітру, підвищення температури, збільшення кількості екстремальних опадів, зростання повторюваності та інтенсивності ожеледі і налипання мокрого снігу. За сучасного рівня розвитку кліматичного моделювання отримання достовірних довгострокових проєкцій ожеледі та налипання мокрого снігу залишається складним завданням, тому при оцінці кліматичних ризиків для вітрової енергетики у коротко і середньостроковій перспективі їх не враховували.

Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для вітрової енергетики у короткостроковій перспективі представлено у табл 5.20.

Таблиця 5.20 – Оцінка кліматичної небезпеки для вітрової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^g_i	Вплив	Нормалізоване значення H^g_i *	Ваговий коефіцієнт w^g_{hi} *	Внесок у індекс $H^g_i \times w^g_{hi}$
1	Середня за рік швидкість вітру, м/с	На продуктивність ВЕС, стабільність вироблення енергії та можливість прогнозування продуктивності.	0,55	0,4	0,22
2	Середня за зиму швидкість вітру, м/с	На продуктивність та стабільність вироблення енергії	0,55	0,4	0,22
3	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Негативно впливає на механічну стабільність та електронне обладнання	0,50	0,1	0,05
4	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Зменшення продуктивності ВЕС, фізичне пошкодження інфраструктури.	0,12	0,1	0,01
Інтегральний індекс небезпеки HI^g				1,00	0,50

У короткостроковій перспективі вітрова енергетика України *матиме помірний рівень небезпеки* ($HI^e = 0,50$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5. Такий рівень небезпеки зумовлений очікуваними змінами вітрового режиму, підвищенням температури повітря та збільшенням повторюваності окремих небезпечних гідрометеорологічних явищ, які можуть впливати на ефективність, стабільність і безпечність роботи вітрових електростанцій.

Одним із ключових чинників є зміна характеристик вітрової активності — середньої швидкості вітру, повторюваності сильних поривів, сезонного розподілу вітрових потоків та їхньої просторової неоднорідності. Оскільки виробництво електроенергії на ВЕС безпосередньо залежить від швидкості вітру, навіть незначні зміни його режиму можуть впливати на обсяги генерації та стабільність енергопостачання. Зростання мінливості вітрових умов може ускладнювати прогнозування виробітку електроенергії та балансування енергосистеми.

Додатковим чинником небезпеки є підвищення температури повітря, яке може сприяти перегріву електротехнічного обладнання, трансформаторів, систем перетворення та накопичення енергії, особливо під час тривалих хвиль спеки. Високі температури також здатні прискорювати зношення окремих компонентів вітроенергетичних установок і знижувати ефективність їхньої роботи.

Важливий вплив матиме й прогнозоване збільшення кількості днів із сильними опадами та іншими небезпечними явищами погоди. Інтенсивні дощі, грози, шквали, ожеледь або налипання мокрого снігу можуть спричиняти пошкодження лопатей, опор, ліній електропередач і систем керування ВЕС, а також ускладнювати технічне обслуговування об'єктів. Для окремих регіонів можливе також зростання ризику ерозії ґрунтів і підтоплення інфраструктури вітрових електростанцій.

Разом із тим рівень кліматичної небезпеки оцінено як помірний, а не високий, оскільки у короткостроковій перспективі прогнозовані зміни кліматичних умов ще не призводитимуть до критичного погіршення умов

функціонування галузі в масштабах усієї країни. Сучасні вітрові турбіни здатні працювати у широкому діапазоні швидкостей вітру та частково адаптовані до дії несприятливих погодних умов. Крім того, просторове розосередження вітрових електростанцій та можливість технологічної модернізації певною мірою знижують потенційний негативний вплив кліматичних змін на галузь.

Оцінка індексу експозиції. Під дією кліматичних загроз може перебувати виробнича потужність і економічна ефективність вітроенергетики, міжсекторальні взаємини. Кліматичні загрози суттєво впливають на виробничі потужності вітроенергетики, оскільки змінюють фізичні умови роботи турбін, технічну надійність обладнання та доступність інфраструктури. Ці загрози можуть як зменшити фактичне виробництво електроенергії, так і вплинути на встановлену потужність, що реально доступна для генерації. Кліматичні загрози безпосередньо впливають і на економічну ефективність вітроенергетики, оскільки вони змінюють технічні умови виробництва, підвищують витрати на експлуатацію та обслуговування, знижують прибутки й посилюють інвестиційні ризики. Кліматичні загрози мають не лише технічний і економічний вплив на вітроенергетику, а й здатні порушувати міжсекторальні відносини, оскільки ВЕС є частиною ширших соціально-економічних, екологічних та інфраструктурних систем. Впливи проявляються як у зростанні конкуренції за ресурси, так і в загрозах для стабільності енергетичної системи, сільського господарства, землекористування, транспорту та охорони довкілля. Результати оцінки індикаторів експозиції для вітрової енергетики у короткостроковій перспективі представлено у табл. 5.21.

Таблиця 5.21 – Оцінка експозиції для вітрової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції $E^e i$	Вплив	Нормалізоване значення $E^e i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^e_{ei}^*$	Внесок у індекс $E^e i \times w^e_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості	0,60	0,4	0,24

		енергосистеми (частка в електровиробни цтві ~ 5,4 %)			
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,50	0,3	0,15
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за земельні ресурси з іншими секторами	0,50	0,3	0,15
Інтегральний індекс експозиції EI^e				1,00	0,54

Висновок: у короткостроковій перспективі вітрова енергетика України *матиме помірний рівень експозиції ($EI^e = 0,54$)* до зміни клімату за сценарієм РТК8.5. що зумовлено розміщенням значної частини вітрових електростанцій у регіонах, чутливих до змін вітрового режиму, підвищення температури повітря та зростання повторюваності небезпечних явищ погоди. Водночас рівень експозиції оцінюється як помірний, оскільки кліматичні зміни у короткостроковій перспективі ще не матимуть критичного характеру, а сучасні технології ВЕС частково адаптовані до широкого діапазону погодних умов.

Оцінка індексу чутливості енергетики до зміни клімату.

Вітроенергетика, будучи одним із ключових інструментів декарбонізації та боротьби зі зміною клімату, сама є дуже чутливою до кліматичних змін. Ця чутливість проявляється через прямий вплив на основний ресурс (вітер) і продуктивність генерування енергії та зростання ризиків від екстремальних погодних явищ що впливають на цілісність обладнання (табл.5.22).

Таблиця 5.22 – Оцінка чутливості вітрової енергетики до зміни клімату у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^e_i	Вплив	Нормалізоване значення $S^e_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^e_{si} *$	Внесок у індекс $S^e_i \times w^e_{si}$
1	Залежність виробітку від стабільності вітрового режиму	Сезонність, зниження середньорічної швидкості	0,75	0,35	0,26

2	Стійкість конструкцій до сильних поривів вітру, блискавок, ожеледі, налипання мокрого снігу	Пошкодження конструкцій при непередбачуваних явищах погоди	0,6	0,25	0,15
3	Залежність від температурного режиму	Зниження ефективності або пошкодження	0,4	0,2	0,08
4	Географічна концентрація вітрових електростанцій	Чим більша концентрація — тим вища чутливість	0,7	0,2	0,14
Інтегральний індекс чутливості SI^6				1,00	0,63

*- за експертною оцінкою автора

Проведений аналіз чутливості вітрової енергетики України до зміни клімату показав що у короткостроковій перспективі вона *матиме високий рівень чутливості* ($SI^6 = 0,63$) до зміни клімату за сценарію RTK8.5, оскільки ефективність і надійність роботи вітрових електростанцій безпосередньо залежать від характеристик атмосферних процесів та погодних умов. Зміни швидкості й напрямку вітру, зростання повторюваності шквалів, гроз, сильних опадів, ожеледі та хвиль спеки можуть негативно впливати на режими роботи турбін, прискорювати зношення обладнання та підвищувати ризик аварійних ситуацій.

Високий рівень чутливості також зумовлений значною залежністю генерації електроенергії від стабільності вітрового режиму: навіть незначні зміни швидкості вітру можуть суттєво впливати на обсяги виробництва електроенергії. Крім того, частина вітрових електростанцій України розташована у прибережних та степових районах, де очікується посилення кліматичних екстремумів, що додатково підвищуватиме вразливість інфраструктури та ускладнюватиме експлуатацію енергетичних об'єктів.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Адаптаційна спроможність вітроенергетики до зміни клімату є критично важливою для забезпечення її сталого розвитку та ефективності в умовах мінливого довкілля. Це комплексний процес, що охоплює технологічні, інженерні, операційні та стратегічні заходи що впливають на ефективність роботи галузі. До них

належать державна політика та регулювання у сфері адаптації, інвестиції у дослідження та інновації, технічна модернізація обладнання, гнучкість управління та реагування на погодні умови, освітній і кадровий потенціал (табл.5.23).

Таблиця 5.23 – Оцінка адаптаційної спроможності вітрової енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC_i^e	Вплив	Нормалізоване значення $AC_i^e *$	Ваговий коефіцієнт $w_{aci}^e *$	Внесок у індекс $AC_i^e \times w_{si}^e$
1	Вітряки, які працюють в широкому діапазоні швидкості вітру	Підвищення коефіцієнту використання встановленої потужності, збільшення ефективності роботи ВЕС, стабільне виробництво електроенергії, зниження втрат генерації.	0.45	0.25	0,11
2	Вітряки, які витримують пориви та зміни напрямку вітру	Стійкість до фізичного пошкодження, підвищення стійкості електростанцій до екстремальних погодних явищ і зменшення ризику пошкодження обладнання.	0.4	0.2	0.08
3	Міцність і термостійкість конструкцій турбін, лопатей та інших елементів	Стійкість до фізичного пошкодження, зниження ризику аварій, деформацій і передчасного зношення обладнання під впливом спеки, морозу чи сильного вітру.	0.5	0.2	0.10
4	Заходи запобігання перегріву електричного обладнання	Підтримка стабільної роботи системи у періоди високих	0.55	0.2	0.11

		температур та зменшення ризику відмов і аварій.			
5	Поліпшення політики земле-користування	Зменшення ризику ерозії, підтоплення та конфліктів щодо використання територій, сприяє безпечному розміщенню й експлуатації ВЕС	0.6	0.15	0.09
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACI^B				1,00	0.49

Результати аналізу індикаторів адаптаційної спроможності вітрової енергетики України показали, що у короткостроковій перспективі за сценарієм RCP8.5 галузь матиме помірний рівень адаптаційної спроможності ($ACI^B = 0,49$). Це свідчить про наявність певного потенціалу для пристосування до змін клімату, однак існуючих можливостей поки недостатньо для повноцінного зниження кліматичних ризиків та забезпечення високої стійкості галузі до несприятливих кліматичних впливів.

Основними стримувальними чинниками є недостатній рівень державного фінансування наукових досліджень і розробок у сфері адаптації енергетики до зміни клімату, що обмежує впровадження сучасних технологій прогнозування, моніторингу та підвищення кліматичної стійкості ВЕС. Додатковою проблемою залишається фрагментарне впровадження адаптаційних стратегій і недостатня інтеграція кліматичних ризиків у процеси енергетичного планування та управління галуззю.

Помірний рівень адаптаційної спроможності також зумовлений обмеженими темпами оновлення обладнання та модернізації інфраструктури. Значна частина вітроенергетичних об'єктів потребує впровадження технологій, стійкіших до екстремальних погодних умов, зокрема сильних поривів вітру, ожеледі, перегріву обладнання та інтенсивних опадів. Крім того, воєнні дії, пошкодження енергетичної інфраструктури та економічні

обмеження ускладнюють реалізацію довгострокових адаптаційних заходів і знижують інвестиційні можливості галузі.

Оцінка індексу вразливості. Співвідношення чутливості S^e вітрової енергетики до її адаптаційної спроможності ACI^e дозволяє оцінити вразливість ВЕС до зміни клімату. Отриманий індекс вразливості $V^B = 0.57$ свідчить що у короткостроковій перспективі вітрова енергетика в Україні матиме *помірний рівень* вразливості. Такий рівень вразливості зумовлений, з однієї сторони, залежністю ефективності роботи вітрових електростанцій від зміни швидкості та повторюваності вітрових потоків, підвищення температури повітря, зростання частоти небезпечних погодних явищ,. З іншої сторони, сучасні технологічні рішення, удосконалення конструкцій турбін, автоматизовані системи управління та можливість адаптації режимів експлуатації частково компенсують негативний вплив кліматичних чинників.

Інтегральний індекс кліматичного ризику для вітрової енергетики України у короткостроковій перспективі за сценарієм RCP8.5 ймовірно становитиме $R^B=0,54$, що відповідає помірному рівню кліматичного ризику для галузі. Отримане значення свідчить, що зміна клімату вже у короткостроковій перспективі може чинити помітний вплив на функціонування вітрової енергетики України. Основними чинниками ризику є зміна режиму вітру, зростання повторюваності екстремальних погодних явищ, та температурних навантажень на обладнання. Такі зміни можуть впливати на стабільність генерації електроенергії, технічний стан вітрових турбін та ефективність роботи енергетичної інфраструктури.

Водночас помірний рівень ризику свідчить про наявність певного адаптаційного потенціалу галузі, зокрема завдяки використанню сучасних технологій, автоматизованих систем керування, можливості модернізації обладнання та підвищення стійкості конструкцій вітрових електростанцій до екстремальних погодних умов. Це підтверджує необхідність подальшого впровадження адаптаційних заходів та врахування кліматичних ризиків під час планування розвитку вітрової енергетики України..

5.5.2 Оцінка кліматичного ризику для вітрової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для вітрової енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності вітрової енергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову перспективу.

Проведена оцінка кліматичної небезпеки для вітрової енергетики України показала що до середини століття вона матиме помірний рівень небезпеки ($HI^c = 0,46$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 (табл.5.24).

Таблиця 5.24 - Оцінка кліматичної небезпеки для вітрової енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки HI^i	Вплив	Нормалізоване значення HI^i *	Ваговий коефіцієнт w_{hi}^e *	Внесок у індекс $HI^i \times w_{hi}^e$
1	Середня за рік швидкість вітру, м/с	Зростання швидкості вітру збільшує продуктивність ВЕС	0,67	0,4	0,18
2	Середня за зиму швидкість вітру, м/с	Взимку продуктивність СЕС зменшується, ВЕС її компенсує	0,50	0,4	0,20
3	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Негативно впливає на механічну стабільність та електронне обладнання	0,69	0,1	0,07
4	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Зменшення продуктивності ВЕС	0,09	0,1	0,01
Інтегральний індекс небезпеки HI^e				1,00	0,46

Помірний рівень кліматичної небезпеки для вітроенергетики у середньостроковій перспективі зумовлений тим що прогнозовані кліматичні

зміни посилюватимуть навантаження на вітроенергетичну інфраструктуру, проте їхній вплив у більшості регіонів ще не набуде критичного характеру.

Одним із основних чинників формування небезпеки є ймовірне зростання частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, зокрема сильних опадів, гроз, шквалів і хвиль спеки. Такі явища можуть спричиняти пошкодження фундаментів, опор, лопатей та електротехнічного обладнання ВЕС, підвищувати ризик аварійних відключень і ускладнювати технічне обслуговування об'єктів. Інтенсивні опади та підтоплення також можуть негативно впливати на транспортну й енергетичну інфраструктуру, що забезпечує функціонування вітрових електростанцій.

Додатковим чинником небезпеки є подальше підвищення температури повітря, яке здатне знижувати механічну стабільність конструкцій, прискорювати старіння матеріалів та посилювати термічне навантаження на окремі елементи турбін і систем перетворення енергії. В умовах тривалих хвиль спеки можливе також збільшення ризику перегріву електрообладнання та зниження його експлуатаційної надійності.

Разом із тим рівень кліматичної небезпеки оцінено як помірний, оскільки сучасні технології вітроенергетики мають певний запас стійкості до несприятливих погодних умов, а очікувані зміни клімату у середньостроковій перспективі ще не призводитимуть до системного порушення функціонування галузі на території України

Оцінка індексу експозиції вітрової енергетики до зміни клімату в середньостроковій перспективі показала що вона матиме *помірний рівень експозиції* ($EI^e = 0,46$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 (табл.5.25).

Таблиця 5.25 – Оцінка експозиції для вітрової енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^e_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^e_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^e_{ei}^*$	Внесок у індекс $E^e_i \times w^e_{si}$
---	------------------------------	-------	----------------------------------	---------------------------------	---

1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми (частка в електровиробництві ~ 16 %)	0,16	0,4	0,06
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,70	0,3	0,21
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за земельні ресурси з іншими секторами	0,60	0,3	0,18
Інтегральний індекс експозиції EF^e				1,00	0,45

Помірний рівень експозиції вітроенергетики до зміни клімату у середньостроковій перспективі зумовлений очікуваним зростанням частки вітрової енергетики у структурі виробництва електроенергії, що підвищуватиме залежність енергосистеми від кліматичних умов і вітрового режиму. Водночас розвиток інноваційних технологій, здатних ефективно працювати у широкому діапазоні швидкостей вітру, частково знижуватиме негативний вплив кліматичних змін. Додатковим чинником експозиції може стати посилення конкуренції за земельні ресурси, особливо у регіонах із високим вітроенергетичним потенціалом.

Індекс вразливості для вітрової енергетики V^B у середньостроковій перспективі становить 0.57 що свідчить про *помірний рівень* вразливості. Такий рівень вразливості зумовлений поєднанням відносно високої чутливості вітрових електростанцій до змін режиму вітру та небезпечних погодних явищ із наявністю певного адаптаційного потенціалу галузі. Основними чинниками впливу залишаються зміна швидкості й просторово-часового розподілу вітрових потоків, підвищення повторюваності штормових поривів вітру, ожеледі, та температурних навантажень на обладнання. Водночас використання сучасних вітрових турбін, систем автоматизованого керування та можливість технологічної модернізації частково знижують негативний вплив кліматичних чинників

.Величина кліматичного ризику $R^B = 0,54$ що вказує на *є помірний рівень впливу* ризиків зміни клімату на вітрову енергетику України до середини століття. Отримане значення свідчить про незначне послаблення впливу зміни клімату на функціонування вітрової енергетики у порівнянні з короткостроковою перспективою. Проте кліматичні загрози за помірного рівня кліматичного ризику можуть призводити до експлуатаційних ризиків, значного навантаження на енергетичну інфраструктуру та нестабільність виробництва електроенергії в окремі періоди року. Це обумовлює необхідність подальшого розвитку адаптаційних заходів, удосконалення систем прогнозування вітрових ресурсів і врахування кліматичних ризиків у стратегічному плануванні розвитку вітрової енергетики України.

5.5.3 Пріоритетні напрямки адаптації вітрової енергетики до зміни клімату . До пріоритетних напрямків адаптації вітрової енергетики до зміни клімату належить:

1. Удосконалення моделювання та прогнозування вітрових ресурсів:

- довгострокового кліматичного моделювання для прогнозування глобальних і регіональних змін вітрового режиму, що дозволяє краще обирати місця для нових ВЕС, враховуючи майбутній вітровий потенціал;

- короткострокове прогнозування небезпечних явищ погоди, таких як ожеледь, налипання мокрого снігу, шквали, різкі зміни температури, сильні опади з що дає операторам час для вжиття заходів на захист або тимчасового відключення турбін;

- постійний аналіз даних про вітер та погодні умови, а також розробка різних кліматичних сценаріїв для оцінки ризиків та можливостей.

2. Технологічні інновації та посилення конструкцій:

- розроблення та використання нових композитних матеріалів для лопастей турбін, які є більш стійкими до екстремальних температур, ударів (наприклад, від граду), зледеніння та корозії (для морських ВЕС);

- розробка лопастей, що можуть змінювати форму або кут атаки (morphing blades) для оптимізації захоплення вітру при різних швидкостях і напрямках, а також для зниження навантажень під час штормів;

- проектування веж та фундаментів, здатних витримувати зростаючі вітрові навантаження та екстремальні погодні умови, зокрема підвищення рівня моря для офшорних ВЕС;

- встановлення та вдосконалення активних (нагрівальні елементи) та пасивних (гідрофобні покриття) систем протиобледеніння лопатей для підтримки ефективності в холодну пору року та запобігання пошкодженню від падіння льоду;

- впровадження передових систем захисту від блискавок для мінімізації пошкоджень електронних компонентів та лопатей;

- впровадження штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації роботи турбін в реальному часі, реагуючи на зміни швидкості та напрямку вітру, а також для прогнозування та діагностики несправностей.

3. Операційна гнучкість та управління ризиками:

- розроблення чітких протоколів для тимчасової зупинки турбін або переведення їх у безпечний режим (флюгерування) при наближенні екстремальних погодних умов;

- диверсифікація енергетичного портфеля: зменшення залежності від одного джерела енергії шляхом інтеграції ВЕС з іншими ВДЕ (сонячна, гідро), а також з традиційними джерелами;

- розвиток та впровадження ефективних систем накопичення енергії (акумулятори, гідроакумулюючі станції) для компенсації коливань у виробництві ВЕС, спричинених мінливістю вітру;

- впровадження технологій, що дозволяють ефективно керувати потоками електроенергії, балансувати попит та пропозицію, та інтегрувати велику кількість ВДЕ;

- адаптація страхових полісів та фінансових моделей для врахування зростаючих кліматичних ризиків.

4. Політична та регуляторна підтримка:

- розроблення національних та регіональних стратегій розвитку вітроенергетики, що враховують сценарії зміни клімату та необхідність адаптації;

- державна підтримка наукових досліджень та розробок нових технологій, що підвищують стійкість ВЕС до кліматичних викликів;

- обмін досвідом та найкращими практиками у сфері адаптації вітроенергетики до зміни клімату на міжнародному рівні.

Адаптаційна спроможність вітроенергетики є динамічним процесом. Вона вимагає постійних інвестицій у дослідження, технології та інфраструктуру, а також гнучкості в плануванні та експлуатації, щоб залишатися ефективною та надійною у світі, що змінюється під впливом клімату.

5.6 Сонячна енергетика

Сонячна енергетика, як і вітрова, є ключовим інструментом боротьби зі зміною клімату, але також має свої кліматичні загрози. Вона чутлива до широкого спектру кліматичних умов (рис.5.5). Зміна клімату може як створювати нові можливості для збільшення генерації енергії (наприклад, унаслідок зменшення хмарності в деяких регіонах), так і загрожувати стабільності та ефективності сонячних електростанцій через зростання екстремальних погодних явищ.

До головних кліматичних загроз для сонячної енергетики належать(рис.5.5):

- підвищення температури повітря, яке призводить до зниження ефективності фотоелементів внаслідок перегріву, особливо в умовах тривалих періодів спеки;

- зростання хмарності, що зменшує надходження прямої сонячної радіації й, відповідно, знижує вироблення електроенергії;
- підвищення вмісту аерозолів в атмосфері (пил, дим), що зменшує прозорість атмосфери та знижує інсоляцію;
- зміна режиму випадіння опадів, зокрема збільшення кількості сильних дощів, може призвести до ерозії ґрунтів, підтоплення конструкцій та збоїв у роботі обладнання;
- сильні снігопади та ожеледиця можуть тимчасово виводити з ладу сонячні модулі шляхом їхнього фізичного покриття або обмерзання;
- сильні вітри, пилові бурі створюють ризики механічних пошкоджень, особливо для незахищених або застарілих конструкцій;
- град та заморозки становлять додаткову загрозу для цілісності панелей;

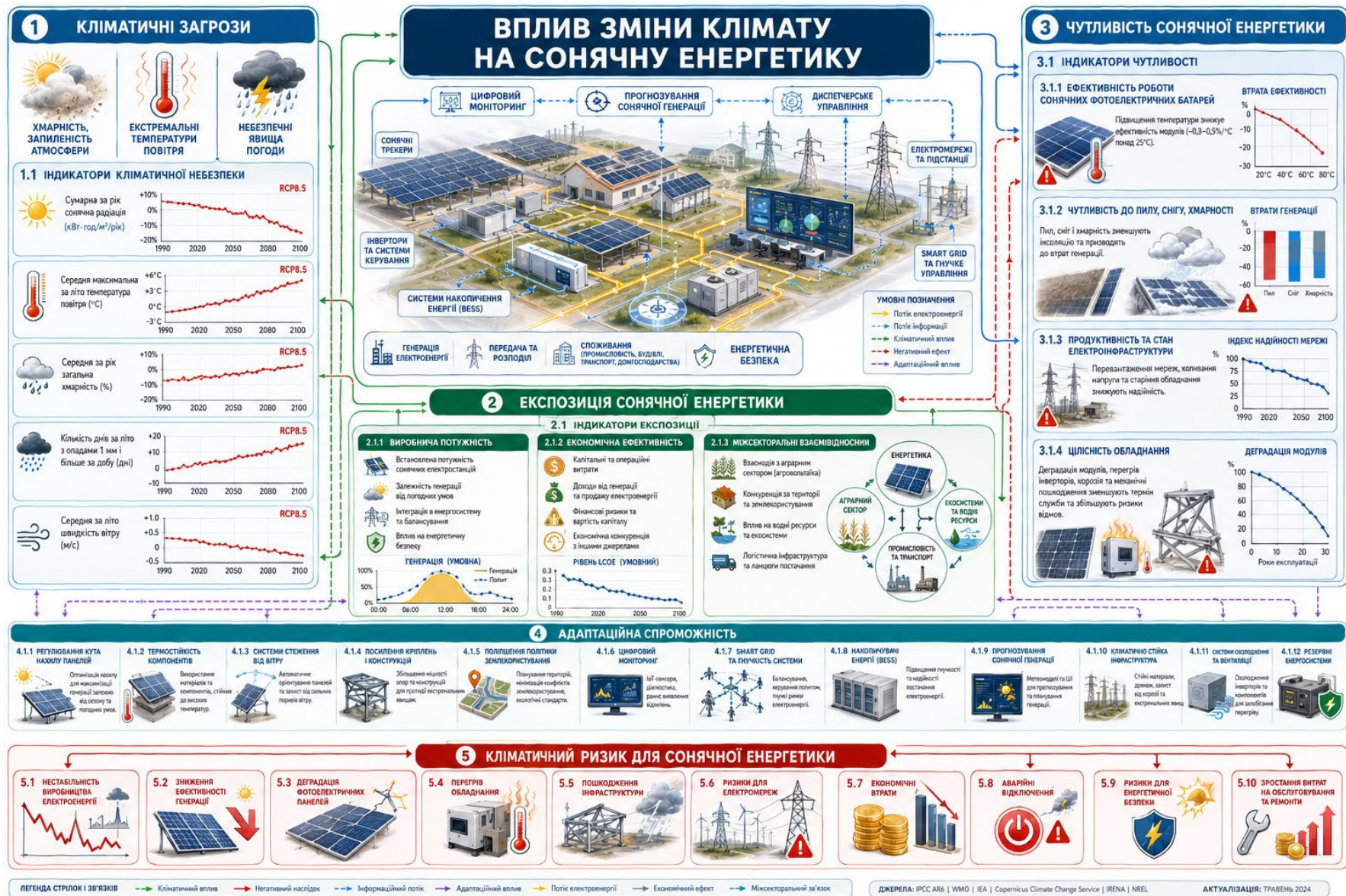


Рис. 5.5 - Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу змін клімату на сонячну енергетику

– лісові пожежі, крім прямої небезпеки пошкодження, супроводжуються виділенням диму і сажі, що знижують прозорість атмосфери та ефективність сонячної генерації.

На рисунку 5.5 представлено причинно-наслідкові ланцюги впливу зміни клімату та адаптації для сонячної енергетики.

5.6.1. Оцінка кліматичного ризику для сонячної енергетики у короткостороковій (2021 – 2040 рр.) перспективі.

Оцінка індексу небезпеки. Індикаторами, які характеризують перебування об'єктів сонячної енергетики під дією кліматичних загроз, можуть бути сумарна за рік сонячна радіація, середня максимальна за літо температура повітря, середня за рік загальна хмарність, кількість днів за літо з опадами 1 мм і більше за добу, середня за літо швидкість вітру (табл.5.26). Отримати за сучасними кліматичними моделями достовірні дані щодо зміни повторюваності природних пожеж, пилових бурь, граду неможливо, тому при оцінці індикаторів кліматичної небезпеки для сонячної енергетики у коротко та довгостроковій перспективі їх не враховували.

Вплив зміни сонячної радіації на сонячну енергетику є ключовим, оскільки саме сонячне випромінювання є основним джерелом енергії для фотоелектричних систем. Будь-які зміни у кількості, типі або характері сонячного випромінювання можуть істотно вплинути на ефективність, продуктивність та надійність сонячних електростанцій.

Температура повітря є одним з найважливіших чинників, що впливає на ефективність і виробництво електроенергії сонячними фотоелектричними панелями. Вплив цей є значним і переважно негативним при підвищенні температури.

Хмарність також один із найважливіших і найпоширеніших факторів, що впливає на продуктивність сонячних фотоелектричних систем. Її вплив є безпосереднім і, як правило, негативним для вихідної потужності. Сонячні панелі перетворюють сонячне випромінювання на електроенергію. Коли

хмари закривають сонце, вони блокують значну частину прямого сонячного світла (прямої сонячної радіації), яке є найбільш інтенсивним та ефективним для ФЕ-перетворення. У похмурий день вироблення електроенергії сонячними панелями може падати на 50-90% порівняно з ясним сонячним днем. При сильних, щільних хмарах генерація може бути близькою до нуля, особливо якщо хмарність тривала і супроводжується опадами.

Опади мають комплексний вплив на сонячну енергетику, який може бути як негативним, так і, в деяких випадках, позитивним. Дощ, сніг, град, туман, що осідають на поверхні сонячних панелей, фізично блокують доступ сонячної радіації світла до фотоелементів. Це призводить до різкого зниження або навіть повного припинення виробітку електроенергії на період опадів. З іншої сторони дощ змиває пил, бруд, які накопичуються на поверхні панелей.

Вітер відіграє подвійну роль у сонячній енергетиці. З одного боку, він є важливим чинником охолодження, що позитивно впливає на ефективність сонячних панелей. З іншого боку, сильний вітер створює значні механічні ризики для сонячних систем, що потребують міцних конструкцій та ретельного інженерного розрахунку.

Результати оцінки впливу індикаторів кліматичної небезпеки для сонячної енергетики у короткостроковій перспективі представлено у табл.5.26.

Таблиця 5.26 – Оцінка кліматичної небезпеки для сонячної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^ci	Вплив	Нормалізоване значення $H^ci *$	Ваговий коефіцієнт $w_{hi}^c *$	Внесок у індекс $H^ci \times w_{hi}^c$
1	Сумарна за рік сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	Прямопропорційно впливає на продуктивність сонячних панелей	0,56	0,6	0,34
2	Середня максимальна за літо	Перегрів панелей знижує ефективність на 0,4–0,5%/°C при	0,50	0,1	0,05

	температура повітря, °C	підвищенні температури			
3	Середня за рік загальна хмарність, (Середня площа хмарності) %	Хмарність прямо пропорційно зменшує продуктивність сонячних панелей внаслідок зменшення інтенсивності опромінення панелей	0,72	0,1	0,07
4	Кількість днів за літо з опадами 1мм і більше за добу, дні	Збільшення кількості днів з опадами сприяє змиванню дощем пилу з поверхні панелей (короткочасно), але знижує ефективність вироблення енергії за рахунок зменшення кількості сонячної радіації та підвищення хмарності).	0,51	0,1	0,05
5	Середня за літо швидкість вітру, м/с	Підвищення ефективності та продуктивності завдяки охолоджуючому ефекту вітру, ризики пошкодження інфраструктури	0,59	0,1	0,06
Інтегральний індекс небезпеки HI^c				1,00	0,57

Очікується, що в короткостроковій перспективі (2021-2040) сонячна енергетика України матиме *помірний рівень небезпеки* ($HI^c = 0,57$) до зміни клімату за реалізації сценарією РТК8.5, оскільки прогнозовані зміни клімату матимуть як позитивний, так і негативний вплив на ефективність роботи сонячних електростанцій.

З одного боку, збільшення надходження сонячної радіації у теплий період року та зменшення хмарності створюватимуть сприятливі умови для зростання продуктивності СЕС і збільшення обсягів генерації електроенергії. Більша тривалість сонячного сяйва та частіші безхмарні періоди можуть підвищувати ефективність використання фотоелектричних систем, особливо у південних та центральних регіонах України.

З іншого боку, підвищення температури повітря негативно впливатиме на роботу фотоелектричних панелей, оскільки зі зростанням температури знижується їхній коефіцієнт корисної дії та ефективність перетворення сонячної енергії в електричну. Тривалі хвилі спеки також можуть спричиняти перегрів обладнання, прискорювати старіння окремих компонентів та збільшувати навантаження на системи охолодження й електроінфраструктуру.

Таким чином, поєднання позитивних ефектів від збільшення сонячної радіації та негативних наслідків підвищення температури формує помірний рівень кліматичної небезпеки для сонячної енергетики України у короткостроковій перспективі.

Оцінка індексу експозиції. Зміна клімату впливає на виробничу потужність, і економічну ефективність сонячної енергетики, посилює проблеми при міжсекторальній взаємодії. Вплив зміни клімату на виробничу потужність сонячної енергетики охоплює низку факторів, які можуть як підвищувати, так і знижувати ефективність генерації електроенергії з сонячної радіації. Зменшення хмарності зумовлює збільшення сонячної радіації і, відповідно, зростання генерації енергії. Підвищення температури повітря в холодний період приводить до зменшення затінення та обледеніння панелей, що подовжує активний виробничий сезон. Збільшення тривалості теплого і літнього сезону зумовлює зростання потенціалу генерації. Проте, ефективність сонячних панелей знижується при високих температурах, посухи та лісові пожежі зменшують прозорість атмосфери та надходження сонячної радіації, сильний град, шквал, зливи можуть фізично пошкодити панелі або інфраструктуру, порушити мережеву стабільність, а підвищення вологості та збільшення хмарності зменшують надходження прямої радіації.

Зміна клімату створює ризики і можливості для економічної ефективності сонячної енергетики. Основна загроза — зниження ефективності панелей через перегрів, зростання операційних витрат і ризики інфраструктурних пошкоджень. Водночас, за правильного вибору місця, технологій та систем адаптації (наприклад, панелі з активним охолодженням, страхування,

мобільне очищення) — економічна ефективність може бути збережена або навіть покращена.

Зміна клімату підсилює роль сонячної енергетики як ключового інструменту декарбонізації, але водночас загострює міжсекторальні конфлікти, зокрема, за ресурси (воду, землю, мережеву ємність), за пріоритети інвестування, за адаптаційні функції.

Результати оцінки перебування об'єктів сонячної енергетики під дією зміни клімату представлено в табл. 5.27.

Таблиця 5.27 – Оцінка перебування об'єктів сонячної енергетики під дією зміни клімату (експозиції) у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції $E^c i$	Вплив	Нормалізоване значення $E^c i^*$	Ваговий коефіцієнт w^c_{ei}	Внесок у індекс $E^c i \times w^c_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми (частка в електровиробництві ~ 7,5 %)	0,08	0,4	0,03
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,70	0,3	0,21
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за ресурси з іншими секторами	0,60	0,3	0,18
Інтегральний індекс експозиції E^c				1,00	0,42

Проведений аналіз об'єктів сонячної енергетики під дією зміни клімату показав що в короткостроковій перспективі сонячна енергетика України матиме помірний рівень експозиції ($E^c = 0,42$) до змін клімату за сценарію РТК8.5. Це пов'язано з поступовим зростанням ролі сонячної енергетики у структурі виробництва електроенергії, що підвищуватиме залежність галузі від кліматичних умов, насамперед режиму сонячної радіації, температури повітря та хмарності.

Очікуване збільшення частки СЕС у загальному виробництві електроенергії приблизно на 2 % означатиме розширення площ розміщення сонячних електростанцій та зростання кількості об'єктів, які перебуватимуть під впливом кліматичних чинників. Водночас розвиток інноваційних технологій ефективного перетворення сонячного випромінювання,

підвищення ККД панелей та вдосконалення систем охолодження частково знижуватимуть рівень експозиції галузі до кліматичних змін.

Додатковим чинником формування експозиції може стати посилення конкуренції за земельні ресурси, особливо у регіонах із найкращими умовами для розвитку сонячної енергетики, де одночасно зростатиме потреба у землях для сільського господарства, забудови та інших видів господарської діяльності. У сукупності це формує помірний рівень експозиції сонячної енергетики України до зміни клімату у короткостроковій перспективі..

Оцінка індексу чутливості. Сонячна енергетика є дуже чутливою до зміни кліматичних чинників: сонячної радіації, вологості повітря, хмарності, режиму випадіння атмосферних опадів, швидкості вітру тощо. Індикаторами її чутливості є ефективність роботи сонячних фотоелектричних батарей, освітленість, стан електроінфраструктури (табл.5.28).

Таблиця 5.28 – Оцінка чутливості сонячної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^c_i	Вплив	Нормалізоване значення S^c_i *	Ваговий коефіцієнт w^c_{si} *	Внесок у індекс $S^c \times w^c_{si}$
1	Ефективність роботи сонячних фотоелектричних батарей	Вища температура = менша ефективність	0,7	0,3	0,21
2	Чутливість до пилу, снігу, хмарності	Забруднення знижує генерацію	0,6	0,25	0,15
3	Продуктивність, стан електроінфраструктури (мереж)	Втрати при перенавантаженні, нестабільній генерації	0,5	0,25	0,125
4	Цілісність обладнання	Стійкість конструкцій до стихійних явищ погоди	0,75	0,2	0,15
Інтегральний індекс чутливості S^c				1,00	0,635

*- за експертною оцінкою автора

Оцінка індикаторів чутливості сонячної енергетики показала, що сонячна енергетика України в короткостроковій перспективі матиме високий рівень чутливості ($S^c = 0,635$) до змін клімату за сценарію РТК8.5. Це пов'язано з тим, що ефективність роботи сонячних електростанцій безпосередньо

залежить від погодних і кліматичних умов, а зміни температурного режиму та зростання повторюваності екстремальних явищ можуть істотно впливати на стабільність генерації електроенергії.

Одним із головних чинників високої чутливості є зниження ефективності фотоелектричних панелей за високих температур повітря. Під час хвиль спеки панелі перегріваються, що призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії та втрат виробітку електроенергії. Крім того, підвищені температури можуть прискорювати старіння обладнання та збільшувати навантаження на електротехнічні системи.

Додатковий негативний вплив мають забруднення поверхні панелей пилом, продуктами горіння, а також сніг і ожеледь, які обмежують доступ сонячного випромінювання та можуть суттєво знижувати рівень генерації. В умовах зміни клімату ймовірно зростання тривалості посушливих періодів і пилових явищ може посилювати цю проблему.

Високий рівень чутливості також зумовлений тим, що енергетична інфраструктура та системи балансування ще не повністю адаптовані до різких добових і сезонних коливань виробництва сонячної енергії. У періоди пікової генерації або різких змін погодних умов можуть виникати додаткові навантаження на енергосистему, що ускладнює забезпечення стабільності електропостачання.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Оцінка адаптаційної спроможності сонячної енергетики — це визначення її здатності пристосовуватись до наслідків зміни клімату, зберігаючи або навіть підвищуючи рівень виробництва електроенергії, економічну ефективність та інтеграцію з іншими секторами. Адаптаційна спроможність -це сукупність технічних, інституційних, фінансових, соціальних та екологічних можливостей, які дають змогу системі запобігати, пом'якшувати або пристосовуватись до негативних кліматичних впливів. Основними індикаторами адаптаційної спроможності сонячної енергетики є технічна спроможність та інституційна підтримка. Технічна спроможність передбачає

інновації, модернізацію, автоматизацію систем, стійкість до фізичного пошкодження, а інституційна підтримка включає державна підтримку, законодавчі механізми (табл.5.29).

Таблиця 5.29 – Оцінка адаптаційної спроможності сонячної енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^c_i	Вплив	Нормалізоване значення $AC^c_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^c_{aci} *$	Внесок у індекс $AC^c_i \times w^c_{si}$
1	Регулювання кута фіксації кріплення для нахилу панелей	Підвищує виробіток електроенергії	0,6	0,25	0,15
2	Термостійкість фото-елементів та компонентів модуля	Зменшує негативний вплив високих температур Забезпечує своєчасне реагування на погодні зміни	0,5	0,2	0,10
3	Стеження за поворотом панелі від сильного вітру	Стійкість до фізичного пошкодження	0,4	0,2	0,08
4	Посилення кріплень і опорних конструкцій, зміцнення поверхні	Стійкість до фізичного пошкодження	0,45	0,2	0,09
5	Поліпшення політики земле-користування	Збільшення земельних ділянок для ВЕС	0,6	0,15	0,09
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACI^c				1,00	0,51

У короткостроковій перспективі сонячна енергетика України матиме помірну адаптаційну спроможність ($ACI^c = 0,51$) за сценарієм РТК8.5 (табл.5.29), що свідчить про наявність передумов для пристосування галузі до змін клімату, хоча існуючих можливостей поки недостатньо для повного зниження кліматичних ризиків.

Помірний рівень адаптаційної спроможності зумовлений насамперед впровадженням інноваційних технологічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності та стійкості сонячних електростанцій. Зокрема,

застосовуються системи охолодження панелей, які зменшують втрати ефективності під час високих температур, а також системи автоматичного відстеження положення Сонця, що дозволяють оптимізувати виробництво електроенергії за різних погодних умов.

Важливим чинником є й активний розвиток систем моніторингу та прогнозування, які забезпечують контроль технічного стану обладнання, оперативне виявлення несправностей і підвищення ефективності управління генерацією електроенергії. Позитивний вплив має також поступове формування кадрового потенціалу галузі та підготовка кваліфікованих фахівців у сфері відновлюваної енергетики та кліматичної адаптації.

Додатковою передумовою адаптації є розвиток державної кліматичної політики. Прийняття Закону України «Про основні засади державної кліматичної політики» та розроблення стратегій адаптації до зміни клімату створюють нормативну основу для врахування кліматичних ризиків у плануванні розвитку енергетики та впровадження адаптаційних заходів.

Водночас адаптаційна спроможність оцінюється як помірна, а не висока, оскільки темпи модернізації інфраструктури, впровадження систем накопичення енергії та інтеграції кліматичних ризиків у практику управління галуззю залишаються недостатніми, а фінансові та технологічні можливості сектору все ще обмежені

Інтегральний індекс вразливості для сонячної енергетики України у короткостроковій перспективі становить $V^c=0,56$, що свідчить про помірний рівень вразливості галузі до зміни клімату.

Такий рівень вразливості зумовлений залежністю ефективності функціонування сонячних електростанцій від зміни хмарності, температурного режиму, запиленості атмосфери та повторюваності небезпечних явищ погоди. Підвищення температури повітря може призводити до зниження ефективності фотоелектричних модулів, а екстремальні погодні явища — сильний вітер, град, пилові бурі чи інтенсивні опади — здатні негативно впливати на технічний стан обладнання та стабільність генерації

електроенергії. Водночас сучасні технології сонячної енергетики, можливість швидкої модернізації обладнання та впровадження систем моніторингу й охолодження частково компенсують негативний вплив кліматичних чинників.

Інтегральний індекс кліматичного ризику для сонячної енергетики України у короткостроковій перспективі становить $R^c=0,5230$, що відповідає помірному рівню впливу кліматичних ризиків на галузь за сценарієм RCP8.5. Отримане значення свідчить, що зміна клімату вже у короткостроковій перспективі може мати помітний вплив на ефективність та надійність функціонування сонячної енергетики України. Основними джерелами ризику є зростання температурних навантажень на обладнання, зміна режиму сонячної радіації, збільшення повторюваності екстремальних погодних явищ та можливе погіршення умов експлуатації фотоелектричних систем у окремих регіонах.

5.6.2 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для сонячної енергетики у середньостроковій перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для сонячної енергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності сонячної енергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову перспективу.

Оцінка індексу небезпеки. Встановлено (табл.5.30) що у середньостроковій перспективі сонячна енергетика України *матиме помірний рівень небезпеки* ($HI^c=0,53$) до змін клімату за сценарієм RCP8.5, оскільки зростання температури зменшує ефективність панелей.

Таблиця 5.30 - Оцінка кліматичної небезпеки для сонячної енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки HI^c	Вплив	Нормалізоване значення $HI^c *$	Ваговий коефіцієнт $w_{hi}^c *$	Внесок у індекс $HI^c \times w_{hi}^c$
---	----------------------------	-------	---------------------------------	---------------------------------	--

1	Сумарна за рік сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	Прямопропорційно впливає на продуктивність сонячних панелей	0,45	0,6	0,27
2	Середня максимальна за літо температура повітря, °С	Перегрів панелей знижує ефективність на 0,4–0,5%/°С при підвищенні температури	0,69	0,1	0,07
3	Середня за рік загальна хмарність, (Середня площа хмарності) %	Хмарність прямо пропорційно зменшує продуктивність сонячних панелей внаслідок зменшення інтенсивності опромінення панелей	0,73	0,1	0,07
4	Кількість днів за літо з опадами 1мм і більше за добу, дні	Збільшення кількості днів з опадами сприяє змиванню дощем пилу з поверхні панелей (короткочасно), але знижує ефективність вироблення енергії за рахунок зменшення кількості сонячної радіації та підвищення хмарності).	0,60	0,1	0,06
5	Середня за літо швидкість вітру, м/с	Підвищення ефективності та продуктивності завдяки охолоджуючому ефекту вітру, ризики пошкодження інфраструктури	0,62	0,1	0,06
Інтегральний індекс безпеки HI^c				1,00	0,53

Оцінка індексу експозиції. У середньостроковій перспективі сонячна енергетика України матиме помірний рівень експозиції ($EI^c = 0,50$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 (табл.5.31), оскільки очікується подальше зростання ролі сонячної генерації в енергетичному балансі країни та розширення кількості об'єктів, що перебуватимуть під впливом кліматичних чинників. Збільшення частки сонячної енергетики у загальному виробництві електроенергії приблизно на 4,5 % означатиме вищу залежність енергосистеми

від змін сонячної радіації, температурного режиму, хмарності та екстремальних погодних явищ.

Таблиця 5.31 – Оцінка експозиції для сонячної енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^c_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^c_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^c_{ei} *$	Внесок у індекс $E^c_i \times w^c_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми (частка в електровиробництві ~ 9,5 %)	0,1	0,4	0,04
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,70	0,2	0,14
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за земельні ресурси з іншими секторами	0,80	0,4	0,32
Інтегральний індекс експозиції EI^c				1,00	0,50

Водночас рівень експозиції оцінюється як помірний, а не високий, оскільки розвиток інноваційних технологій ефективного перетворення сонячного випромінювання, підвищення ККД фотоелектричних панелей, удосконалення систем охолодження та автоматизованого моніторингу частково знижуватимуть негативний вплив кліматичних змін на функціонування галузі.

Додатковим чинником формування експозиції може стати суттєве зростання конкуренції за земельні ресурси. Розширення площ під сонячні електростанції відбуватиметься одночасно зі зростанням потреб аграрного сектору, забудови та інших видів господарської діяльності, особливо у регіонах із найвищим рівнем сонячної радіації. Це може обмежувати можливості оптимального розміщення нових СЕС та підвищувати залежність галузі від територій, вразливих до кліматичних змін

Індекс вразливості для сонячної енергетики України ($V^c = 0,56^6$) свідчить про помірний рівень її вразливості у середньостроковій перспективі, оскільки галузь характеризується поєднанням високої чутливості до кліматичних змін та лише помірної адаптаційної спроможності. Ефективність роботи сонячних електростанцій значною мірою залежить від температурного режиму, хмарності, запиленості атмосфери та стабільності погодних умов. Підвищення температури повітря, зростання повторюваності хвиль спеки, сильних опадів і пилових явищ можуть призводити до зниження продуктивності панелей, прискореного зношення обладнання та зростання навантаження на енергетичну інфраструктуру. Водночас існуючі адаптаційні можливості галузі — модернізація обладнання, системи охолодження, моніторинг і нормативне забезпечення — поки що недостатні для повної компенсації цих впливів.

Разом із тим кліматичний ризик для сонячної енергетики у середньостроковій перспективі оцінюється як помірний ($R^c=0,53$). Це пояснюється тим, що поряд із негативними наслідками зміни клімату для галузі очікуються і певні сприятливі умови, зокрема збільшення сонячної радіації та зменшення хмарності у теплий період року, що може частково компенсувати втрати ефективності від підвищення температури. Крім того, рівень кліматичної небезпеки та експозиції для сонячної енергетики залишається помірним, а прогнозовані зміни клімату у середньостроковій перспективі ще не матимуть критичного характеру для функціонування галузі в масштабах усієї країни.

Таким чином, висока вразливість свідчить про значну внутрішню чутливість сонячної енергетики до кліматичних змін, тоді як помірний рівень кліматичного ризику відображає те, що сукупний вплив небезпеки, експозиції та вразливості поки не призводитиме до критичних наслідків для розвитку галузі.

Отримані результати свідчать, що, попри помірний рівень кліматичного ризику, сонячна енергетика України потребує активного впровадження адаптаційних заходів, спрямованих на підвищення її кліматичної стійкості у

середньостроковій перспективі. Насамперед це стосується використання термостійких фотоелектричних модулів, удосконалення систем охолодження та очищення панелей, а також обов'язкового врахування кліматичних ризиків під час проєктування, розміщення й експлуатації нових сонячних електростанцій.

Необхідність таких заходів зумовлена тим, що одним із головних чинників впливу зміни клімату є перегрів сонячних панелей, який може знижувати їхню ефективність приблизно на 0,4–0,5 % на кожен градус підвищення температури. Додатковий негативний вплив матимуть забруднення поверхні панелей пилом, продуктами горіння, наслідками лісових пожеж, а також інтенсивні опади, що здатні зменшувати обсяги генерації електроенергії на 10–15 %.

Крім технічних аспектів, важливим викликом для розвитку галузі може стати загострення міжсекторальної конкуренції за земельні ресурси. Очікуване розширення площ сонячних електростанцій відбуватиметься в умовах зростання потреб аграрного сектору, забудови та природоохоронних територій, що може ускладнювати вибір оптимальних майданчиків для розміщення нових об'єктів сонячної енергетики.

5.6.3 Пріоритетні напрямки адаптації сонячної енергетики до зміни клімату. Адаптація сонячної енергетики до зміни клімату має бути комплексною, поєднуючи технічні рішення з політикою, фінансами та просторовим плануванням. Пріоритет слід надавати регіонам і об'єктам з високою кліматичною вразливістю та стратегічним значенням (громади, критична інфраструктура).

Метою адаптаційних заходів до змін клімату для сонячної енергетики є забезпечити високу стійкість, безпечну експлуатацію та стабільний виробіток СЕС в умовах погіршення кліматичних умов, зокрема спеки, пилу, сильних вітрів, підтоплень і перегріву.

Пріоритетні напрямки адаптації сонячної енергетики до зміни клімату охоплюють технологічні, інфраструктурні, операційні та дослідницькі аспекти, законодавчі та економічні стимули.

1. Технологічна модернізація та інновації передбачають:

- розроблення та впровадження фотоелектричних модулів нового покоління;

- використання передового температурного моделювання для прогнозування температурного режиму та оптимізації конструкції панелей та їх розташування;

- впровадження інтелектуальних систем моніторингу та управління що дозволяють в реальному часі відстежувати продуктивність панелей, виявляти несправності, оптимізувати роботу інверторів та управляти системами охолодження. Це включає використання ШІ та машинного навчання для прогнозування погодних умов та оптимізації виробництва.

2. Інфраструктурні та операційні рішення:

- оптимізація розташування та конфігурації сонячних електростанцій:

- покращені системи очищення та обслуговування:

- гібридні системи та інтеграція з накопичувачами енергії:

- створення гібридних енергетичних систем (наприклад, сонячні + вітрові + гідро), що дозволяють компенсувати коливання виробництва, викликані погодними умовами.

3. Дослідження та розробки:

- розвиток кліматичного моделювання та прогнозування: розроблення високоточних регіональних кліматичних моделей для кращого прогнозування змін у сонячній інсоляції, температурі, хмарності та режимі опадів у місцях розташування СЕС;

- оцінка довгострокових кліматичних трендів для стратегічного планування розвитку сонячної енергетики;

- пошук та розробка нових матеріалів з покращеними характеристиками стійкості до кліматичних впливів (температури, вологості, УФ-випромінювання, механічних навантажень);

- розроблення гнучких проектних рішень для сонячних електростанцій, які дозволяють легко модифікувати та адаптувати їх до змінних кліматичних умов.

4. Законодавчі та економічні стимули:

- запровадження державних програм та фінансових стимулів для інвестицій у стійкіші та адаптовані до клімату сонячні технології;

- розробка будівельних норм та стандартів, що враховують прогнозовані зміни клімату та вимоги до стійкості сонячних установок;

- розробка спеціальних страхових продуктів для сонячних електростанцій, що покривають ризики, пов'язані з екстремальними погодними явищами, спричиненими зміною клімату.

Адаптація сонячної енергетики до зміни клімату – це не просто реакція на виклики, а можливість для її подальшого розвитку та підвищення надійності як ключового елемента сталого енергетичного майбутнього.

5.7 Біоенергетика

Біоенергетика — це підгалузь енергетики, що забезпечує виробництво теплової та електричної енергії, а також палива з біомаси — органічної речовини рослинного або тваринного походження⁹³. Вона є ключовим компонентом відновлюваної енергетики та має велике значення для декарбонізації енергетичного сектору. Основними джерелами біомаси є деревина та деревні відходи, сільськогосподарські залишки (солома, лушпиння, стебла кукурудзи тощо), енергетичні культури (верба, міскантус), органічні побутові й промислові відходи, а також біогаз, отриманий із

⁹³ [Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України](#). (n.d.). *Біоенергетика*. Retrieved May 15, 2026, from Сторінка «Біоенергетика»

тваринницьких комплексів та полігонів твердих побутових відходів⁹⁴. Тверда біомаса використовується для спалювання або газифікації, біогаз – використовується для виробництва електроенергії, тепла або як паливо.

Основними кліматичними загрозами, що можуть впливати на безпеку та ефективність роботи біоенергетики, перш за все на виробництво біомаси, слід вважати зміну періоду вегетації, зростання посушливості, екстремальні температури і опади. Зміна тривалості та теплозабезпеченості періоду активної вегетації, підвищення температури повітря, збільшення повторюваності екстремальних температур і опадів, а також зростання випаровуваності та посушливості впливають як на продуктивність біомаси, так і на функціонування біоенергетичної інфраструктури, зокрема турбін, генераторів, котлів, систем подачі води й палива, систем видалення золи, очищення викидів та охолодження⁹⁵ (рис.5.6).

Основними факторами чутливості є якість сировини для біопалива, ефективність згоряння палива, (рис.5.6). Факторами перебування під дією (експозицією) є забезпеченість ресурсами, ефективність функціонування виробництва.

Щоб запобігти подальшим ризикам основними факторами здатності до адаптації слід вважати управління родючістю ґрунтів, оптимізація системи водозабезпечення, гнучкість у переліку вирощуваних сортів енергетичних культур. (рис.5.6).

⁹⁴ [International Energy Agency Bioenergy](#). (n.d.). *What is bioenergy?* Retrieved May 15, 2026, from [IEA Bioenergy](#)

⁹⁵ [International Energy Agency](#). (2015). *Climate impacts on energy systems*. Retrieved from IEA Climate Impacts on Energy Systems

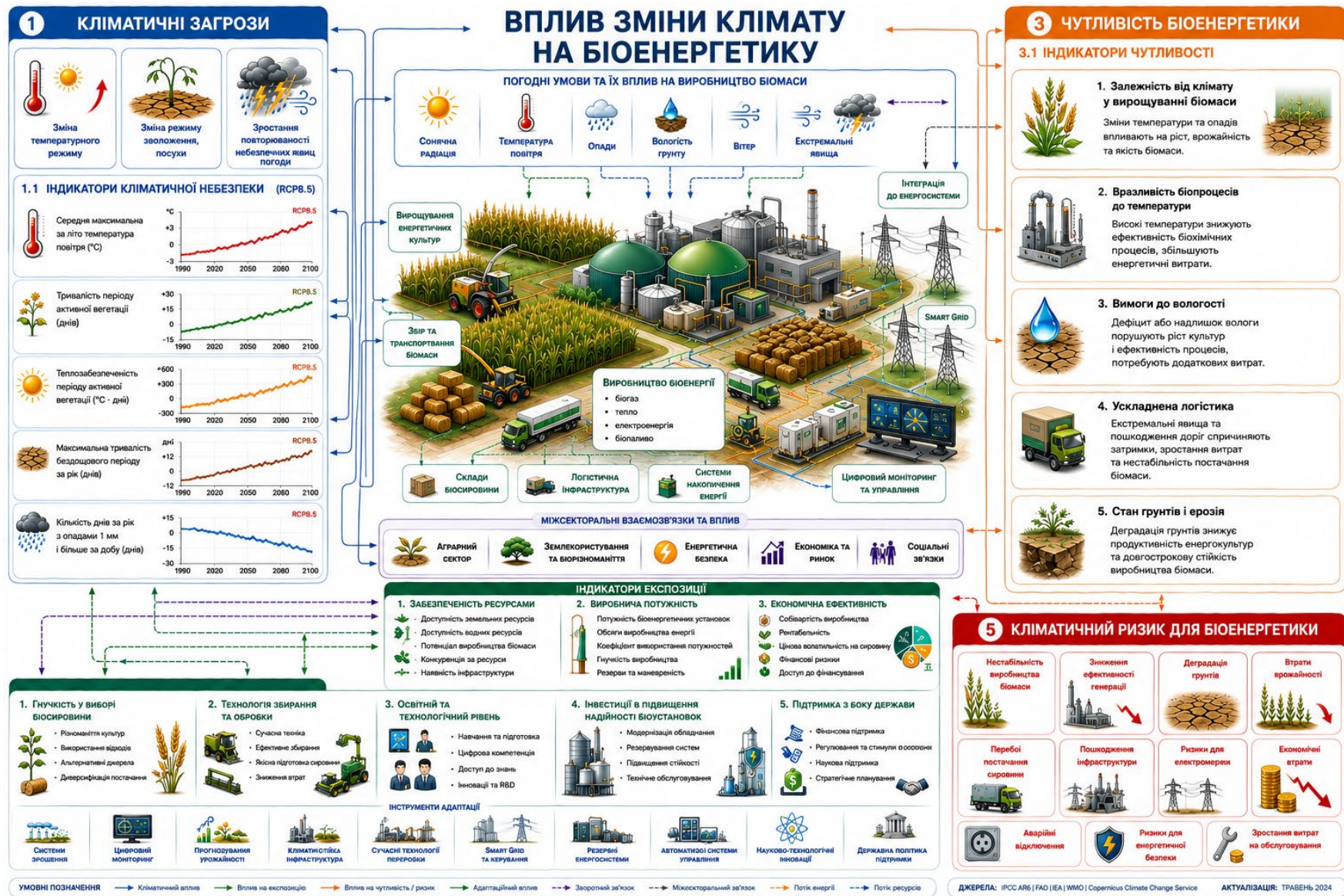


Рис.5.6 Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату на в біоенергетику

5.7.1 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для біоенергетики у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі. Оцінка індексу небезпеки. Основними кліматичними загрозами для біоенергетики є зміна періоду вегетації, зростання посушливості, екстремальні температури і опади

Кліматичні загрози для біоенергетики оцінювали за такими індикаторами як середня максимальна за літо температура повітря, максимальна тривалість бездощового періоду за рік, кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, тривалістю і теплозабезпеченістю періоду активної вегетації. Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для біоенергетики у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.32.

Таблиця 5.32– Оцінка кліматичної небезпеки для біоенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^B_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^B_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^{B_{hi}} *$	Внесок у індекс $H^B_i \times w^{B_{hi}}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °С	Вироблення обсягів біомаси, система охолодження, перегрів охолоджуючої води	0.5	0.20	0.10
2	Тривалість періоду активної вегетації,	Вироблення обсягів біомаси	0.77	0.25	0.19
3	Теплозабезпеченість періоду активної вегетації,	Продуктивність (урожайність) енергетичних культур	0.64	0.25	0.16
4	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	Забезпеченість водою, урожайність енергетичних культур	0.45	0.10	0,05
5	Кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, дні	Якість сировини для біопалива, логістика, постачання біомаси та її зберігання	0.66	0.20	0.13
	Інтегральний індекс небезпеки H^B			1.00	0.63

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз внеску індикаторів кліматичної небезпеки в Інтегральний індекс небезпеки HI^B показав, що найбільше впливатимуть на біоенергетику в короткостроковій перспективі збільшення тривалості та теплозабезпеченості періоду активної вегетації, зміна кількості днів за рік з опадами. Вони впливають на урожайність енергетичних культур, якість сировини для біопалива, логістику, постачання біомаси та її зберігання.

Кліматичні загрози, такі як зміна кількості опадів, посухи, повені та екстремальні температури, мають комплексний і двозначний вплив на біоенергетику, внаслідок зниження врожайності енергетичних культур: посухи, високі температури та нестабільність опадів ведуть до зменшення біомаси, яка є сировиною для біоенергетики, часті посухи і повені погіршують якість ґрунтів, зменшуючи придатність для вирощування біоенергетичних культур. Зниження ефективності технологій: біогазові установки, ферментаційні реактори та інші системи можуть працювати нестабільно за різких кліматичних змін.

Отримане значення інтегрального індексу кліматичної небезпеки ($HI^B = 0,63$) свідчить, що у короткостроковій перспективі за сценарієм RCP8.5 біоенергетика України матиме високий рівень кліматичної небезпеки. Це зумовлено суттєвими змінами агрокліматичних умов, які безпосередньо впливатимуть на продуктивність енергетичних культур, стабільність сировинної бази та умови вирощування біомаси.

Одним із головних чинників є збільшення тривалості періоду активної вегетації майже на два тижні порівняно з базовим періодом 1991–2020 рр. Очікується, що його тривалість досягатиме 180–200 днів не лише у степовій, а й у лісостеповій зоні України. З одного боку, це створюватиме передумови для вирощування нових теплолюбних культур і підвищення біопродуктивності. Проте одночасно це супроводжуватиметься посиленням теплового та водного стресу рослин.

На фоні зростання теплозабезпеченості періоду активної вегетації на 100–200 °C додатковим чинником небезпеки стане підвищення середньої

максимальної температури повітря влітку приблизно на 0,7 °С. Особливо важливим є збільшення 95-го перцентилу температури майже на 2,0 °С, що свідчить про зростання повторюваності та інтенсивності хвиль спеки. Такі умови можуть призводити до перегріву рослин, пришвидшеного виснаження вологи у ґрунті та зниження врожайності енергетичних культур.

Важливим проявом кліматичної небезпеки є й очікуване зростання інтенсивності опадів. Зокрема, прогнозується збільшення кількості випадків сильних опадів (20 мм за добу і більше) на 22,5 %, а їхнього 95-го перцентилу — на 42 %. Це підвищуватиме ризик ерозії ґрунтів, підтоплення посівів, погіршення умов збирання та зберігання біомаси.

Одночасно очікується збільшення тривалості бездошових періодів на 0,5–3,5 дня, унаслідок чого їхня середня тривалість може перевищувати один місяць. Поєднання тривалих посушливих періодів із епізодами інтенсивних опадів формуватиме нестабільні умови зволоження, що підвищуватиме ризик посух, деградації ґрунтів та втрат урожаю.

Таким чином, високий рівень кліматичної небезпеки для біоенергетики України пов'язаний із комплексним впливом підвищення температури, зміни режиму опадів, посилення посушливості та зростання частоти кліматичних екстремумів, які можуть істотно впливати на стабільність виробництва біоенергетичної сировини..

Оцінка індексу експозиції. Індикаторами, які характеризують перебування об'єктів біоенергетики під дією кліматичних загроз, можуть виступати забезпеченість ресурсами, виробничі потужності, економічна ефективність (табл.5.33). Безпосередньо на обсяг вироблення біомаси впливають клімат і ґрунти, структура сільського господарства, рівень механізації збору відходів, ринки збуту та інфраструктура, державна політика і субсидії.

Проведена оцінка індикаторів експозиції для біоенергетики, зокрема забезпеченості ресурсами, економічної ефективності показала, що основний внесок в інтегрований індикатор експозиції є забезпеченості ресурсами з

урахуванням впливу зміни кліматичних чинників у короткостроковій перспективі (табл.5.33).

Таблиця 5.33 – Оцінка експозиції для біоенергетики енергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^{Bi}	Вплив	Нормалізоване значення $E^{Bi} *$	Ваговий коефіцієнт $w_{ei}^{B} *$	Внесок у індекс $E^{Bi} \times w_{si}^{B}$
1	Забезпеченість ресурсами	Надійність функціонування підприємства	0.9	0.4	0.36
2	Виробнича потужність	Посилення енергетичної незалежності (особливо в умовах війни чи енергетичних криз)	0,30	0.3	0.12
3	Економічна ефективність	Відновлюваність ресурсів,, скорочення викидів парникових газів, переробка відходів, розвиток сільської економіки	0.60	0.3	0.18
Інтегральний індекс експозиції E^B				1,00	0,51

*за експертною оцінкою авторів

Встановлено, що біоенергетика України має помірний рівень експозиції ($E^T = 0,51$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 до 2040 року. Це зумовлено тим, що розвиток біоенергетики безпосередньо залежить від кліматичних умов, які визначають продуктивність сільськогосподарських культур, обсяги формування біомаси та стабільність сировинної бази галузі.

Помірний рівень експозиції пов'язаний із тим, що значна частина території України, придатної для вирощування енергетичних культур, перебуватиме під впливом підвищення температури повітря, зміни режиму опадів, посилення посушливості та збільшення повторюваності

екстремальних погодних явищ. Це може впливати на врожайність, сезонність виробництва біомаси та ефективність її використання у біоенергетиці.

Водночас експозиція не оцінюється як висока, оскільки очікуване потепління частково створюватиме і сприятливі умови для розвитку галузі. Зокрема, збільшення тривалості вегетаційного періоду та зростання теплозабезпеченості можуть розширити можливості вирощування окремих енергетичних культур і підвищити біопродуктивність у деяких регіонах України. Крім того, біоенергетика характеризується певною просторовою диверсифікацією сировинної бази та можливістю використання різних видів біомаси, що частково знижує залежність галузі від окремих кліматичних чинників.

Таким чином, помірний рівень експозиції відображає поєднання зростаючого впливу кліматичних змін на агрокліматичні умови з наявністю певних природних і технологічних можливостей для часткової компенсації негативних наслідків.

Оцінка індексу чутливості. Продуктивність і стабільність роботи біоенергетичних установок значно залежать від впливу кліматичних чинників, зокрема :температури та опадів, які безпосередньо впливають на врожайність енергетичних культур. Засухи або повені можуть знизити доступну сировину на 20–50% у критичні роки. Вологість біомаси впливає на калорійність і можливість зберігання. При високій вологості — зростає ризик гниття, при низькій — знижується ефективність згоряння.

Основними індикаторами чутливості біоенергетики можуть бути залежність від клімату у вирощуванні біомаси, вразливість біопроектів до температури, вимоги до вологості біомаси.

. Оцінку внеску цих індикаторів у Інтегральний індекс чутливості S^c представлено в табл.5.34.

Таблиця 5.34 – Оцінка чутливості для біоенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^B_i	Вплив	Нормалізоване значення S^B_i *	Ваговий коефіцієнт w^B_{si} *	Внесок у індекс $S^B_i \times w^B_{si}$
1	Залежність від клімату у вирощуванні біомаси	Обсяг палива, потрібний для роботи	0.85	0.35	0.3
2	Вразливість біопроектів до температури	Продуктивність (урожайність), енергетичних культур	0.75	0.2	0.15
3	Вимоги до вологості	Забезпечення ефективності згоряння різних видів палива	0.75	0.15	0.11
4	Ускладнена логістика	Сезонність постачання сировини	0.7	0.2	0.14
5	Стан ґрунтів і ерозія	Забезпечення довгострокової продуктивності ґрунтів, відновлення їх родючості.	0.8	0.10	0.08
Інтегральний індекс чутливості SI^B				1.00	0.78

* - за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз показав, що біоенергетика енергетика України має високий рівень чутливості ($SI^B = 0,7$) до зміни клімату, оскільки її функціонування безпосередньо залежить від агрокліматичних умов, які визначають продуктивність енергетичних культур, обсяги формування біомаси та стабільність її постачання.

Біоенергетика є однією з найбільш кліматозалежних підгалузей енергетики, адже виробництво сировини для генерації енергії тісно пов'язане з температурним режимом, режимом опадів, зволоженням ґрунтів, тривалістю вегетаційного періоду та повторюваністю екстремальних погодних явищ. Посухи, хвилі спеки, інтенсивні опади, підтоплення чи деградація ґрунтів

можуть суттєво впливати на врожайність енергетичних культур, якість біомаси та стабільність логістики її постачання до енергетичних об'єктів.

Високий рівень чутливості також зумовлений тим, що розвиток біоенергетики в Україні значною мірою базується на використанні потужного аграрного потенціалу країни. Саме тому будь-які негативні зміни агрокліматичних умов безпосередньо впливатимуть на можливості виробництва біоенергетичної сировини. Крім того, значна територіальна залежність вирощування біомаси від природно-кліматичних умов окремих регіонів підвищує вразливість галузі до регіональних кліматичних змін та екстремальних явищ погоди.

Таким чином, висока чутливість біоенергетики України до зміни клімату визначається її тісним зв'язком із сільськогосподарським виробництвом, значною залежністю від погодних умов і необхідністю стабільного забезпечення біомасою для генерації енергії.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Основною метою адаптації енергетичних систем до зміни клімату є забезпечення сталого енергопостачання та збалансованості виробництва та споживання у часі та просторі. Індикаторами адаптаційної спроможності біоенергетики можуть бути гнучкість у виборі біосировини, удосконалення технологій її збирання та обробки, залучення інвестицій в підвищення надійності біоустановок.

Проведений аналіз внеску індикаторів адаптаційної спроможності для біоенергетики у короткостроковій перспективі представлено в табл.6.35.

Таблиця 5.35 – Оцінка індикаторів адаптаційної спроможності для біоенергетики у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^B_i	Пояснення	Нормалізоване значення $AC^B_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^B_{si} *$	Внесок у індекс $AC^B_i \times w^B_{si}$
1	Гнучкість у виборі біосировини	Вплив зміни клімату на водні ресурси для охолодження	0.6	0,25	0.15
2	Технологія збирання /обробки	Здатність працювати під	0.5	0,20	0.1

		час аномальної спеки			
3	Освітній та технологічний рівень	Захищеність від фізичних загроз (війна, тероризм)	0.5	0,25	0.125
4	Інвестиції в підвищення надійності біоустановок	Стан виконання заходів безпеки	0.4	0,20	0.08
5	Підтримка з боку держави	Здатність до інтеграції з іншими джерелами енергії(вугіллям)	0.5	0,1	0.05
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACI^B				1,00	0.51

* - за експертною оцінкою авторів

Аналіз адаптаційної спроможності біоенергетики України до зміни клімату показав, що в короткостроковій перспективі вона має *помірну здатність до адаптації* ($ACI^B = 0,51$). Це свідчить про наявність певних технологічних і ресурсних передумов для підвищення стійкості галузі, однак існуючих можливостей поки недостатньо для повного нейтралізування кліматичних ризиків.

Одним із важливих чинників адаптаційної спроможності є впровадження інноваційних рішень, спрямованих на підвищення надійності та ефективності біоенергетичних установок. Зокрема, сучасні технології спалювання, перероблення та зберігання біомаси дозволяють підвищувати енергоефективність, зменшувати втрати сировини та забезпечувати стабільнішу роботу об'єктів навіть за нестабільних кліматичних умов.

Додатковою перевагою є наявність в Україні значного потенціалу біоресурсів. Розвинений аграрний сектор, великі площі сільськогосподарських угідь, наявність рослинних відходів, енергетичних культур та органічної сировини створюють достатню ресурсну базу для розвитку біоенергетики та частково знижують ризики дефіциту палива.

Водночас адаптаційна спроможність оцінюється як помірна, а не висока, оскільки галузь усе ще залежить від кліматичних умов, потребує модернізації

інфраструктури, розвитку систем логістики, зберігання біомаси та ширшого впровадження адаптаційних технологій. Крім того, обмежене фінансування, недостатній рівень інтеграції кліматичних ризиків у планування розвитку галузі та вплив воєнних чинників стримують підвищення її кліматичної стійкості.

Встановлені інтегровані індекси чутливості та адаптаційної спроможності дозволяють оцінити інтегральний індекс вразливості V^B біоенергетики відповідно до формули (5.2). Його величина становить 0.635 і свідчить про *високий рівень* вразливості біоенергетики в Україні

Отриманий результат свідчить, що зміна клімату вже у найближчі десятиліття може помітно впливати на функціонування та розвиток біоенергетики України. Основними чинниками ризику є зміна температурного режиму, збільшення тривалості посушливих періодів, нерівномірність зволоження території, зростання повторюваності екстремальних погодних явищ та пов'язані з цим зміни продуктивності біомаси. Такі процеси можуть впливати на стабільність сировинної бази біоенергетики, ефективність вирощування енергетичних культур та надійність забезпечення паливними ресурсами.

Високий рівень кліматичної небезпеки у поєднанні з високим рівнем чутливості та помірним рівнем експозиції і адаптаційної спроможності біоенергетики, формує помірний що наближається до високого рівень кліматичного ризику для галузі ($R^B=0,59$). Водночас наявний адаптаційний потенціал, зокрема можливість диверсифікації джерел біомаси, впровадження стійких до посухи енергетичних культур, удосконалення технологій перероблення біомаси та розвитку систем управління ресурсами, частково компенсує негативний вплив кліматичних змін.

5.7.2 Оцінка кліматичного ризику для вразливості біоенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі.

Оцінку кліматичних ризиків для біоенергетики у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси

чутливості та адаптаційної спроможності біоенергетики залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову (2041-2060 рр,) перспективу.

Результати оцінки інтегрованого індексу кліматичної небезпеки для біоенергетики, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.36.

Таблиця 5.36 - Оцінка кліматичної небезпеки для теплової енергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^B_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^B_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^B_{hi} *$	Внесок у індекс $H^B_i \times w^B_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	Вироблення обсягів біомаси, систему охолодження, перегрів охолоджуючої води	0.69	0.20	0.14
2	Тривалість періоду активної вегетації,	Вироблення обсягів біомаси	0.83	0.25	0.21
3	Теплозабезпеченість періоду активної вегетації,	Продуктивність (урожайність) енергетичних культур	0.71	0.25	0.18
4	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	Загроза виникнення посух	0.35	0.10	0.04
5	Кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, дні	Якість сировини для біопалива, логістику постачання біомаси та її зберігання	0.61	0.20	0.12
	Інтегральний індекс небезпеки HI^B			1.00	0.68

Встановлено що у середньостроковій перспективі інтегрований індекс кліматичної небезпеки для біоенергетики України, підвищиться порівняно з 2021-2040pp, та матиме *високий рівень кліматичної небезпеки* ($HI^c = 0,68$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8,5. Це свідчить про подальше посилення впливу кліматичних змін на умови вирощування енергетичних культур, формування біомаси та стабільність сировинної бази біоенергетики.

Одним із ключових чинників є збільшення тривалості періоду активної вегетації на 15–20 днів порівняно з базовим періодом 1991–2020 pp. З одного боку, це може створювати сприятливі умови для вирощування теплолюбних культур та підвищення біопродуктивності. Проте одночасно триваліший вегетаційний період супроводжуватиметься зростанням потреб рослин у волозі та підвищенням ризику теплового і водного стресу.

Суттєвим чинником небезпеки стане й подальше зростання теплозабезпеченості періоду активної вегетації на 200–400 °С, а також підвищення середньої максимальної температури повітря влітку приблизно на 1,2 °С. Особливо важливим є збільшення медіани температури на 1,7 °С та 95-го перцентиля майже на 2,8 °С, що свідчить про посилення екстремальної спеки та хвиль тепла. Такі умови можуть призводити до перегріву рослин, пришвидшеного виснаження запасів ґрунтової вологи, зниження врожайності енергетичних культур та погіршення якості біомаси.

Додатковий негативний вплив матиме зростання інтенсивності опадів. Зокрема, прогнозується збільшення кількості випадків сильних опадів (20 мм за добу і більше) на 26,4 %, а їхнього 95-го перцентиля — на 63 %. Це підвищуватиме ризик ерозії ґрунтів, підтоплення посівів, втрат урожаю, ускладнення збирання та транспортування біомаси.

Водночас очікується збільшення тривалості бездощових періодів на 1,0–5,0 днів. Як наслідок, їхня середня тривалість може перевищувати один місяць. Поєднання тривалих посух із періодами інтенсивних опадів формуватиме нестабільні умови зволоження, що підвищуватиме ризик деградації ґрунтів,

вtrat біопродуктивності та нестабільності забезпечення біоенергетики сировиною.

Таким чином, підвищення інтегрального індексу кліматичної небезпеки у середньостроковій перспективі зумовлене посиленням температурних екстремумів, зростанням посушливості, зміною режиму опадів та підвищенням кліматичної нестабільності, що створюватиме дедалі більші ризики для розвитку біоенергетики України.

Результати оцінки інтегрованого індексу експозиції для біоенергетики, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.37.

Таблиця 5.37– Оцінка експозиції для біоенергетики у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки $H^T i$	Вплив	Нормалізоване значення $H^T i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^T_{hi}^*$	Внесок у індекс $H^T i \times w^T_{hi}$
	Забезпеченість ресурсами	Надійніть функціонування підприємства	0.7	0.4	0,28
1	Виробнича потужність	Посилення енергетичної незалежності (особливо в умовах енергетичних криз)	0,50	0.3	0.15
2	Економічна ефективність	Відновлюваність ресурсів,, скорочення викидів парникових газів, переробка відходів, розвиток сільської економіки	0.70	0.3	0.21
	Інтегральний індекс експозиції EF^T			1,00	0,64

*за експертною оцінкою авторів

У середньостроковій перспективі *рівень експозиції* біоенергетики України може зрости за рахунок збільшення внеску екологічної безпеки та виробничої потужності, порівняно з 2021-2040рр. і матиме високий рівень ($EF^c = 0,64$) до зміни клімату за реалізації сценарію РТК8.5. Це пов'язано з

очікуваним розширенням ролі біоенергетики в енергетичному балансі країни, зростанням виробничих потужностей галузі та підвищенням значення екологічної безпеки у процесах енергетичного переходу.

Збільшення внеску біоенергетики у виробництво енергії означатиме розширення площ вирощування енергетичних культур, зростання обсягів заготівлі та транспортування біомаси, а також збільшення кількості об'єктів, діяльність яких безпосередньо залежить від кліматичних умов. Унаслідок цього підвищуватиметься залежність галузі від температурного режиму, режиму опадів, посушливості та повторюваності екстремальних погодних явищ.

Високий рівень експозиції також зумовлений посиленням ролі екологічної безпеки. Умови декарбонізації економіки та необхідність скорочення викидів парникових газів стимулюватимуть активніший розвиток біоенергетики як відновлюваного джерела енергії. Це призведе до зростання значення стабільного забезпечення біомасою та підвищить залежність галузі від стану природних ресурсів і агрокліматичних умов.

Крім того, очікуване загострення конкуренції за земельні та водні ресурси між біоенергетикою, аграрним сектором, продовольчим виробництвом та природоохоронними потребами може додатково посилювати експозицію галузі до кліматичних змін. Таким чином, поєднання зростання виробничих потужностей, підвищення ролі біоенергетики у забезпеченні екологічної безпеки та значної залежності від природно-кліматичних умов формуватиме високий рівень експозиції галузі до зміни клімату у середньостроковій перспективі

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпечності і експозиції чутливості і адаптаційної спроможності дозволяють оцінити індекс кліматичного ризику для біоенергетики України у середньостроковій перспективі. Його величина до середини століття збільшиться, порівняно з

2021-2040 рр, ($R^c = 0,65$) і матиме *високий рівень впливу* на біоенергетику України за реалізації сценарію РТК8.5.

Підвищення рівня ризику зумовлене насамперед посиленням кліматичної небезпеки, пов'язаної зі зростанням температури повітря, збільшенням тривалості посушливих періодів, підвищенням інтенсивності опадів та частоти екстремальних погодних явищ. Такі зміни безпосередньо впливатимуть на врожайність енергетичних культур, стабільність формування біомаси та ефективність функціонування біоенергетичних систем.

Додатковим чинником формування високого ризику є значна чутливість біоенергетики до агрокліматичних умов, оскільки галузь тісно пов'язана із сільськогосподарським виробництвом і залежить від стабільності забезпечення біомасою. Одночасно очікується зростання експозиції галузі через розширення виробничих потужностей, збільшення ролі біоенергетики у забезпеченні енергетичної та екологічної безпеки, а також посилення конкуренції за земельні та водні ресурси.

Водночас існуюча адаптаційна спроможність галузі залишається лише помірною і поки недостатньою для повної компенсації негативного впливу кліматичних змін. Незважаючи на наявність інноваційних технологій та значного потенціалу біоресурсів, біоенергетика потребує подальшої модернізації інфраструктури, розвитку систем управління ризиками та ширшого впровадження адаптаційних заходів.

Таким чином, високий рівень кліматичного ризику для біоенергетики України у середньостроковій перспективі є результатом поєднання посилення кліматичних загроз, високої чутливості галузі та недостатньої адаптаційної спроможності в умовах зростаючої залежності від природно-кліматичних ресурсів.

Отже, отримані результати оцінювання свідчать про необхідність подальшого впровадження адаптаційних заходів у секторі біоенергетики,

спрямованих на підвищення стійкості сировинної бази, оптимізацію використання водних ресурсів, розвиток кліматично стійких технологій вирощування енергетичних культур та врахування кліматичних ризиків у стратегічному плануванні розвитку галузі..

5.7.3 Пріоритетні напрямки адаптації біоенергетики до зміни клімату.

Пріоритетні напрямки адаптації біоенергетики до зміни клімату спрямовані на зменшення вразливості виробництва біомаси, переробки та споживання біоенергії до впливів зміни клімату, зокрема посух, хвиль тепла, інтенсивності іповторюваності опадів, біотичних загроз та конкуренції за ресурси. Біоенергетика залежить як від сільського господарства, так і від лісових ресурсів, тож її адаптація має міжсекторальний характер.

Основними пріоритетними напрямками адаптації біоенергетики до зміни клімату можуть бути:

1. Адаптація виробництва біомаси (сільське господарство і лісозаготівля):
 - вибір стійких до клімату енергетичних культур (посухо- та жаростійких сортів);
 - зміна агротехнічних практик: мульчування, мінімальний обробіток ґрунту, агролісівництво;
 - оптимізація строків посіву та збирання урожаю залежно від нових кліматичних умов;
 - зрошення з урахуванням водної ефективності, особливо в регіонах з ризиком посух.
2. Стійкість лісової біомаси:
 - моніторинг впливу клімату на лісові ресурси, врахування ризику лісових пожеж, шкідників, буреломів;
 - зміна підходів до лісоуправління — перехід до мішаних, різновікових стійкіших лісів;

- заготівля біомаси із зони санітарних рубок (наприклад, після буревіїв чи пошкодження шкідниками).

3. Стійкість переробних потужностей і технологій:

- підвищення ефективності біоенергетичних установок в умовах хвиль тепла, спеки (тепловідведення, вентиляція);

- підготовка інфраструктури до екстремальних погодних умов — захист від підтоплень, злив, вітру;

- забезпечення резервного зберігання сировини в умовах коливання врожаїв (силоси, склади з контролем вологості).

4. Надійність логістики та зберігання біомаси:

- підготовка транспортної інфраструктури до змін погоди (затори через паводки, танення снігу, спека);

- удосконалення системи зберігання: вентиляція, захист від перегріву і зволоження, протипожежні заходи.

5. Управління ризиками кліматичних коливань:

- використання кліматичних сценаріїв для прогнозування врожаїв і доступності біомаси;

- страхування ризиків у біоенергетичному виробництві (наприклад, втрат урожаю або збитків від пожеж);

- резервне планування постачання з альтернативних регіонів чи джерел.

6. Адаптація сировинної бази:

- диверсифікація джерел біомаси: агровідходи, харчові та деревні залишки, органічні відходи;

- підвищення ефективності переробки органічних відходів для біогазу, пелет, біовугілля тощо.

7. Інтеграція біоенергетики в адаптивну енергосистему:

- гнучка робота біоТЕЦ у поєднанні з ВДЕ та зберіганням енергії;

- використання біоенергетики як резервного або стабілізаційного джерела в періоди нестабільності інших джерел.

8. Політична і нормативна підтримка адаптації:

- розробка державних стратегій адаптації біоенергетики з урахуванням регіональних ризиків;
- інтеграція біоенергетики в кліматичні, аграрні та лісові політики адаптації;
- фінансові стимули на впровадження адаптивних практик (субсидії, пільгові кредити, премії за сталу біомасу).

9. Розвиток людського капіталу і знань:

- навчання фермерів, лісівників і операторів біоенергетичних установок кліматично сталому управлінню;
- обмін найкращими практиками між регіонами, громадами та секторами.

.5.8 Видобуток і транспортування викопного палива

Видобуток і транспортування викопного палива є важливою складовою енергетичного сектору та охоплює комплекс технологічних, економічних і логістичних процесів, пов'язаних із забезпеченням суспільства паливно-енергетичними ресурсами⁹⁶. До основних видів викопного палива належать нафта, природний газ, кам'яне і буре вугілля, а також горючі сланці. Основними кліматичними загрозами, що можуть впливати на безпеку та ефективність видобутку і транспортування викопного палива слід вважати повені, сильні опади, зміни режиму опадів та екстремальних погодних явищ, а також посухи, різке зменшення кількості опадів (рис.5.7).

Під їхнім впливом безпосередньо перебувають розвідка родовищ (геологічне вивчення, буріння свердловин); видобування корисних копалин (шахтним, кар'єрним, свердловинним способом), первинна обробка (очищення, сепарація, зберігання), а також всі етапи доставки сировини від

⁹⁶ [Міністерство енергетики України](#). (n.d.). *Паливно-енергетичний комплекс України*. Retrieved May 15, 2026, from [Міненерго України](#)

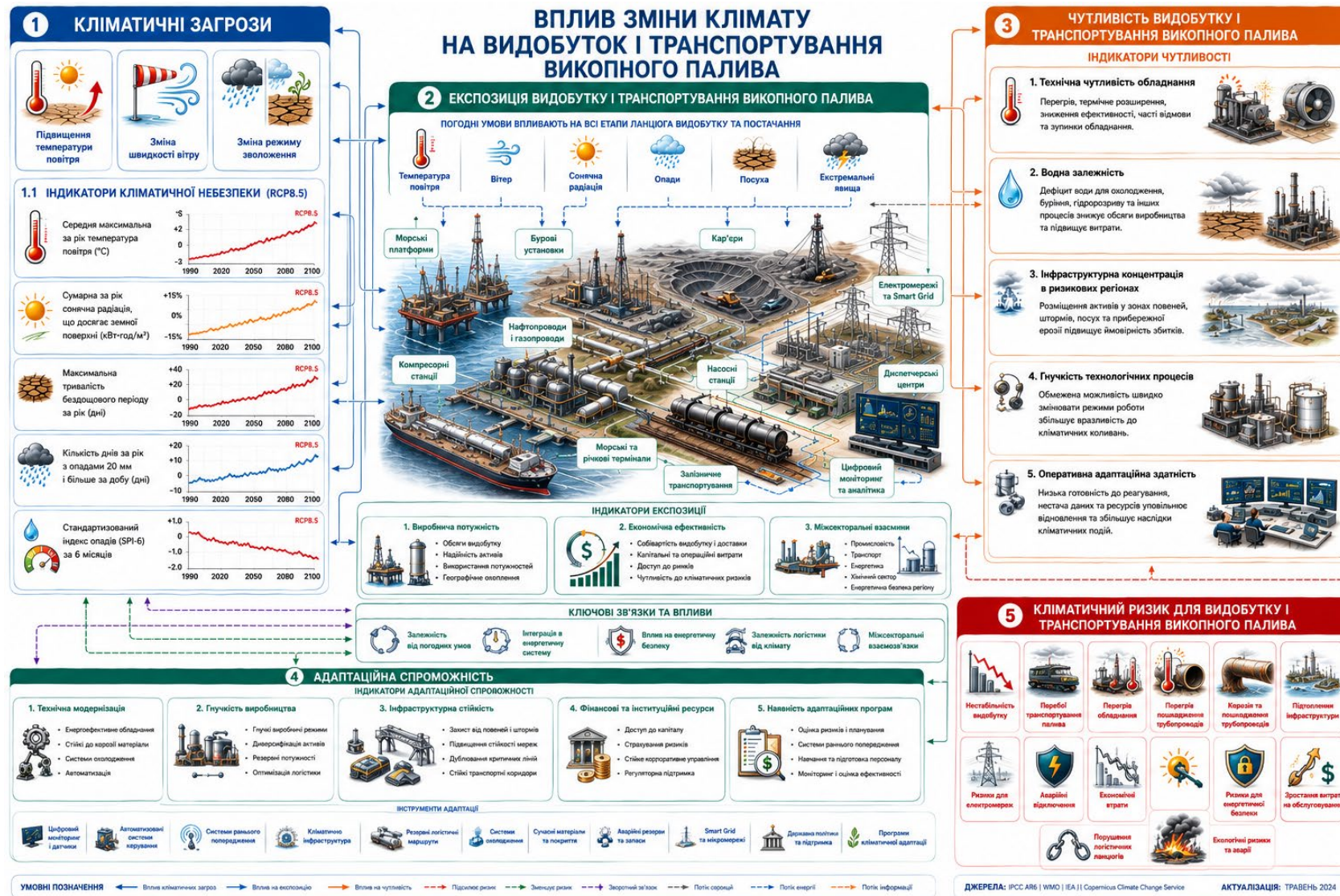


Рис.5.7 Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу у видобутку і транспортуванні викопного палива

місця видобутку до споживача або підприємства переробки, нафтопроводи і газопроводи, залізничний і автомобільний транспорт.

Основними факторами чутливості є наявність води для охолодження, зневоднення шахт і промислових процесів, інфраструктурна концентрація видобутку в ризикових регіонах (рис.5.7).

Факторами перебування під дією (експозицією) є забезпеченість ресурсами, ефективність функціонування виробництва.

Щоб запобігти подальшим ризикам основними факторами здатності до адаптації слід вважати забезпечення технічної модернізації, гнучкість виробництва, інфраструктурної стійкості (рис.5.7).

5.8.1 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі. Оцінка індексу небезпеки. Основними кліматичними загрозами для видобутку і транспортуванні викопного палива є загроза повеней, сильних опадів та зміна режиму опадів або температури.

Для оцінки кліматичних загроз для біоенергетики використовували такі індикатори як середню максимальну за літо температуру повітря, сумарну за рік сонячну радіацію, що досягає земної поверхні, Вт/м², максимальну тривалість бездощового періоду за рік, кількість днів за рік з опадами 1мм і більше за добу, кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, величину середньодобового за літо річкового стоку.

Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі представлено у таблиці 5.38.

Таблиця 5.38 – Оцінка кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^{BP}_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^{BP}_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^{BP}_{hi}^*$	Внесок у індекс $H^{BP}_i \times w^{BP}_{hi}$
1	Середня максимальна за	Збільшення витрат на видобування нафти	0.18	0.2	0.036

	рік температура повітря, °C	чи газу за рахунок потреб у значних об'ємах води для буріння та приготування бурового розчину			
2	Сумарна за рік сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	Збільшення витрат на видобування вугілля за рахунок зменшення об'ємів води, доступної для кондиціонування та роботи шахти або кар'єру.	0,56	0,2	0.11
3	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	Загроза виникнення посух	0,36	0,2	0,07
4	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Зниження якості вугілля за рахунок підвищення вологості (при відкритому видобутку).	0,12	0,1	0,012
5	Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців	Загроза виникнення повеней	0.67	0.2	0.13
	Інтегральний індекс небезпеки НИ^{ВП}			1,00	0,36

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз внеску індикаторів кліматичної небезпеки в Інтегральний індекс небезпеки **НИ^{ВП}** показав, що найбільш небезпечними для видобутку і транспортування викопного палива в короткостроковій перспективі є збільшення кількості днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу, що створюють загрозу повеней, сильних опадів (Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців) та максимальна тривалість бездощового періоду за рік, що призводить до виникнення посух).

Кліматичні загрози, такі як зміна кількості опадів, посухи, повені мають вплив на видобуток і транспортування викопного палива внаслідок зниження якості вугілля за рахунок підвищення вологості (при відкритому видобутку). підвищення доступності вугілля внаслідок зниження ризику пожеж. Зниження

обсягів видобутку (якщо повені впливають на споруди шахт або кар'єрів) або доступності (якщо повені впливають на транспорт).

Збільшення витрат на видобування вугілля за рахунок зменшення об'ємів води, доступної для кондиціонування та роботи шахти або кар'єру. Більш висока ймовірність займання вугільних пластів, пожеж на нафтогазовидобувних об'єктах. Збільшення витрат на видобування нафти чи газу за рахунок потреб у значних об'ємах води для буріння та приготування бурового розчину.

Отримане значення Інтегрального індексу кліматичної небезпеки ($H^{BPT} = 0,36$) свідчить що у короткостроковій перспективі за реалізації сценарію РТК8.5 видобуток і транспортування викопного палива України *матимуть низький рівень кліматичної небезпеки*. Це пояснюється тим, що у період до 2040 року прогнозовані кліматичні зміни ще не створюватимуть системного або критичного впливу на функціонування більшості об'єктів паливно-енергетичної інфраструктури.

Низький рівень небезпеки зумовлений насамперед відносно високою технічною стійкістю галузі до помірних змін температурного режиму та опадів. Значна частина інфраструктури видобутку, зберігання і транспортування викопного палива проєктувалася з урахуванням широкого спектра погодних умов, характерних для території України, що частково знижує чутливість до короткострокових кліматичних змін.

Крім того, у короткостроковій перспективі очікувані зміни клімату матимуть переважно поступовий характер. Хоча прогнозується підвищення температури повітря, зростання повторюваності сильних опадів, посух чи хвиль спеки, їхній вплив на процеси видобутку та транспортування палива поки що не буде настільки значним, щоб спричинити масштабні порушення функціонування галузі.

Важливим чинником є і те, що значна частина об'єктів паливної інфраструктури має локалізований характер і менш залежить від безпосереднього впливу кліматичних умов, ніж, наприклад, аграрний сектор чи відновлювана енергетика. Основні ризики для галузі у короткостроковій

перспективі пов'язані переважно з окремими екстремальними погодними явищами — підтопленнями, сильними опадами, зсувами чи перегрівом обладнання, однак їхній вплив поки оцінюється як обмежений.

Таким чином, низький рівень кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива пояснюється поєднанням відносно повільних темпів кліматичних змін у короткостроковій перспективі, технічної стійкості інфраструктури та меншої прямої залежності галузі від кліматичних умов порівняно з іншими секторами енергетики

Оцінка індексу експозиції. Індикаторами, які характеризують перебування об'єктів видобутку і транспортування викопного палива під дією кліматичних загроз, можуть виступати виробничі потужності, економічна ефективність екологічна безпека (табл.5.39).

Проведена оцінка індикаторів експозиції для видобутку і транспортування викопного палива, показала, що основний внесок в інтегрований індикатор експозиції є економічна ефективність зокрема обсягу інвестицій у підгалузь, експорту/імпорту сировини, вартості транспортування на одиницю палива, частки галузі у ВВП країни з урахуванням впливу зміни кліматичних чинників у короткостроковій перспективі (табл.5.40).

Таблиця 5.40 – Оцінка експозиції для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^{BP}_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^{BP}_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^{BP}_{ei} *$	Внесок у індекс $E^{BP}_i \times w^{BP}_{si}$
1	Виробнича потужність	Посилення енергетичної незалежності	0,50	0.3	0.15
2	Економічна ефективність	Обсягу інвестицій у підгалузь, експорту/імпорту у сировини, вартості транспортування на одиницю палива,, долі	0.85	0.4	0.34

		галузі у ВВП країни			
3	Екологічна безпека	Дотримання нормативів забруднення атмосферного повітря, водних та ґрунтових ресурсів	0.75	0.3	0.23
	Інтегральний індекс експозиції EI^{BII}			1,00	0,72

*за експертною оцінкою авторів

Встановлено, що інтегральний індекс експозиції з видобутку і транспортування викопного палива *має значний рівень експозиції* ($EI^{BII} = 0,72$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 до 2040 року. Це зумовлено значною просторовою поширеністю паливно-енергетичної інфраструктури та її розташуванням у регіонах, які зазнаватимуть впливу підвищення температури повітря, посух, сильних опадів, підтоплень і інших небезпечних гідрометеорологічних явищ.

Високий рівень експозиції пов'язаний із тим, що система видобутку, зберігання та транспортування викопного палива охоплює великі території України і включає розгалужену мережу трубопроводів, компресорних станцій, нафтобаз, шахт, кар'єрів та інших об'єктів, значна частина яких безпосередньо контактує з природним середовищем. Унаслідок цього навіть локальні кліматичні зміни або екстремальні погодні явища можуть впливати на функціонування окремих елементів системи та створювати ризики порушення логістики постачання палива.

Додатковим чинником високої експозиції є залежність галузі від стабільності транспортної та енергетичної інфраструктури. Сильні опади, підтоплення, зсуви, перегрів обладнання чи пожежонебезпечні умови можуть ускладнювати видобуток, транспортування та зберігання палива, особливо в умовах старіння інфраструктури та підвищеного техногенного навантаження.

Водночас високий рівень експозиції не означає автоматично критичний рівень кліматичного ризику. Експозиція характеризує насамперед ступінь

контакту галузі з кліматичними впливами. Частина негативних наслідків може бути зменшена завдяки технічній стійкості інфраструктури, системам моніторингу та можливостям адаптації. Проте значна територіальна протяжність і складність паливно-енергетичної системи зумовлюють її високий рівень експозиції до зміни клімату.

Оцінка індексу чутливості. Продуктивність і стабільність роботи з видобутку і транспортування викопного палива значно залежать від впливу кліматичних чинників, зокрема, кліматичних тенденції в регіоні, температури та опадів, які безпосередньо впливають на обсяги видобутку та траспортування, зокрема підвищена вологість призводить до зниження ефективності згоряння видобутого палива.

Основними індикаторами чутливості можуть бути залежність від клімату у видобутку вугілля та газу, зокрема від наявності води для охолодження, зневоднення шахт і промислових процесів, інфраструктурної концентрації видобутку в ризикових регіонах.

Оцінку внеску цих індикаторів у Інтегральний індекс чутливості S^c представлено в табл.5.40.

Таблиця 5.40 – Оцінка чутливості з видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^{BP}_i	Вплив	Нормалізоване значення S^{BP}_i *	Ваговий коефіцієнт w^{BP}_{si} *	Внесок у індекс $S^{BP}_i \times w^{BP}_{si}$
1	Технічна чутливість обладнання	Багато шахт і видобувних об'єктів є застарілими та фізично зношеними.	0,9	0,30	0.21
2	Водна залежність	Видобуток вугілля та газу значною мірою залежить від наявності води для охолодження, зневоднення шахт і промислових процесів.	0.7	0,20	0.14

3	Інфраструктурна концентрація в ризикових регіонах	Значна частина шахт і свердловин розташована на Донбасі, у зонах високої бойової та кліматичної небезпеки.	0.85	0,20	0.17
4	Гнучкість технологічних процесів	Видобуток має низьку гнучкість: неможливо оперативно змінити технологію або перемістити об'єкти	0.6	0,15	0.09
5	Оперативна адаптаційна здатність	Більшість компаній у галузі не мають достатніх резервів чи планів на випадок кліматичних криз	0.3	0,15	0.045
Інтегральний індекс чутливості S^{BIIc}				1,00	0.66

*за експертною оцінкою авторів

Проведений аналіз показав, що інтегральний індекс чутливості з видобутку і транспортування викопного палива має високий рівень ($SI^{BII} = 0,66$) до зміни клімату. Високий рівень чутливості пов'язаний із тим, що процеси видобутку, зберігання та транспортування викопного палива значною мірою залежать від температурного режиму, стану ґрунтів, водного режиму територій та повторюваності небезпечних погодних явищ. Підвищення температури повітря, хвилі спеки, сильні опади, підтоплення, зсуви чи посухи можуть негативно впливати на роботу трубопроводів, компресорних станцій, шахт, бурових установок та іншої інфраструктури.

Додатковим чинником високої чутливості є значний ступінь зношеності частини паливно-енергетичної інфраструктури України. Старіння обладнання та недостатні темпи модернізації підвищують ризик аварій, витоків палива, порушення герметичності систем і перебоїв у транспортуванні за несприятливих кліматичних умов.

Висока чутливість також пояснюється тим, що навіть короточасні порушення у роботі систем транспортування або видобутку можуть мати масштабні наслідки для енергетичної безпеки та функціонування інших секторів економіки. Таким чином, поєднання кліматичної залежності, складної

інфраструктури та високих вимог до безперервності роботи зумовлює високий рівень чутливості галузі до зміни клімату

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Основною метою адаптації видобутку і транспортування викопного палива до зміни клімату є забезпечення технічної модернізації, гнучкості виробництва, інфраструктурної стійкості.

Проведений аналіз внеску індикаторів адаптаційної спроможності для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі представлено в табл.5.41.

Таблиця 5.41 – Оцінка адаптаційної спроможності для видобутку і транспортування викопного палива у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^{BII}_i	Пояснення	Нормалізоване значення $AC^{BII}_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^{BII}_{si} *$	Внесок у індекс $AC^{BII}_i \times w^{BII}_{si}$
1	Технічна модернізація	Більшість шахт і свердловин застарілі, інвестиції в оновлення обмежені.	0.5	0,25	0.125
2	Гнучкість виробництва	Видобувні об'єкти не можуть оперативно змінювати місце або технологію.	0.45	0,20	0.09
3	Інфраструктурна стійкість	Висока концентрація об'єктів у зонах бойових дій та кліматичних ризиків.	0.5	0,20	0.1
4	Фінансові та інституційні ресурси	Брак фінансування для адаптаційних заходів, вугледобувна галузь поступово скорочується.	0.5	0,20	0.1
5	Наявність адаптаційних програм	Декларовані стратегії є, але їх імплементація недостатня.	0.2	0,15	0.03
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACI^{BII}				1,00	0.46

Встановлені інтегровані індекси чутливості та адаптаційної спроможності дозволяють оцінити *інтегральний індекс вразливості V^c* щодо

видобутку і транспортування викопного палива. Його величина становить 0.55 і свідчить про те що видобуток і транспортування викопного палива в Україні мають *помірний рівень* вразливості до зміни клімату.

Такий рівень вразливості пояснюється поєднанням високої чутливості інфраструктури до кліматичних впливів та наявністю певних можливостей для адаптації. З одного боку, об'єкти видобутку, зберігання й транспортування викопного палива є чутливими до підвищення температури повітря, сильних опадів, підтоплень, посух та інших небезпечних гідрометеорологічних явищ, які можуть порушувати роботу обладнання, транспортних систем і логістичних ланцюгів.

З іншого боку, рівень вразливості не оцінюється як високий, оскільки галузь має певний адаптаційний потенціал. Значна частина інфраструктури проєктувалася з урахуванням складних природних умов, а наявність систем моніторингу, технічного контролю, резервування та можливостей модернізації частково знижує негативний вплив кліматичних чинників. Крім того, підприємства паливно-енергетичного сектору мають досвід функціонування в умовах значної погодної мінливості та техногенних навантажень.

Таким чином, помірний рівень вразливості свідчить про те, що видобуток і транспортування викопного палива в Україні вже зазнають впливу кліматичних змін і залишаються чутливими до них, проте наявні технічні й організаційні можливості поки дозволяють частково компенсувати негативні наслідки та підтримувати функціонування галузі.

На основі інтегрованих індексів кліматичної небезпеки, експозиції та вразливості було визначено інтегральний індекс кліматичного ризику для видобутку і транспортування викопного палива в Україні. Його значення становить $R = 0,56$, що відповідає помірному рівню впливу зміни клімату на галузь у короткостроковій перспективі за сценарієм RCP8.5.

Такий рівень ризику пояснюється поєднанням низького рівня кліматичної небезпеки з високими показниками експозиції та чутливості галузі. З одного боку, у період до 2040 року прогнозовані кліматичні зміни ще не матимуть

критичного характеру для більшості об'єктів паливно-енергетичної інфраструктури. З іншого боку, значна територіальна поширеність систем видобутку й транспортування палива, висока залежність від стабільності інфраструктури та чутливість до екстремальних погодних явищ підвищують загальний рівень кліматичного ризику.

Водночас ризик не оцінюється як високий, оскільки галузь має певний адаптаційний потенціал — технічну стійкість інфраструктури, системи моніторингу та можливості модернізації, які дозволяють частково знижувати негативний вплив кліматичних чинників. Таким чином, помірний рівень кліматичного ризику свідчить про необхідність подальшого підвищення кліматичної стійкості систем видобутку й транспортування викопного палива, особливо в умовах очікуваного посилення кліматичних змін у майбутньому.

5.8.2 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для видобутку і транспортування викопного палива у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для видобутку і транспортування викопного палива у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності видобутку і транспортування викопного палива залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу, з огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову (2041-2060 рр.) перспективу.

Результати оцінки інтегрованого індексу кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива, зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.42.

Таблиця 5.42 . Оцінка кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^{BP}_i	Вплив	Нормалізоване значення H^{BP}_i *	Ваговий коефіцієнт w^{BP}_{hi} *	Внесок у індекс $H^{BP}_i \times w^{BP}_{hi}$
---	--------------------------------	-------	-------------------------------------	------------------------------------	---

1	Середня максимальна за рік температура повітря, °С	Збільшення витрат на видобування нафти чи газу за рахунок потреб у значних об'ємах води для буріння та приготування бурового розчину	0.82	0.2	0.13
2	Середня максимальна температура найтеплішого місяця	Ймовірність займання вугільних пластів, пожеж на нафтогазовидобувних об'єктах	0.57	0.1	0.057
3	Сумарна за рік сонячна радіація що досягає земної поверхні, Вт/м ²	Збільшення витрат на видобування вугілля за рахунок зменшення об'ємів води, доступної для кондиціонування та роботи шахти або кар'єру.	0.45	0,2	0.09
4	Максимальна тривалість бездощового періоду за рік, дні	Загроза виникнення посух	0.35	0,2	0,07
5	Кількість днів за рік з опадами 20 мм і більше за добу	Зниження якості вугілля за рахунок підвищення вологості (при відкритому видобутку).	0.09	0,1	0,009
6	Стандартизований індекс опадів (SPI-6) за 6 місяців	Загроза виникнення повеней	0.63	0.2	0.13
	Інтегральний індекс небезпеки НІ^{ВП}			1,00	0,49

*за експертною оцінкою авторів

Встановлено, що у середньостроковій перспективі інтегральний індекс кліматичної небезпеки для видобутку і транспортування викопного палива в Україні зростатиме порівняно з періодом 2021–2040 рр., проте й надалі відповідатиме помірному рівню кліматичної небезпеки ($НІ^{ВП} = 0,49$) за сценарієм RCP8.5. Це свідчить про поступове посилення впливу кліматичних змін на паливно-енергетичну інфраструктуру, однак без формування критичних загроз для функціонування галузі у масштабах країни.

Основними чинниками формування кліматичної небезпеки є очікуване зростання інтенсивності опадів, зокрема збільшення кількості випадків сильних опадів (20 мм за добу і більше) на 22,5 %, а їхнього 95-го процентиля — на 42 %. Такі явища можуть підвищувати ризик підтоплення об'єктів інфраструктури, ерозії ґрунтів, пошкодження транспортних шляхів, трубопроводів та порушення логістичних процесів.

Додатковим негативним чинником стане збільшення тривалості бездощових періодів на 0,5–3,5 дня, внаслідок чого їхня середня тривалість може перевищувати один місяць. Це сприятиме посиленню посушливості, підвищенню пожежної небезпеки та збільшенню ризиків перегріву обладнання, особливо у районах видобутку, зберігання та транспортування палива.

Важливу роль також відіграватиме підвищення середньої максимальної температури повітря протягом року та зростання максимальної температури найтеплішого місяця. Такі зміни можуть негативно впливати на технічний стан інфраструктури, прискорювати зношення обладнання, підвищувати навантаження на системи охолодження та збільшувати ризик аварійних ситуацій.

Разом із тим рівень кліматичної небезпеки оцінюється як помірний, а не високий, оскільки значна частина об'єктів видобутку й транспортування викопного палива має певний запас технічної стійкості та здатна функціонувати в умовах широкого діапазону погодних умов. Крім того, очікувані кліматичні зміни у середньостроковій перспективі матимуть переважно поступовий характер, що створює можливості для адаптації інфраструктури та впровадження заходів підвищення її кліматичної стійкості.

Результати *оцінки інтегрованого індексу експозиції* для видобутку і транспортування викопного палива зумовленою зміною клімату у середньостроковій перспективі представлено у табл.5.43.

Таблиця 5.43 – Оцінка індикаторів експозиції для видобутку і транспортування викопного палива у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^T_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^T_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^T_{ei} *$	Внесок у індекс $E^T_i \times w^T_{si}$
1	Виробнича потужність	Посилення енергетичної незалежності	0,5	0.3	0.15
2	Економічна ефективність	Зменшення витрат на придбання палив на зовнішніх ринках	0.7	0.4	0.28
3	Екологічна безпека	Дотримання нормативів забруднення атмосферного повітря, водних та ґрунтових ресурсів	0.8	0.3	0.24
Інтегральний індекс експозиції EI^T				1,00	0,67

У середньостроковій перспективі рівень експозиції видобутку і транспортування викопного палива до зміни клімату зростатиме та відповідатиме високому рівню ($EI^{вп} = 0,67$) за сценарієм RCP8.5. Це пов'язано з посиленням ролі паливно-енергетичної інфраструктури у забезпеченні енергетичної стабільності країни в умовах трансформації енергетичного сектору та необхідності підтримання резервних і балансуючих потужностей.

Зростання експозиції зумовлюватиметься також підвищенням значення екологічної безпеки та посиленням вимог до екологічного контролю за процесами видобутку, зберігання і транспортування викопного палива. Умови зміни клімату можуть підвищувати ризики техногенних аварій, витоків палива, забруднення ґрунтів і водних ресурсів, особливо під час екстремальних погодних явищ. Унаслідок цього зростатиме необхідність забезпечення стійкості інфраструктури до кліматичних впливів.

Додатковим чинником є поступове збільшення виробничого навантаження на окремі елементи паливно-енергетичної системи, що підвищуватиме залежність галузі від стабільної роботи інфраструктури в

умовах посилення температурних екстремумів, посушливості та небезпечних гідрометеорологічних явищ. У сукупності це сприятиме подальшому зростанню рівня експозиції галузі до зміни клімату у середньостроковій перспективі.

Отримані значення інтегрованих індексів кліматичної небезпеки та експозиції, за умови відсутності суттєвих змін рівня чутливості й адаптаційної спроможності, дозволили оцінити інтегральний індекс кліматичного ризику для видобутку і транспортування викопного палива в Україні у середньостроковій перспективі. Встановлено, що до середини XXI століття величина кліматичного ризику дещо зростатиме порівняно з періодом 2021–2040 рр. і становитиме $R^{вп} = 0,547$, що відповідає помірному рівню впливу зміни клімату на галузь за сценарієм RCP8.5.

Зростання ризику зумовлене насамперед посиленням кліматичної небезпеки та підвищенням рівня експозиції інфраструктури до впливу екстремальних погодних явищ, підвищення температури повітря, посушливості та інтенсивних опадів. Водночас рівень ризику залишається помірним, оскільки очікувані кліматичні зміни ще не створюватимуть критичних умов для функціонування більшості об'єктів видобутку і транспортування викопного палива.

Крім того, галузь зберігатиме певний адаптаційний потенціал завдяки технічній стійкості інфраструктури, можливостям модернізації, системам контролю та накопиченому досвіду експлуатації у складних природних умовах. Це дозволить частково компенсувати негативний вплив кліматичних чинників і стримувати перехід кліматичного ризику до високого рівня.

5.8.3 Пріоритетні напрямки адаптації видобутку і транспортування викопного палива до зміни клімату . На тлі глобальної стратегії декарбонізації та відходу від викопного палива, адаптація видобутку та транспортування до зміни клімату є, перш за все, коротко- та середньостроковим пріоритетом для забезпечення енергетичної безпеки в

перехідний період. З огляду на амбіції України щодо євроінтеграції та досягнення кліматичних цілей, довгострокова стратегія передбачає поступову відмову від цих видів палива. Однак, поки викопне паливо відіграє значну роль в енергетичному балансі, необхідно забезпечити стійкість його інфраструктури до зростаючих кліматичних ризиків.

Пріоритетними напрямками адаптації видобутку та транспортування викопного палива до зміни клімату є:

1. Оцінка ризиків та вразливості:

– проведення поглиблених досліджень та моделювання впливу прогнозованих кліматичних змін (збільшення частоти та інтенсивності екстремальних опадів, паводків, аномальних температур, посух, підвищення рівня моря) на існуючу та плановану інфраструктуру видобутку (шахти, свердловини, платформи) та транспортування (трубопроводи, залізничні колії, порти, нафто- та газосховища);

– ідентифікація найбільш вразливих ділянок інфраструктури, що знаходяться під загрозою (наприклад, трубопроводи, що проходять через зони активного танення вічної мерзлоти, або прибережні термінали, що знаходяться під загрозою штормових нагонів) та їхнє картографування.

2. Посилення інфраструктури до небезпек передбачає її фізичне зміцнення та розвиток моніторингу і ранніх систем попередження про небезпечні явища погоди.

Фізичне зміцнення інфраструктури включає:

– захист від повеней -будівництво або зміцнення дамб, бар'єрів, дренажних систем навколо об'єктів (шахт, нафтопереробних заводів, сховищ), підвищення рівня розташування критичного обладнання;

– стійкість до вітру та штормів - посилення конструкцій видобувних платформ, НПЗ, систем кріплення трубопроводів та ліній електропередачі, що живлять об'єкти;

- термічна стійкість -використання матеріалів, що витримують екстремальні температури (як спеку, так і сильні морози), та впровадження систем охолодження/обігріву для чутливого обладнання;

- боротьба з ерозією - захист ділянок трубопроводів, що проходять через схили або річкові долини, від посилення ерозії ґрунту внаслідок інтенсивних опадів.

Моніторинг та раннє попередження передбачають впровадження сучасних систем моніторингу стану інфраструктури (датчики тиску, температури, вібрації, супутниковий моніторинг) та систем раннього попередження про наближення екстремальних погодних явищ для оперативного реагування.

3. Управління викидами метану та безпека передбачають зниження викидів метану та запобігання техногенним аваріям.

Зниження викидів метану хоча і є мітігаційним заходом, він також підвищує операційну стійкість. Зменшення витоків метану з трубопроводів, свердловин та шахтних вентиляційних систем не лише зменшує вплив на клімат, але й підвищує безпеку об'єктів та знижує втрати продукту. Це включає впровадження найкращих доступних технологій для виявлення та усунення витоків.

Зростання частоти екстремальних погодних явищ підвищує ризик техногенних аварій, спричинених природними явищами, таких як розливи нафти або вибухи газу внаслідок пошкодження інфраструктури штормами чи повеннями. Адаптаційні заходи мають включати підвищені стандарти безпеки та розробку планів реагування на такі події.

4. Операційна гнучкість та планування безперервності роботи:

- розробка планів реагування на надзвичайні ситуації. Створення та регулярне оновлення планів дій у разі пошкодження інфраструктури внаслідок екстремальних умов погоди, включаючи резервні маршрути транспортування, аварійні бригади, обладнання для ремонту;

– підвищення кваліфікації персоналу, зокрема, навчання працівників щодо ризиків зміни клімату та ефективних методів реагування на надзвичайні ситуації;

– диверсифікація маршрутів транспортування - по можливості, розгляд альтернативних маршрутів для транспортування викопного палива, щоб зменшити залежність від однієї вразливої ділянки.

5. Інтеграція кліматичних ризиків у бізнес-планування та інвестиції, зокрема, включення вартості потенційних кліматичних збитків та витрат на адаптацію в довгострокові бізнес-плани та інвестиційні рішення.

Важливо розуміти, що ці адаптаційні заходи є необхідними для забезпечення функціонування існуючої системи в умовах зміни клімату. Однак, згідно з глобальними та національними стратегіями, довгостроковий пріоритет полягає у поступовій відмові від викопного палива та переходу до відновлюваних джерел енергії, що є основним шляхом до декарбонізації та зменшення впливу на клімат.

5.9 Електромережі передачі та розподілу електроенергії

Зміна клімату, підвищення температури, збільшення повторюваності та інтенсивності екстремальних умов суттєво впливає на електромережі передачі та розподілу електроенергії, створюючи нові виклики для їхньої надійності, стійкості та ефективності (рис.5.9). Кліматичні загрози для електромереж мають різну природу — теплову, гідрологічну, вітрову та комбіновану. Незалежно від типу впливу їх спільними наслідками є зниження надійності функціонування електромереж, зростання витрат на



Рис. 5.9 - Схема причинно-наслідкових ланцюгів впливу зміни клімату на електромережі передачі та розподілу електроенергії

експлуатацію, обслуговування та відновлення інфраструктури, а також підвищення ризиків для населення і критичної інфраструктури⁹⁷ Висока температура повітря (спека) зумовлює перегрів ліній електропередачі та зниження їхньої пропускної здатності, пошкодження трансформаторів, комутаційного та електронного обладнання. Сильний вітер зумовлює падіння дерев, опор, обриви проводів та руйнування ліній і підстанцій, масові відключення, порушення зв'язку, дорогий ремонт. Повені, паводки, підйом рівня води приводять до затоплення трансформаторів, електрощитів, корозії обладнання, короткі замикання, виходу з ладу інфраструктури, небезпека ураження струмом, тривалі перебої.

5.9.1 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для електромереж у короткостроковій (2021 – 2040 рр.) перспективі. Оцінка індексу небезпеки. Кліматичними загрозами для електромереж є зміна температури повітря, швидкості вітру, вологості, режиму опадів. Результати оцінки індикаторів кліматичної небезпеки для електромереж у короткостроковій перспективі представлено у табл.5.44.

Таблиця 5.44 – Оцінка кліматичної небезпеки для електромереж у короткостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^m_i	Вплив	Нормалізоване значення H^m_i *	Ваговий коефіцієнт w^m_{hi} *	Внесок у індекс $H^m_i \times w^m_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	підвищена температура спричиняє зростання опору проводів, що знижує ефективність та підвищує втрати	0,50	0,3	0,15
2	Вологість повітря (%)	Впливає на ізоляцію, корозію,	0,6	0,10	0,06
3	Кількість днів за рік з опадами 10 мм і більше за добу	Підвищує ризик коротких замикань	0,12	0,15	0,02
4	Кількість днів за зиму з опадами	Високий ризик пошкоджень від	0,3	0,15	0,05

⁹⁷ [European Environment Agency](#). (n.d.). *Climate change impacts, risks and adaptation*. Retrieved May 15, 2026, from [EEA Climate Change Impacts](#)

	1мм і більше за добу, дні	обледеніння та налипання снігу			
5	Середня за рік швидкість вітру, м/с	Механічні навантаження на лінії	0,55	0,3	0,17
Інтегральний індекс небезпеки HI^m				1,00	0,45

У короткостроковій перспективі електромережі в Україні *матимуть* помірний рівень кліматичної небезпеки ($HI^m = 0,45$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5,

Це пов'язано з тим, що прогнозовані зміни клімату вже створюватимуть додаткові навантаження на енергетичну інфраструктуру, однак їхній вплив поки не матиме критичного характеру для функціонування енергосистеми в масштабах країни.

Одним із основних чинників небезпеки є підвищення температури повітря у літній період. За високих температур зростає нагрівання проводів і обладнання, що призводить до зменшення пропускної здатності ліній електропередач, збільшення втрат електроенергії та ризику перегріву окремих елементів мережі. Одночасно хвилі спеки супроводжуються підвищеним споживанням електроенергії, що створює додаткове навантаження на енергосистему.

Додаткову небезпеку становитиме зростання повторюваності сильних вітрів, інтенсивних опадів і підвищеної вологості. Такі погодні явища можуть спричиняти пошкодження ліній електропередач, обриви проводів, падіння опор і дерев на мережі, короткі замикання та порушення роботи підстанцій. Підвищена вологість і сильні опади також збільшують ризик корозії обладнання та аварійності електромереж.

Разом із тим рівень кліматичної небезпеки оцінено як помірний, оскільки значна частина електромереж розрахована на експлуатацію в умовах погодної мінливості, а енергосистема має можливості часткового резервування та перерозподілу навантаження у разі локальних пошкоджень..

Оцінка індексу експозиції. Вплив зміни клімату на стійкість електромереж полягає у підвищенні вразливості електричної інфраструктури до екстремальних погодних умов, а також у зменшенні здатності енергосистеми витримувати, адаптуватися й швидко відновлюватись після стихійних явищ погоди. Виробнича потужність електромереж як така (на відміну від генераційних потужностей) — це не кількість електроенергії, яку система виробляє, а здатність електромереж передавати і розподіляти електроенергію з мінімальними втратами, стабільно та безпечно. Тобто йдеться про пропускну спроможність та технічну ефективність мереж під впливом зовнішніх факторів, зокрема зміни клімату. міна клімату не тільки збільшує кількість аварій, але й зменшує технічну пропускну здатність мереж у критичні періоди, особливо влітку. Це знижує ефективну "виробничу потужність" мережі, навіть без фізичних пошкоджень.

Зміна клімату суттєво впливає і на економічну ефективність електромереж, зумовлюючи зростання витрат, зниження технічної ефективності, ризики перебоїв у постачанні та потребу в дорогій модернізації. Це стосується як мереж передачі (високовольтних), так і мереж розподілу (низько- та середньовольтних). Кліматичні зміни знижують економічну ефективність електромереж як через прямі фізичні пошкодження, так і через зростання експлуатаційних витрат, втрат потужності, потребу в адаптації та збитки від відключень. Без адаптаційних заходів — тарифне навантаження на економіку зростатиме.

Зміна клімату впливає на міжсекторальні взаємини в енергетиці, зокрема в роботі електромереж, через загострення конкуренції за ресурси, зміни в політиці, нові вимоги до планування інфраструктури та необхідність координації з іншими секторами (вода, транспорт, охорона здоров'я тощо).

У короткостроковій перспективі електромережі України мають високий рівень експозиції ($EI^M = 0,72$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 (табл.5.45), Це зумовлено значною просторовою поширеністю електромережевої інфраструктури та подальшим розвитком систем розподілу електроенергії, які

безпосередньо перебуватимуть під впливом кліматичних чинників і небезпечних погодних явищ..

Таблиця 5.45 – Оцінка експозиції для електромереж у короткостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^m_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^m_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^m_{ei}^*$	Внесок у індекс $E^m_i \times w^m_{si}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми: співвідношення довжин мереж передачі та розподілення	0,8	0,4	0,32
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,70	0,3	0,21
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за земельні ресурси з іншими секторами	0,60	0,3	0,18
Інтегральний індекс експозиції E^m				1,00	0,72

Одним із головних чинників високої експозиції є зростання частки розподільчих мереж, пов'язане з розвитком децентралізованої генерації та інтеграцією відновлюваних джерел енергії. Розширення мережевої інфраструктури збільшуватиме кількість об'єктів, вразливих до впливу сильного вітру, опадів, спеки, ожеледі та інших кліматичних факторів.

Водночас розвиток інноваційних технологій модернізації мереж — автоматизованих систем управління, цифрового моніторингу, «розумних» мереж та сучасних матеріалів — частково знижуватиме негативний вплив кліматичних змін і підвищуватиме стійкість енергосистеми. Проте у короткостроковій перспективі масштаби розширення та ускладнення мережевої інфраструктури переважатимуть адаптаційний ефект від модернізації.

Додатковим чинником високої експозиції може стати посилення конкуренції за земельні ресурси для прокладання нових розподільчих мереж та розміщення енергетичної інфраструктури. Це може обмежувати можливості вибору оптимальних і безпечних маршрутів прокладання мереж, особливо у густозаселених або господарсько освоєних регіонах.

Оцінка індексу чутливості. Чутливість електромереж до зміни клімату — це характеристика, яка визначає, наскільки сильно і яким чином енергетична інфраструктура (лінії, підстанції, обладнання) реагує на кліматичні зміни або екстремальні погодні події, незалежно від того, чи пристосована вона до них. У короткостроковій перспективі електромережі України матимуть високий рівень чутливості ($SI_m = 0,60$) до змін клімату за сценарієм РТК8.5 (табл.5.46), Це пов'язано з тим, що функціонування електромереж значною мірою залежить від погодних умов, а кліматичні зміни можуть безпосередньо впливати на надійність та стабільність їхньої роботи..

Таблиця 5.46 – Оцінка чутливості електромереж до зміни клімату у короткостроковій перспективі

№	Індикатор чутливості S^m_i	Вплив	Нормалізоване значення $S^m_i^*$	Ваговий коефіцієнт $w^m_{si}^*$	Внесок у індекс $S^m_i \times w^m_{si}$
1	Стійкість кабелів і електропроводів	Відповідність фактичних характеристик номінальним значенням	0,4	0,2	0,08
2	Механічні пошкодження опор, ліній електропередач	Втрати і заміна обладнання	0,6	0,3	0,18
3	Навантаження на мережу транспортування енергії	Зростання частоти коротких замикань мережі, аварійних відключень енергопостачання	0,8	0,5	0,40
Інтегральний індекс чутливості SI^e				1,00	0,66

*- за експертною оцінкою авторів

Одним із головних чинників високої чутливості є зниження пропускної здатності мереж за високих температур повітря. У спекотний період проводи нагріваються та провисають, що обмежує можливості передачі електроенергії, збільшує втрати в мережі та підвищує ризик перевантаження обладнання. Одночасно хвилі спеки супроводжуються зростанням споживання електроенергії, що створює додаткове навантаження на енергосистему.

Високий рівень чутливості також зумовлений тим, що частина електромережевої інфраструктури недостатньо адаптована до екстремальних погодних явищ. Сильний вітер, грози, інтенсивні опади, ожеледь чи підтоплення можуть спричиняти пошкодження ліній електропередач, підстанцій та систем електропостачання, що підвищує ризик аварійних відключень і порушення енергопостачання.

Крім того, значний ступінь зношеності окремих елементів мережевої інфраструктури та недостатні темпи модернізації додатково посилюють чутливість електромереж до кліматичних впливів.

Оцінка індексу адаптаційної спроможності. Адаптаційна спроможність енергомереж — це здатність систем передачі й розподілу електроенергії передбачати, реагувати, пристосовуватись і швидко відновлюватися після впливу кліматичних змін та екстремальних погодних явищ, мінімізуючи шкоду та втрати. Адаптаційна спроможність енергомереж включає, насамперед, технічні можливості: модернізовані трансформатори, опори, ізолятори, кабелі які здатні витримувати високі температури, вітрові навантаження, підтоплення. До адаптаційної спроможності належать також операційні та управлінські ресурси, інституційна спроможність (табл.5.47).

Таблиця 5.47– Оцінка адаптаційної спроможності електромереж у короткостроковій перспективі

№	Індикатор адаптаційної спроможності AC^m_i	Вплив	Нормалізоване значення $AC^m_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^m_{aci} *$	Внесок у індекс $AC^m_i \times w^m_{si}$
---	--	-------	-----------------------------------	----------------------------------	--

1	Технічний рівень обладнання	Стан трансформаторів, ізоляції, матеріалів, оновлення	0,6	0,25	0,15
2	Рівень обслуговування та ремонту	Частота та якість технічного обслуговування	0,7	0,2	0,14
3	Інфраструктурна гнучкість	Можливість оперативно перемикає навантаження, резерв	0,5	0,15	0,08
4	Впровадження систем моніторингу	Наявність сенсорів, систем діагностики, прогнозування	0,4	0,15	0,06
5	Підготовка персоналу	Кваліфікація, навчання з питань змін клімату	0,7	0,1	0,07
6	Фінансування адаптаційних заходів	Бюджети на модернізацію, страхування ризиків	0,5	0,1	0,05
7	Регуляторні та нормативні умови	Наявність норм і стандартів щодо кліматичних ризиків	0,6	0,05	0,03
Інтегральний індекс адаптаційної спроможності ACI^m				1,00	0,58

У короткостроковій перспективі електромережі України матимуть помірну здатність до адаптації ($ACI^m = 0,58$) за сценарієм РТК8.5 (табл.5.47) Це свідчить про наявність певних технічних та організаційних можливостей для пристосування енергосистеми до кліматичних змін, однак існуючих ресурсів і темпів модернізації поки недостатньо для повного зниження кліматичних ризиків.

Одним із важливих чинників адаптаційної спроможності є активне впровадження систем моніторингу та цифрового контролю стану електромереж, що дозволяє оперативніше виявляти пошкодження, прогнозувати аварійні ситуації та підвищувати надійність роботи енергосистеми. Позитивну роль також відіграє підготовка кваліфікованих

кадрів, здатних забезпечувати експлуатацію, модернізацію та відновлення мереж в умовах зростаючих кліматичних навантажень.

Водночас адаптаційна спроможність обмежується недостатнім фінансуванням адаптаційних заходів, зокрема модернізації інфраструктури, підвищення стійкості обладнання до екстремальних погодних явищ та розвитку резервних систем електропостачання. Значна частина мережевої інфраструктури потребує оновлення, що ускладнює швидке підвищення її кліматичної стійкості.

Разом із тим реалізація державної політики у сфері адаптації до зміни клімату, розвиток стратегій модернізації енергетичного сектору та інтеграція кліматичних ризиків у планування розвитку енергосистеми створюють передумови для подальшого підвищення адаптаційної спроможності електромереж України.

Оцінка індексу вразливості. Вразливість енергомереж до зміни клімату — це ступінь, до якого система передачі та розподілу електроенергії схильна до негативного впливу кліматичних змін і екстремальних погодних явищ, з урахуванням її чутливості та адаптаційної спроможності.

Індекс вразливості для електромереж $V^m = 0.54$, який свідчить, що у короткостроковій перспективі електромережі в Україні матимуть *помірний рівень* вразливості. Такий рівень вразливості зумовлений значною залежністю функціонування електромереж від впливу небезпечних та екстремальних погодних явищ, зокрема сильного вітру, ожеледі, гроз, хвиль спеки, сильних опадів і налипання мокрого снігу. Підвищення температури повітря може призводити до перегріву обладнання та зниження пропускної здатності ліній електропередачі, а екстремальні погодні явища — до пошкодження опор, трансформаторних підстанцій і порушення стабільності енергопостачання. Водночас наявність резервних схем живлення, модернізація мереж та впровадження систем моніторингу й автоматизованого управління частково знижують негативний вплив кліматичних чинників.

Інтегральний індекс кліматичного ризику для електромереж України у короткостроковій перспективі становить $R^M=0,54$, що відповідає помірному рівню впливу кліматичних ризиків за сценарієм RCP8.5.

Отримане значення свідчить, що зміна клімату вже у короткостроковій перспективі може чинити помітний вплив на надійність та стійкість функціонування електромереж України. Найбільші ризики пов'язані зі зростанням повторюваності небезпечних погодних явищ, збільшенням навантаження на енергосистему під час хвиль спеки та підвищенням імовірності аварійних відключень. В умовах зношеності частини інфраструктури та додаткового навантаження на енергосистему ці чинники можуть посилювати ризики порушення стабільного електропостачання.

Результати оцінювання підкреслюють необхідність подальшого розвитку адаптаційних заходів, зокрема модернізації електромережевої інфраструктури, підвищення стійкості обладнання до екстремальних погодних умов, розвитку систем раннього попередження та впровадження сучасних технологій управління енергетичними мережами.

5.9.2 Оцінка кліматичного ризику та вразливості для електромереж у середньостроковій перспективі. Оцінку кліматичних ризиків для електромереж у середньостроковій (2041-2060 рр.) перспективі було виконано за припущення, що індекси чутливості та адаптаційної спроможності електромереж залишаться незмінними та будуть дорівнювати значенням цих індексів, визначених вище на короткострокову перспективу. З огляду на це припущення була проведена оцінка індексів небезпеки, експозиції, та ризику на середньострокову перспективу.

Оцінка індексу небезпеки. У середньостроковій перспективі електромережі України матимуть високий рівень кліматичної небезпеки ($HI^M=0,56$) до зміни клімату за сценарію РТК8.5 (табл.5.48), оскільки:

- збільшення температури влітку сприятиме зменшенню пропускної здатності;

- зростання частоти сильних вітрів, опадів та вологості обумовлюватиме підвищення аварійності мереж.

Таблиця 5.48 - Оцінка кліматичної небезпеки для електромереж у середньостроковій перспективі

№	Індикатор небезпеки H^m_i	Вплив	Нормалізоване значення $H^m_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^m_{hi} *$	Внесок у індекс $H^m_i \times w^m_{hi}$
1	Середня максимальна за літо температура повітря, °C	підвищена температура спричиняє зростання опору проводів, що знижує ефективність та підвищує втрати	0,69	0,3	0,21
2	Вологість повітря (%)	Впливає на ізоляцію, корозію, зростає +10%	0,6	0,10	0,06
3	Кількість днів за рік з опадами 10 мм і більше за добу	Підвищує ризик коротких замикань зменшується -10%	0,12	0,15	0,02
4	Кількість днів за зиму з опадами 1мм і більше за добу, дні	Високий ризик пошкоджень від обледеніння та налипання снігу	0,45	0,15	0,07
5	Середня за рік швидкість вітру, м/с	Механічні навантаження на лінії, зростає +15%	0,67	0,3	0,20
Інтегральний індекс небезпеки HI^m				1,00	0,56

Оцінка індексу експозиції. : Рівень експозиції до змін клімату електромережі України у середньостроковій перспективі ймовірно *матимуть дуже високий* ($EI^m = 0,83$) за сценарієм РТК8.5 (табл.5.49). Це пов'язано з подальшим масштабним розширенням і ускладненням мережевої інфраструктури в умовах трансформації енергетичного сектору та зростаючого впливу кліматичних чинників.

Таблиця 5.49 – Оцінка експозиції для електромереж у середньостроковій перспективі

№	Індикатор експозиції E^m_i	Вплив	Нормалізоване значення $E^m_i *$	Ваговий коефіцієнт $w^m_{ei} *$	Внесок у індекс $E^m_i \times w^m_{ei}$
1	Виробнича потужність	Забезпечення стійкості енергосистеми:	0,9	0,5	0,45

		співвідношення довжин мереж передачі та розподілення			
2	Економічна ефективність	Можливість здійснення технічної модернізації	0,70	0,2	0,14
3	Міжсекторальні взаємини	Конкуренція за земельні ресурси з іншими секторами	0,80	0,3	0,24
Інтегральний індекс експозиції ET^m				1,00	0,83

Одним із ключових чинників є збільшення частки розподільчих мереж, необхідних для інтеграції децентралізованої генерації, насамперед об'єктів відновлюваної енергетики. Розширення мережевої інфраструктури призводитиме до збільшення кількості об'єктів, які перебуватимуть під впливом екстремальних погодних явищ, високих температур, сильних опадів, вітру та ожеледі.

Важливу роль також відіграватиме розвиток інноваційних технологій модернізації електромереж. Хоча впровадження «розумних» мереж, автоматизованих систем управління та сучасних матеріалів підвищуватиме надійність енергосистеми, одночасно це сприятиме ускладненню її структури та збільшенню залежності від стабільного функціонування великої кількості взаємопов'язаних елементів інфраструктури, що підвищуватиме загальний рівень експозиції.

Додатковим чинником стане потенційне загострення конкуренції за земельні ресурси для прокладання нових розподільчих мереж та розвитку енергетичної інфраструктури. Умови щільного господарського освоєння територій, урбанізації та розвитку інших секторів економіки можуть обмежувати можливості оптимального розміщення мережевих об'єктів і підвищувати їхню вразливість до кліматичних впливів.

Таким чином, дуже високий рівень експозиції електромереж у середньостроковій перспективі зумовлений поєднанням масштабного розвитку мережевої інфраструктури, зростання її територіальної поширеності та посилення залежності енергосистеми від стійкого функціонування розподільчих мереж в умовах зміни клімату

Ймовірно, що до середини XXI століття електромережі України матимуть помірний рівень вразливості ($V^m = 0,54$), що свідчить про наявність суттєвого впливу кліматичних чинників на функціонування мережевої інфраструктури, проте існуючі технічні та організаційні можливості адаптації поки дозволятимуть частково компенсувати негативні наслідки зміни клімату.

Водночас інтегральний індекс кліматичного ризику для електромереж становитиме $R = 0,6448$, що відповідатиме високому рівню кліматичного ризику у середньостроковій перспективі за сценарієм RCP8.5. Такий рівень ризику зумовлений поєднанням дуже високої експозиції мережевої інфраструктури, значної чутливості до екстремальних погодних явищ та посилення кліматичних небезпек, зокрема підвищення температури повітря, збільшення повторюваності сильних вітрів, інтенсивних опадів та ожеледі.

Отримані результати свідчать, що до середини століття зміна клімату може суттєво впливати на надійність та стабільність роботи електромереж України, підвищуючи ризик аварійних пошкоджень, перебоїв електропостачання та зростання навантаження на енергосистему.

Отже зміна клімату підвищує вразливість електромереж усіх рівнів, особливо у поєднанні з іншими факторами — старінням інфраструктури, зростанням споживання та збільшенням частки нестабільної ВДЕ. Для підвищення адаптаційної спроможності потрібно інвестувати в модернізацію, цифровізацію, інфраструктурну стійкість і мультисценарне планування.

5.9.3 Пріоритетні напрямки адаптації електромереж передачі та розподілу електроенергії до зміни клімату. Пріоритетні напрямки адаптації електромереж передачі та розподілу електроенергії до зміни клімату полягають у підвищенні їх стійкості, гнучкості та надійності в умовах

частіших і сильніших кліматичних загроз: спеки, злив, підтоплення, лісових пожеж, ожеледі тощо. Ключовими напрямками адаптації електромереж до кліматичних змін є:

- фізичне укріплення мережевої інфраструктури;
- технічна модернізація та адаптація до високих температур;
- цифровізація та автоматизація управління;
- резервування та децентралізація;
- оцінка кліматичних ризиків і зонування;
- розробка та впровадження планів адаптації.

Проведена оцінка кліматичних ризиків має узагальнений характер, охоплює територію України в цілому та відображає передусім загальнонаціональні тенденції зміни клімату. Водночас Україна характеризується складною та різноманітною фізико-географічною будовою, істотною кліматичною неоднорідністю і значними регіональними контрастами природних умов. Це зумовлює просторову варіабельність проявів кліматичних змін — як у динаміці температури та опадів, так і в частоті та інтенсивності небезпечних гідрометеорологічних явищ (посух, хвиль спеки, сильних вітрів, паводків тощо).

Крім того, складові ризику — експозиція, чутливість та адаптаційна спроможність — істотно відрізняються не лише між регіонами, а й між окремими підсекторами енергетики (теплова, атомна, гідроенергетика, відновлювані джерела енергії). Ці відмінності визначаються як природними чинниками (клімат, водні ресурси, рельєф), так і техніко-економічними особливостями розміщення, функціонування та модернізації енергетичної інфраструктури.

Водночас кліматичні ризики енергетичного сектору України не обмежуються прямим впливом окремих кліматичних небезпек. В умовах війни, значних пошкоджень критичної інфраструктури, обмеженості резервних потужностей та трансформації структури генерації (зміщення ролі різних типів енергетики) суттєво зростає значення комплексних, каскадних і

системних ризиків. Йдеться про ситуації, коли вплив одного чинника (наприклад, хвилі спеки або посухи) через взаємозв'язки в енергосистемі спричиняє ланцюгові ефекти — зниження виробництва електроенергії, перевантаження мереж, порушення балансування та підвищення ймовірності аварійних відключень.

У зв'язку з цим отримані результати доцільно розглядати як базову, орієнтовну оцінку, що потребує подальшого уточнення. Для підвищення достовірності та прикладної цінності аналізу необхідним є проведення деталізованих регіональних і локальних досліджень із використанням високороздільних кліматичних даних, сценарного моделювання (зокрема, за підходами МГЕЗК), а також підходів до оцінки системних ризиків (system risk assessment, stress-testing енергосистем). Такий підхід дозволить більш точно ідентифікувати вразливі елементи енергетичної системи, оцінити потенційні втрати та обґрунтувати ефективні заходи адаптації до зміни клімату з урахуванням сучасних безпекових викликів..

РОЗДІЛ 6

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РОЗРОБКИ ГАЛУЗЕВОГО ПРОГРАМНОГО ДОКУМЕНТУ З АДАПТАЦІЇ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

Закон України “Про основні засади державної кліматичної політики”⁹⁸, який є базовим законодавчим документом, визначає правові та організаційні засади державної кліматичної політики, спрямованої, зокрема, на забезпечення пом’якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї. В статті 1 цього Закону серед інших наведено два основні поняття: «адаптація до зміни клімату - процес, спрямований на зменшення вразливості чи забезпечення стійкості соціоекологічних систем та інфраструктури до впливу зміни клімату з метою пристосування до нових кліматичних умов, запобігання (зменшення) негативним наслідкам зміни клімату», а також «заходи щодо пом’якшення наслідків зміни клімату - як система конкретних дій, стратегій та програм, спрямованих на зменшення вразливості екосистем, населення та економіки до негативних наслідків зміни клімату, зокрема щодо зменшення обсягів антропогенних викидів парникових газів та/або збільшення обсягів їх видалення. Цим Законом передбачається розробка Національного плану з енергетики та клімату, Стратегії адаптації до зміни клімату. В розвиток зазначених документів на загальнодержавному рівні цим Законом визначається, що профільні міністерства, зокрема які забезпечують формування та реалізують державну політику в електроенергетичному, ядерно-промисловому, вугільно-промисловому, торфодобувному, нафтогазовому та нафтогазопереробному комплексі мають також розробляти секторальні програмні документи щодо адаптації до зміни клімату та плани дій до них. Також в цьому Законі передбачені розробка та реалізація відповідних програм органами місцевого самоврядування.

⁹⁸ Закон України “Про основні засади державної кліматичної політики” від 8 жовтня 2024 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text>

Цей Закон визначив, що Стратегія адаптації до зміни клімату повинна містити:

- оцінку ризиків та вразливості соціально-економічних та екологічних систем до зміни клімату, конкретних кліматичних загроз, що впливають на територію України, здатність до адаптації та аналіз можливих наслідків;
- пріоритети, інституційні механізми та цілі для адаптації до зміни клімату, зокрема заходи для захисту економіки, інфраструктури, громадського здоров'я, екосистем;
- обсяг ресурсів та джерела фінансування Стратегії адаптації до зміни клімату;
- механізми оцінки, моніторингу та звітності про виконання Стратегії адаптації до зміни клімату та досягнення її цілей.

Стратегія адаптації до зміни клімату розробляється на строк 10 років, переглядається та оновлюється кожні п'ять років з урахуванням результатів оцінки та моніторингу її реалізації.

Статтею 13 цього Закону передбачені вимоги до секторальних програмних документів щодо адаптації до зміни клімату, зокрема:

- залучення до розробки Науково-експертної ради з питань зміни клімату;
- оцінку ризиків та вразливості відповідного сектору економіки до зміни клімату, у тому числі потенційні кліматичні загрози та їх можливі наслідки;
- пріоритети та цілі для адаптації до зміни клімату у відповідному секторі економіки; конкретні заходи та ініціативи, спрямовані на забезпечення розвитку та модернізацію інфраструктури, прийняття технологічних та природо-орієнтованих рішень тощо;
- обсяг фінансових ресурсів та джерела фінансування;
- запровадження механізмів оцінки, моніторингу та звітності про виконання секторальних програмних документів щодо адаптації до зміни клімату.

Секторальні програмні документи щодо адаптації до зміни клімату розробляються з урахуванням результатів наукових досліджень та із

залученням експертних організацій та громадськості. Секторальні програмні документи щодо адаптації до зміни клімату мають затверджуватись Кабінетом Міністрів України та переглядатись та оновлюватись кожні п'ять років з урахуванням результатів оцінки та моніторингу їх реалізації. Цим Законом передбачається державна підтримка виконання заходів щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї здійснюється шляхом: бюджетних асигнувань з державного бюджету та/або місцевих бюджетів, здешевлення кредитів на забезпечення виконання заходів щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї (відшкодування відсотків за кредитами та/або частини суми кредиту); відшкодування частини вартості заходів щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї.

Надзвичайно важливою вимогою Закону є забезпечення прогнозування зміни клімату на основі науково обґрунтованих оцінок, зокрема постійно оновлюваних прогнозів зміни кліматичних умов на різні часові горизонти. Це, зокрема, передбачає:

- визначення можливих сценаріїв зміни клімату у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі, що дає змогу оцінювати потенційні ризики та планувати заходи з адаптації до зміни клімату;- систематичний збір та аналіз кліматичних даних для забезпечення прогнозування з урахуванням змін на глобальному та регіональному рівнях;

- визначення можливих наслідків зміни клімату для різних секторів економіки та територій, включаючи громадське здоров'я, сільське господарство, водні та лісові ресурси, інфраструктуру;

- визначення ефективних політик та заходів щодо пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї.

Слід зазначити, що Урядом України приділяється значна увага щодо вирішення питань адаптації до зміни клімату, а саме. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р було схвалено Стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030

року⁹⁹ та Операційний план реалізації у 2022-2024 роках Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року¹⁰⁰; Міністерством енергетики України розроблено і розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. було схвалено Енергетичну стратегію України на період до 2050 року¹⁰¹ (документ в обмеженому доступі внаслідок воєнної агресії); проект Плану з реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2050 року (на громадському обговоренні) містить підрозділ з формування узгодженої енергетичної та кліматичної політики; розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. № 587-р., схвалено Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року¹⁰²; розпорядженням Кабінету Міністрів України від 7 лютого 2025 р. № 96-р було затверджено Операційний план заходів з реалізації у 2025-2027 роках Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року¹⁰³.

Виходячи з положень зазначених вище нормативно-правових документів та також результатів дослідження, викладених у розділів 1-3, напрацьовано комплекс рекомендацій з розробки галузевого програмного документу з адаптації до зміни клімату для енергетичного сектору України.

Структура галузевого програмного документу адаптації до зміни клімату для енергетичного сектору України має містити наступні основні частини:

1. Вступна частина (обґрунтування необхідності, цілі та завдання документа, сфера охоплення: електроенергетика, теплоенергетика, гідроенергетика, ВДЕ).

⁹⁹ Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text>

¹⁰⁰ Операційний план реалізації у 2022-2024 роках Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text>

¹⁰¹ Енергетична стратегія України на період до 2050 року.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>

¹⁰² Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80#Text>

¹⁰³ Операційний план заходів з реалізації у 2025-2027 роках Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/96-2025-%D1%80#Text>

2. Аналіз поточної ситуації виявлені кліматичні ризики, рівень вразливості виробничих потужностей та мереж, зміни сезонного споживання електричної та теплової енергії.

3. Цілі та принципи адаптації енергетики України до зміни клімату

Проблематика.

Стратегією екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року визначено секторальні та крос-секторальні проблеми адаптації до зміни клімату, які потребують розв'язання, зокрема наступні:

- недостатній рівень інтеграції в програмні документи Кабінету Міністрів України та програми економічного і соціального розвитку областей, районів і міст питань адаптації до зміни клімату;

- відсутність системних секторальних та міжсекторальних досліджень з оцінки ризиків, уразливості та прогнозування зміни клімату на національному та регіональному рівні;

- нескоординованість наукових досліджень та проектів з питань адаптації до зміни клімату, відсутність механізму систематизації, аналізу та верифікації отриманих результатів;

- недостатня обізнаність громадянського суспільства, бізнесу і центральних та місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування щодо проблематики зміни клімату та необхідності впровадження заходів з адаптації до зміни клімату;

- недостатнє урахування питань адаптації до зміни клімату та сталого природокористування під час розвитку процесу децентралізації та розширення прав громад на природні ресурси;

- недостатність освітнього та науково-технічного супроводу для вирішення викликів у сфері охорони навколишнього природного середовища щодо зменшення впливу, пом'якшення наслідків та адаптації до зміни клімату;

- нестача кваліфікованих кадрів для планування у сфері адаптації до зміни клімату на національному та місцевому рівні;

- відсутність фінансового та економічного механізму запровадження заходів з адаптації до зміни клімату.

Головна мета стратегії забезпечення високої ефективності енергетичного сектору під впливом змін клімату при досягненні кліматичної нейтральності економіки України до 2050 року.

Підцілі (надійність, стійкість, безпека енергетичного сектору)

Принципи (наукова обґрунтованість, стійкість, ефективність, участь заінтересованих сторін, інтеграція з Європейським Союзом).

4. Основні напрями та заходи адаптації.

Стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року визначені реальні та потенційні загрози, пов'язані з енергетичною безпекою та адаптацією до зміни клімату енергетичної галузі, а також очікувані наслідки зміни клімату створюють загрози для надійного енергозабезпечення всіх типів споживачів. Наголошується, що сезонне зменшення або збільшення попиту на енергоресурси на рівні споживачів унаслідок зміни клімату негативно впливатиме на балансування Об'єднаної енергетичної системи України.

Основні загрози для енергетичного сектору визнані наступні:

а) на рівні видобування та постачання природного газу:

- порушення в роботі газорозподільної інфраструктури через повені;

б) на рівні виробництва та постачання електричної енергії:

- підвищення вимог до маневрових потужностей в Об'єднаній енергетичній системі України;

- зменшення виробництва електричної енергії на атомних та теплових електростанціях через потенційні обмеження постачання водних ресурсів для охолодження;

- невизначеність умов і обсягів виробництва електричної енергії, потенційне зменшення рівня виробництва та маневрових можливостей гідроелектростанцій через посухи, зростання втрат води на випаровування;

- поглиблення нерівномірності добових графіків електричного навантаження та зростання загальної потреби в електричній енергії у літній період унаслідок розвитку систем кондиціонування повітря та охолодження;
- зниження ефективності передачі електричної енергії через підвищення температури повітря;
- підвищення аварійності в електричних мережах (пошкоджень, відключень) унаслідок погодних умов;
- в) на рівні виробництва та розподілу тепла:
 - невизначеність щодо зміни попиту на теплову енергію.

4.1. Технічні заходи по адаптації енергетичної галузі до змін клімату з наведенням негативних наслідки впливу змін клімату на енергетичну галузь (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 - Негативні наслідки впливу змін клімату на енергетичну галузь та заходи з її адаптації до цих змін

Негативні наслідки впливу змін клімату на енергетичну галузь	Рекомендації заходів по адаптації енергетичної галузі до змін клімату
Зміна рівнів та режимів споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) – добових, тижневих, сезонних, річних під впливом кліматичних факторів, а саме: - зниження потреби в енергії на опалення; - зростання потреб в енергії на кондиціонування та охолодження; - зростання потреб в електроенергії в системах зрошування та поливу; - збільшення технологічних втрат ПЕР; - зниження рівня виробництва і маневрених можливостей ГЕС через посухи або повені; - зростання нерівномірності електроспоживання.	Удосконалення розробки моделей прогнозування виробництва та споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), розвитку ВДЕ, систем розподіленої генерації на основі ВДЕ та інших енергетичних установок, включаючи електрозабезпечення систем централізованого теплопостачання, впровадження накопичувачів електроенергії. Моделювання майбутнього попиту на енергію та потенційних періодів його піку, в тому числі з використанням штучного інтелекту тощо. Забезпечення надійного балансування Об'єднаної енергосистеми України.

Загострення добових графіків електричних навантажень внаслідок розвитку систем кондиціювання повітря, охолодження, меліорації тощо. Різка зміна потреби в робочій потужності генерації при суттєвих перепадах температур у суміжні дні. Зниження середньої потужності ГЕС та ГАЕС при покритті пікових навантажень.	Підвищення маневрових можливостей енергосистеми, зокрема припустимої кількості зупинок-пусків енергоблоків ТЕС, впровадження споживачів-регуляторів, збільшення регулюючого діапазону ТЕС. Впровадження високоманеврових ТЕС та ТЕЦ.
Зниження можливої робочої потужності теплових і атомних електростанцій (ТЕС, АЕС) внаслідок: - зниження коефіцієнтів корисної дії через зростання температури води систем охолодження та температури довколишнього повітря; - підвищення втрат води на випаровування та зростання її мінералізації; - зниження водності річок.	Оптимізація технологічних схем ТЕС та АЕС, зокрема - впровадження додаткових систем для охолодження води, підвищення потужності хімводоочистки, приведення у відповідність потужності станцій можливостям забезпечення їх потреб у воді, використання для охолодження перероблених стічних муніципальних вод.
Зниження рівня виробництва і маневрових можливостей ГЕС через посухи або повені.	Реконструкцію та ремонт старих ГЕС для підвищення їхньої стійкості до наслідків зміни клімату. Переведення деяких ГЕС до режиму роботи ГАЕС. Впровадження високоманеврових ТЕС.
Зниження ремонтної площадки ОЕС.	Впровадження додаткових резервувачів потужностей для забезпечення проведення необхідного обсягу планових ремонтів.
Підвищення аварійності у електричних мережах внаслідок метеорологічних пошкоджень та відключень.	Корегування нормативів будівництва повітряних ЛЕП. Перехід від електропостачання з використанням повітряних ЛЕП до постачання по кабельним підземним ЛЕП. Впровадження резервних джерел живлення. Впровадження децентралізованих систем електропостачання. Підвищення можливостей ремонтно-аварійних служб по ліквідації наслідків аварій.
Зростання пікових навантажень в сегментах електричної мережі.	Збільшення перетину дротів, у першу чергу головних ділянок розподільчої мережі. Впровадження розвантажувальних ТП.

	Впровадження глибоких введів на вищій напрузі.
Підвищення електричного опору внаслідок зростання середньорічних температур, збільшення втрат в лініях електропередачі. Провисання повітряних ліній і прискорене зростання дерев на ділянках ЛЕП Обмерзання ЛЕП.	Компенсація втрат за рахунок нових інженерних рішень. Встановлення додаткових опор і регулярна розчистка прилеглих до ЛЕП ділянок від рослинності. Застосування нових ізоляційних матеріалів, систем обігріву та посилення підтримуючих конструкцій.
Зниження вихідної потужності ВЕС внаслідок низької щільності повітря, обумовленої високими середньорічними температурами повітря	Вдосконалення методів оцінки вітрових ресурсів, встановлення достатніх резервних потужностей. Зміна конструкції лопатей. Підвищення ємності енергосховищ.
Вплив хмарності та інсоляції на виробництво сонячної енергії на розташованих в цих регіонах СЕС.	Застосування нових матеріалів поверхні на фотоелектричних панелях, що краще засвоюють розсіяне світло, трекінгові системи, що змінюють положення панелей в залежності від часу доби. Підвищення ємності енергосховищ.
Електростанції та інші енергетичні об'єкти проектувались для одних кліматичних умов, а працюють в зовсім інших кліматичних умовах	Врахування у вимогах до проектування та будівництва електростанцій та інших енергетичних об'єктів заходів, що не лише враховують клімат регіону, в якому вони розміщуватиметься, а також майбутні зміни клімату та ті тенденції, які відзначаються за останні 30 – 50 років;
Прискорена корозія та руйнування металоконструкцій та залізобетонних конструкцій при зростанні частоти та інтенсивності кислотних опадів. Руйнування споруд та вихід з ладу обладнання при екстремальних кліматичних ситуаціях.	Використання стійких до корозії матеріалів, проведення антикорозійних заходів, фарбування будівель, укріплення і ремонт капітальних споруд. Перехід від відкритого до закритого розміщення обладнання. Впровадження нових будівельних нормативів.

4.2. Організаційно-управлінські заходи:

- створення центрів моніторингу та аналізу ризиків;
- навчання персоналу;
- інтеграція кліматичних ризиків у корпоративні процеси.

4.3. Законодавчі та нормативні заходи:

- оновлення будівельних норм та стандартів;
- включення кліматичних критеріїв до ліцензування.

4.4. Фінансово-економічні інструменти:

- залучення інвестицій;
- стимулювання розвитку ВДЕ;
- використання механізмів «зеленого фінансування».

5. Розробка та прийняття Плану реалізації Стратегії адаптації до зміни клімату для енергетичного сектору України з визначенням короткострокових (1-3 роки), середньострокових (3-7 років), довгострокові (>7 років) етапів.

На рисунку 6.1 представлено проект бок-схеми Стратегії адаптації до зміни клімату енергетичної галузі.

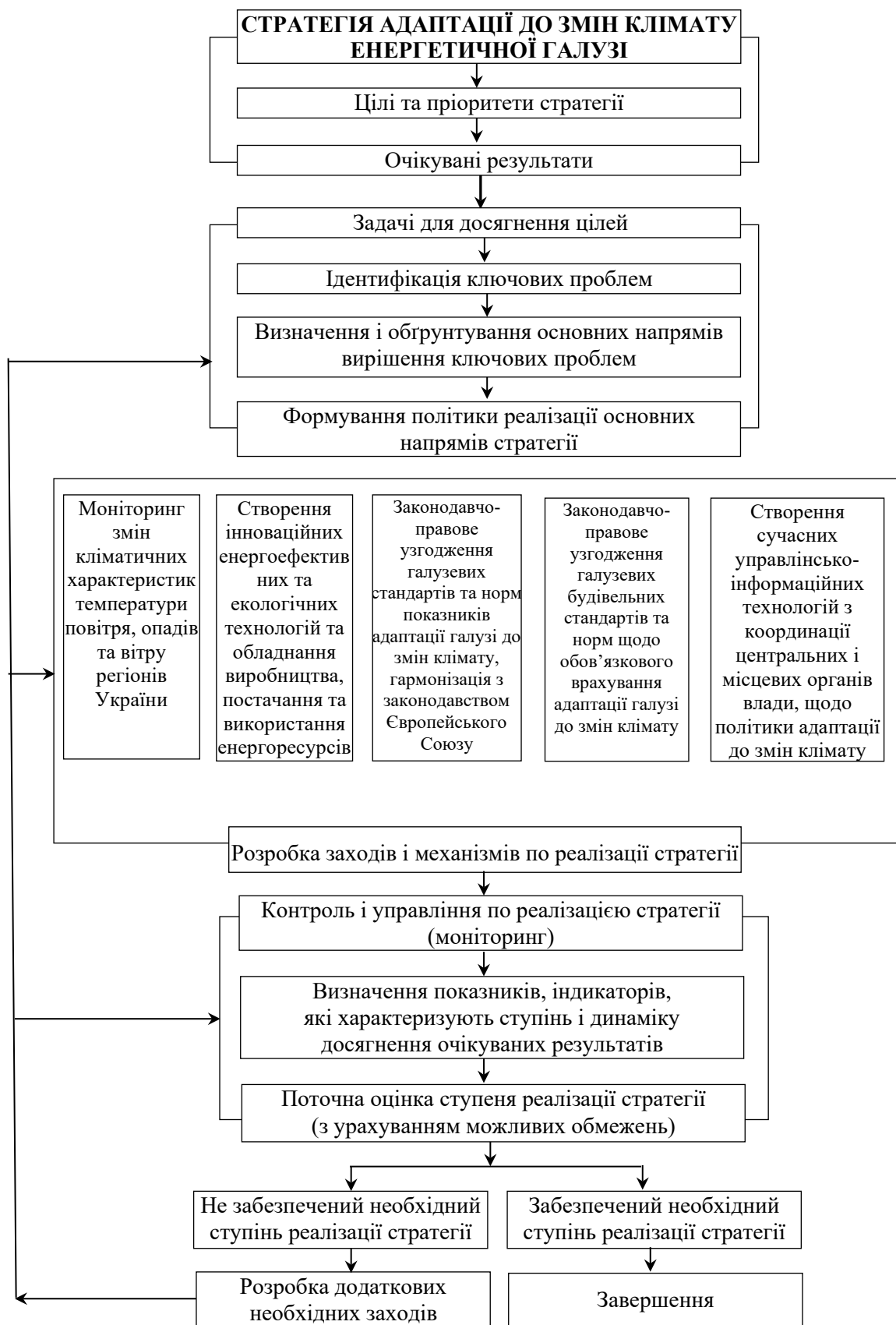


Рис.6.1 - Блок-схема стратегії адаптації до зміни клімату енергетичної галузі¹⁰⁴. (опрацьовано автором)

¹⁰⁴ Джерело: Басок, Б. І., Базеєв, Є. Т., & Кураєва, І. В. (2021). Адаптація комунальної теплоенергетики до змін клімату. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukraini*, (4), 60–75. <https://doi.org/10.15407/vism2021.04.060>

ВИСНОВКИ

Оцінка кліматичних ризиків енергетичного сектору України свідчить, що до середини XXI століття більшість підсекторів енергетики зазнаватиме посилення впливу кліматичних небезпек. Найбільш значущими чинниками є підвищення температури повітря, зростання повторюваності хвиль спеки, посилення посушливості, зміна водності річок, зростання пожежної небезпеки та збільшення частоти екстремальних погодних явищ.

Найбільш критичними є ризики для гідроенергетики, теплової енергетики, біоенергетики та електричних мереж. Атомна енергетика характеризується відносно нижчим інтегральним кліматичним ризиком, однак її безпека істотно залежить від стабільності водозабезпечення, роботи систем охолодження та зовнішньої інфраструктури.

Отже, зміна клімату є серйозним випробуванням для енергетичної галузі, що вимагає глибокого переосмислення підходів до виробництва, передачі та споживання енергії. Ігнорування цих викликів може призвести до значних економічних збитків та системних криз в енергопостачанні. Водночас, ця криза відкриває вікно можливостей для технологічної модернізації, переходу до більш чистих та стійких джерел енергії та побудови надійної, гнучкої та децентралізованої енергетичної системи майбутнього, здатної протистояти як кліматичним, так і іншим загрозам. Для України, яка стоїть на шляху повоєнної відбудови та європейської інтеграції, врахування кліматичного фактору при плануванні розвитку енергетики є не просто рекомендацією, а стратегічною необхідністю для сталого розвитку.

Водночас, в умовах України кліматичні ризики не можуть розглядатися ізольовано від воєнних, технологічних, інфраструктурних та соціально-економічних ризиків. Саме їхнє поєднання формує системну вразливість енергетичного сектору. Тому адаптація має бути інтегрована не лише в

кліматичну політику, а й у політику енергетичної безпеки, післявоєнного відновлення, просторового планування та розвитку критичної інфраструктури