

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, професор, І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
І. О. Суходуб¹, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Гетманчук¹, наук. співроб.,
С. О. Крамаренко¹, аспірант, А. В. Гавриш¹, аспірант

АНАЛІЗ ЗМІН СОНЯЧНИХ ТЕПЛОАДХОДЖЕНЬ І ВІТРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕГІОНАХ УКРАЇНИ З ФОКУСОМ НА ЕКСТРЕМАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського", Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України, Україна

³Інститут загальної енергетики НАН України, Україна

Ключові слова: кліматичні данні, Meteonorm, GHI, екстремальні погодні умови, швидкість вітру, відновлювані джерела енергії.

Вступ. Зростання кліматичних ризиків, порушення традиційних енергетичних ланцюгів і необхідність переходу до сталої енергетики роблять питання ефективного використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в Україні критично важливим. Одним із ключових факторів у плануванні та впровадженні таких технологій є точна оцінка потенціалу сонячної та вітрової енергії з урахуванням просторової та часової варіативності кліматичних параметрів. Особливої уваги потребують дослідження в умовах екстремального клімату, оскільки саме вони дозволяють оцінити ефективність використання відновлювальних джерел енергії для забезпечення надійного автономного енергозабезпечення.

Наукові дослідження останніх років підтверджують актуальність глибокого аналізу кліматичних характеристик для ефективного проектування ВДЕ-систем. Так, у роботах [1, 2] обґрунтовується необхідність врахування довгострокових кліматичних трендів і сценаріїв змін при моделюванні енергоефективних технологій. У публікаціях [3, 4, 5] вказано на суттєві коливання рівнів сонячної радіації та вітрової активності у регіонах України, що вимагає регіонально специфічного підходу до розміщення та проектування ВДЕ-об'єктів. Крім того, міжнародні дослідження [6], зокрема в межах звітів МГЕЗК (IPCC) [7], демонструють значну залежність відновлювальних джерел енергії від змін клімату і закликають до використання сценаріїв Representative Concentration Pathways (RCP) при плануванні кліматостійкої інфраструктури.

В Україні нормативною базою для розрахунку енергоефективності будівель є ДСТУ 9190:2022 [8], який містить кліматичні параметри, сформовані на основі середньомісячних даних згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [9]. Однак, дані цього стандарту відображають кліматичну ситуацію станом на 1961–2005 роки, що обмежує їхню релевантність в умовах сучасного клімату. Водночас актуальні кліматичні бази даних, зокрема Meteonorm [10], а також прогнозні сценарії RCP, дозволяють здійснювати більш точні оцінки в умовах як сучасного, так і майбутнього клімату, що має вирішальне значення для динамічного моделювання енергетичних характеристик будівель із використанням ВДЕ.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик у різних регіонах України на основі історичних, поточних і про-

гнозованих даних для оцінки потенціалу використання ВДЕ, з урахуванням викликів, пов'язаних з екстремальними кліматичними умовами та потребами в децентралізованому енергозабезпеченні.

Результати дослідження

Аналіз помісячних значень за історичні, поточні періоди та нормативних значень.

У цьому дослідженні проаналізовано зміну сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик у різних регіонах України, доповнюючи результати роботи [11], в якій розглянуто аналіз температурних даних зовнішнього середовища з акцентом на можливі екстремальні умови за даними кліматичних баз України та Meteoronorm [10].

Середньомісячні сонячні теплонадходження на горизонтальну поверхню (GHI) за поточний (1996–2015 роки) та історичний (1981–1990 роки) періоди, отримані з глобальної кліматичної бази Meteoronorm [10] та відповідно ДСТУ 9190:2022 [8], представлені для чотирьох міст України, що є представниками двох кліматичних зон з північної, південної, західної та східної частин країни (рис. 1).

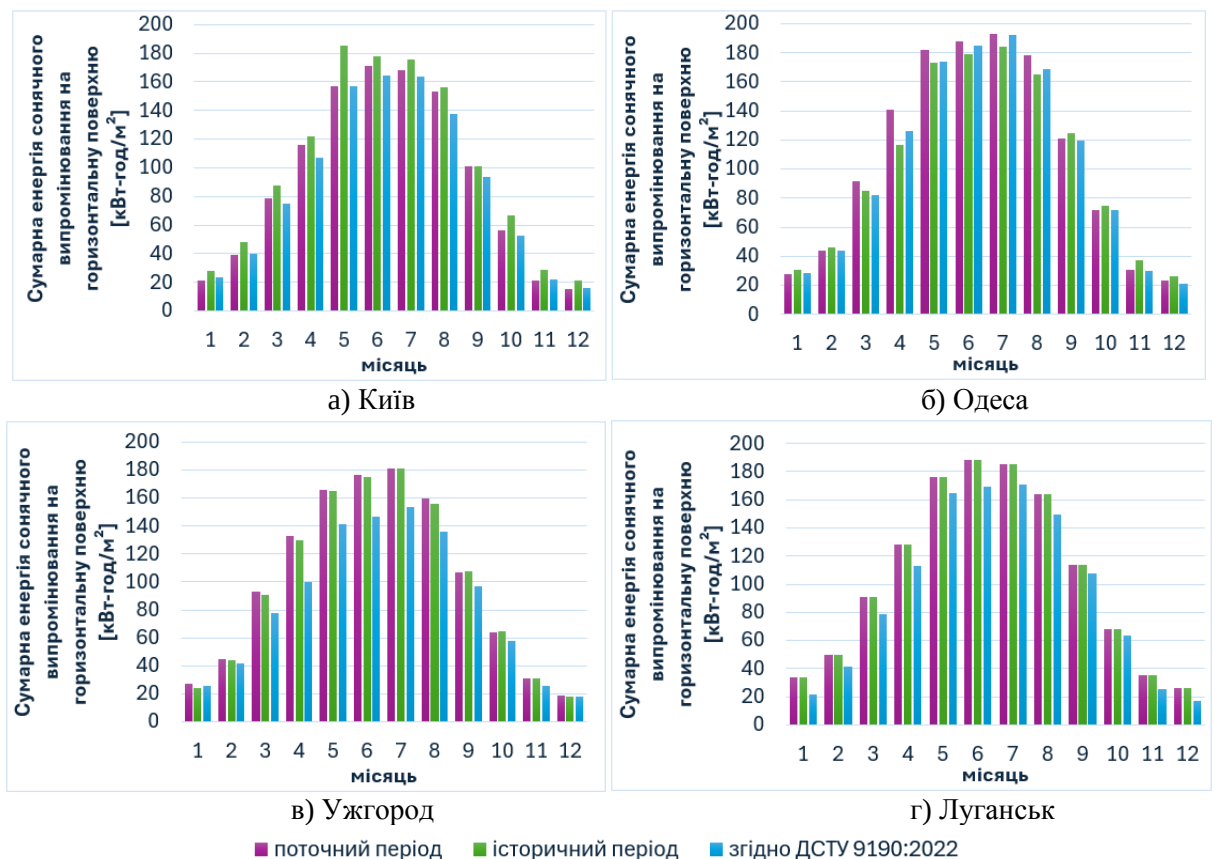


Рисунок 1 – Помісячна зміна сонячних теплонадходжень для різних міст за поточний період, відповідно історичних даних та ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія»

Аналіз показує, що найбільші відмінності між історичними та поточними значеннями GHI спостерігаються в перехідні сезони – особливо навесні (березень–травень). Зокрема, у місті Київ зафіксовано зниження GHI в порівнянні з історичним періодом у середньому на 8 % за рік, що може бути пов'язано як зі змінами атмосферної прозорості, так і з локальними змінами хмарності та аерозольного складу повітря.

Водночас, для південного регіону – Одеси – навпаки, зафіксовано збільшення ГНІ на 4 %, а для Ужгорода – на 1,4 %, що вказує на регіональну неоднорідність кліматичних змін. Для Луганська відмічено невелику різницю порівнюваних значень з незначними сезонними варіаціями.

Згідно статистичних помісячних даних з бази даних Meteonorm [10] за поточний (2000–2019 роки) та історичний (1981–1990 роки) періоди напрямки вітру є однаковими, а швидкості вітру різняться (рис. 2).

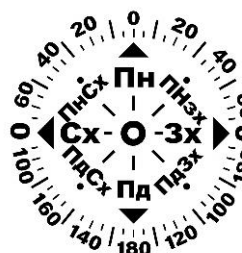
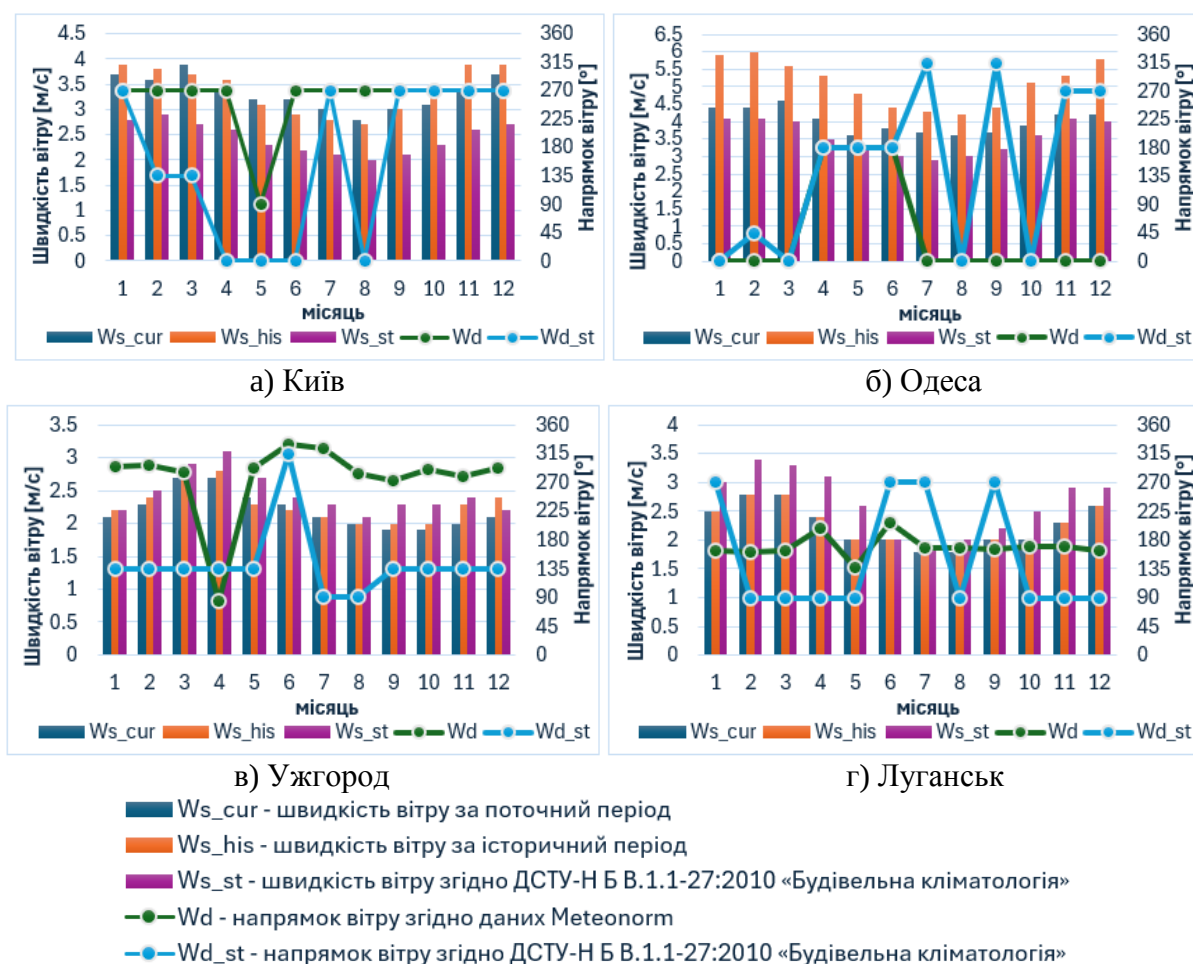


Рисунок 2 – Помісячна зміна швидкості та напрямку вітру для різних міст за поточний період, історичні дані та відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія»

Результати аналізу свідчать про відсутність глобальної закономірності щодо збільшення чи зменшення швидкості вітру з часом на території України, для кожного міста ці зміни індивідуальні. Наприклад, для міста Києва спостерігається, що в наш час

середньомісячна швидкість вітру в середньому на 0,2 м/с зменшилась в порівнянні з історичний періодом, проте на 0,9 м/с більша за значення наведені в ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [9]. Для Одеси швидкість вітру за поточний період досить близька до нормативних значень, але в середньому за рік швидкість вітру за поточний період зменшилась на 1,1 м/с в порівнянні з історичними даними. Для міста Ужгород статистичні дані за поточний та історичний період не підходять до нормативних значень більше ніж на 0,4 м/с. В Луганську, згідно даним з бази даних Meteororm [10], середньомісячна швидкість вітру з часом не змінилась, і в порівнянні з нормативними значеннями різняться на 0,0–0,7 м/с для різних місяців.

Згідно середньомісячним даним з бази даних Meteororm [10], для міст Києва, Харкова, Вінниці, Хмельницького, Полтави, Житомира, Черкас та Кропивницького характерним є західний (окрім травня місяця) напрямок вітру. Для усіх інших обласних центрів України графіки зміни середньомісячного напрямку вітру різняться між собою.

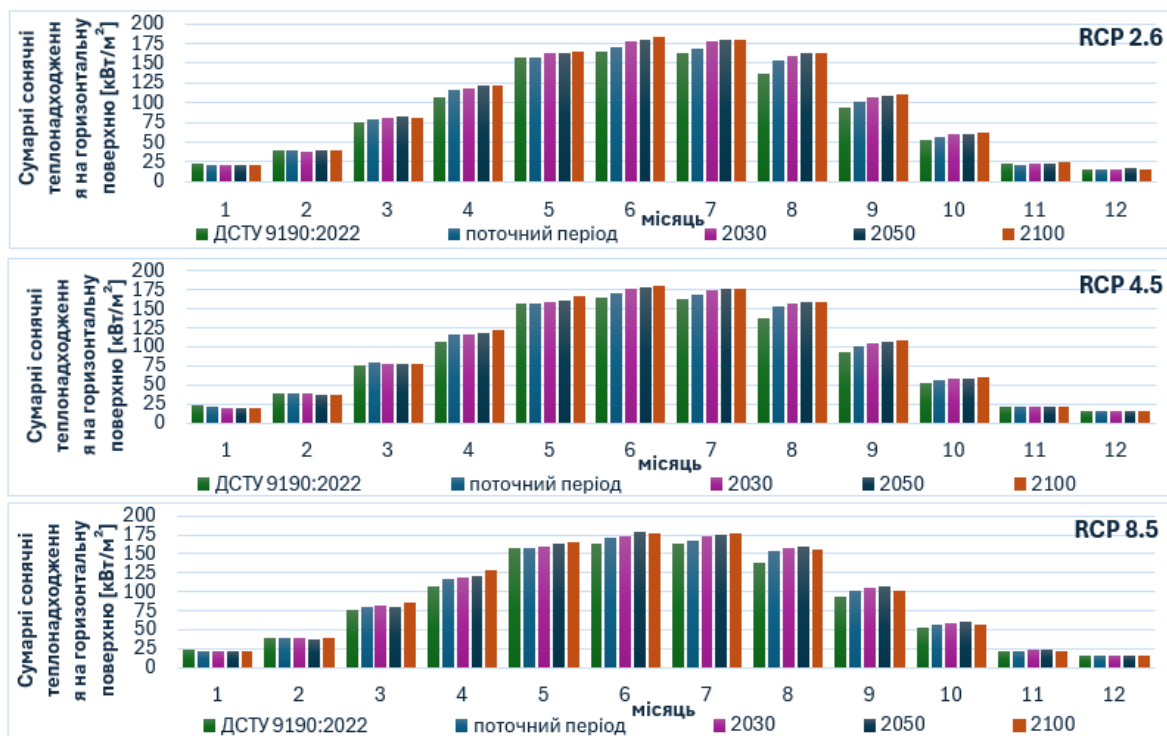
Аналіз поточних, нормативних та майбутніх кліматичних даних

У кліматичній базі даних Meteororm [10] доступні детальні помісячні та погодинні метеорологічні дані для трьох глобальних сценаріїв зміни клімату – RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5. Ці сценарії відображають різні варіанти розвитку подій залежно від рівня викидів парникових газів у майбутньому та використовуються для моделювання кліматичних умов у XXI столітті. У межах цього дослідження проведено детальний аналіз кліматичних характеристик відповідно до зазначених сценаріїв для двох міст, що репрезентують різні кліматичні зони України: Києва (І зона) та Одеси (ІІ зона) [9].

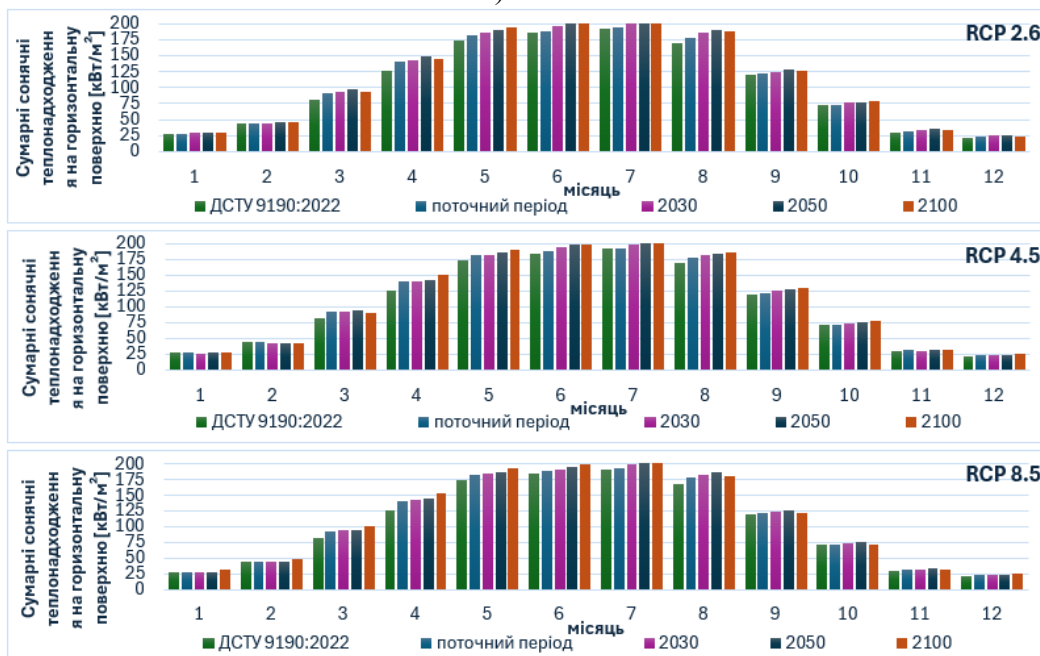
На рис. 3 зображено помісячну зміну сумарної енергії сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню для міста Київ та Одеси за поточний період, згідно даних ДСТУ 9190:2022 [8] та відповідно до різних RCP. Дані середньомісячної сумарної сонячної радіації, усереднених для однієї години, що надходять на горизонтальну поверхню за ДСТУ 9190:2022 [8] були перераховані в сонячну енергію за певний період часу, яка надходить на горизонтальну поверхню для подальшого співставлення з даними з Meteororm [10]. Середньорічна різниця в сумарних сонячних теплонадходженнях на горизонтальну поверхню між поточним періодом та нормативними значеннями з ДСТУ 9190:2022 [8] для Києва та Одеси становить 4 %. Згідно прогнозів Meteororm [10] в період 2020–2100 років кількість сонячних теплонадходжень буде збільшуватись. Наприклад для міста Київ за сценарієм RCP 2.6 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 4,3 % у 2030 році, на 5,7 % у 2050 році та на 6,5 % у 2100 році. За сценарієм RCP 4.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 1,8 % у 2030 році, на 2,8 % у 2050 році та на 4,3 % у 2100 році. За сценарієм RCP 8.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 2,7 % у 2030 році, на 3,8 % у 2050 році та на 4,5 % у 2100 році.

Для Одеси за сценарієм RCP 2.6 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 3,4 % у 2030 році, на 5,7 % у 2050 році та на 5,7 % у 2100 році. За сценарієм RCP 4.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 1,2 % у 2030 році, на 3,1 % у 2050 році та на 4,9 % у 2100 році. За сценарієм RCP 8.5 кількість сонячних теплонадходжень у порівнянні з поточний періодом буде більша на 2,0 % у 2030 році, на 3,5 % у 2050 році та на 5,2 % у 2100 році.

Таким чином, у разі реалізації будь якого сценарію RCP, для обох міст прогнозується стабільне зростання GHI. Найбільше зростання для обох міст в майбутньому буде за сценарієм RCP 2.6, трохи менше за RCP 8.5 і найповільніше за RCP 4.5.



а) Київ



б) Одеса

Рисунок 3 – Помісячна зміна сумарної енергії сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню для міст (а) Києва та (б) Одеси за поточний період, відповідно до DSTU 9190:2022 та відповідно до різних RCP

З аналізу погодинних кліматичних даних про напрямки вітру з бази даних Meteonorm [10] для 25 міст України за поточний та історичний період територію України можна поділити на 4 регіони (рис. 4) з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру, які наведені на рис. 5.

Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 – західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний.

Згідно даних з бази даних Meteonorm [10] за поточний та історичний періоди, а також за 2030, 2050, 2070, 20190, 2100 роки погодинні напрямки вітру є однаковими, також погодинні напрямки вітру є однаковими за 2020, 2040, 2060 та 2080 для міст Києва та Одеси для усіх RCP. Між собою ці дві групи відрізняються на 12–76 годин для Києва та на 2–146 годин для Одеси за різними напрямками в річному розрізі, що в цілому не впливає на визначення переважаючого напрямку вітру.

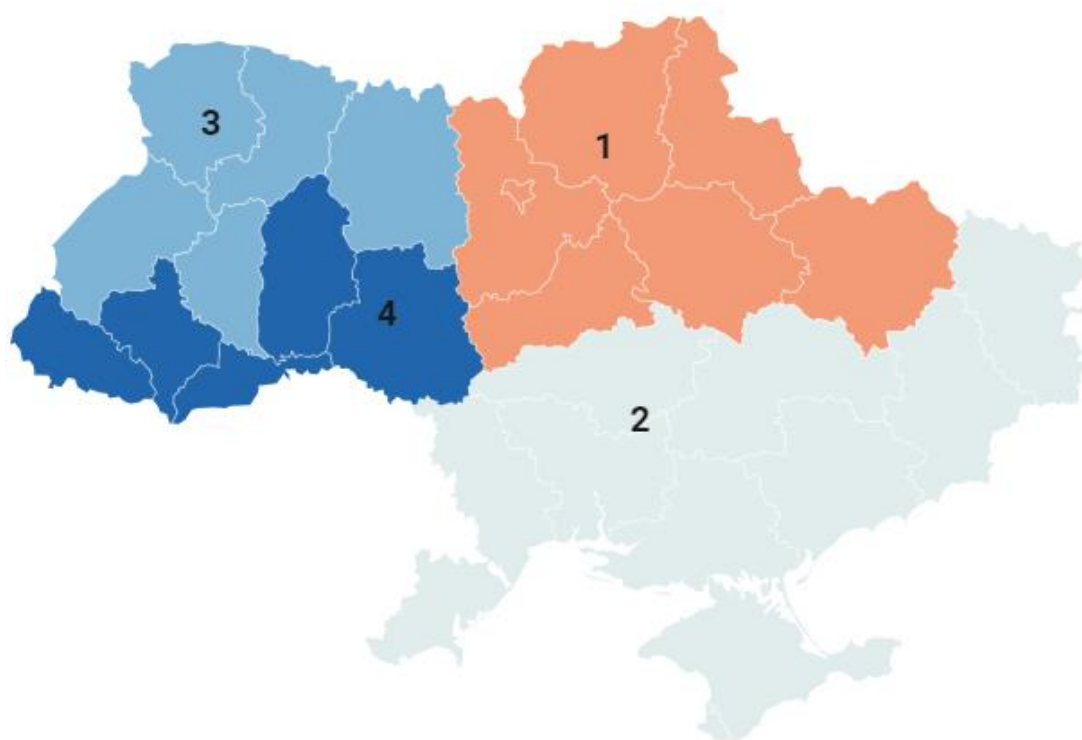


Рисунок 4 – Класифікація регіонів України за переважними напрямками вітру

Як і при аналізі помісячних даних, так і при аналізі погодинних даних швидкості вітру для різних міст за історичний та поточний періоди, встановлено, що для деяких міст, таких як Вінниця, Луцьк, Дніпро, Запоріжжя, Івано-Франківськ та ряду інших міст характерним є збільшення кількості годин з сильнішим вітром. І навпаки, для міст: Київ, Одеса, Харків, Полтава, Житомир та ряду інших міст характерним є збільшення годин зі слабким вітром.

Особливістю кліматологічної бази даних Meteonorm [10] є те, що напрямки та швидкості вітру для січня місяця є однаковими за історичний, поточний періоди, 2020–2100 роки для усіх RCP, і лише починаючи з лютого місяця дані починають різнитися. Згідно опрацьованих погодинних даних за рік, різниця між поточними значеннями кількості годин з певною швидкістю вітру в діапазоні 0–10 м/с та між прогнозованими значеннями може сягати 10 % (RCP 2.6) – 12 % (RCP 8.5), проте середньорічне

значення залишилось незмінним і однаковим з поточного періоду і до 2100 року за різними RCP на рівні 3,3 м/с для Києва і 4,0 м/с для Одеси.



Рисунок 5 – Погодинні напрямки вітру для регіонів України

Екстремальні погодні умови

GHI є фундаментальним параметром при оцінюванні ефективності та надійності роботи фотоелектричних систем, особливо в контексті екстремальних кліматичних умов. Високі значення максимальної годинної сонячної радіації можуть призводити до появи явищ перевипромінювання (overirradiance events) – перевищення проєктних умов роботи фотоелектричних установок, що спричиняє ризики перегріву, втрати ефективності або нестабільної роботи інверторів.

На рис. 6 наведено результати аналізу погодинної зміни сонячної радіації протягом року для горизонтальної поверхні протягом року. Для цього були визначені максимальні значення для кожної доби та встановлено максимально можливий рівень середньогодинного добового випромінювання для 25 міст України за поточний кліматичний період (1996–2015) та для історичного періоду (1961–1990). З рисунку видно наявність суттєвого регіонального розкиду значень, що вказує на неоднорідність сонячного потенціалу в межах території країни.

Загалом, отримані результати підтверджують актуальність регіонально специфічного підходу до планування сонячних енергетичних об'єктів. Так, у містах Луцьк, Ужгород, Полтава спостерігається зниження максимальних значень GHI, в той час в Запоріжжі, Тернополі, Івано-Франківську, Житомирі відбулось зростання пікових значень, що вказує на необхідність врахування ризиків перевантаження систем і впровадження технологічних рішень для захисту обладнання від overirradiance-навантажень.

Для фотоелектричних систем явища перевипромінювання можуть бути критичними, оскільки створюють непередбачувані стрибки напруги, струму і температури, що перевантажують обладнання.

Згідно аналізу погодинних даних за історичний, поточний період та для сценаріїв RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 для міст Києва та Одеси, номінальні середньогодинні

максимуми ГНІ в Україні за ясного неба знаходяться у межах 954–1070 Вт/м² для Одеси, 923–1042 Вт/м² для Києва, що в годинному проміжку не перевищує порогових значень > 1100 Вт/м² [12].

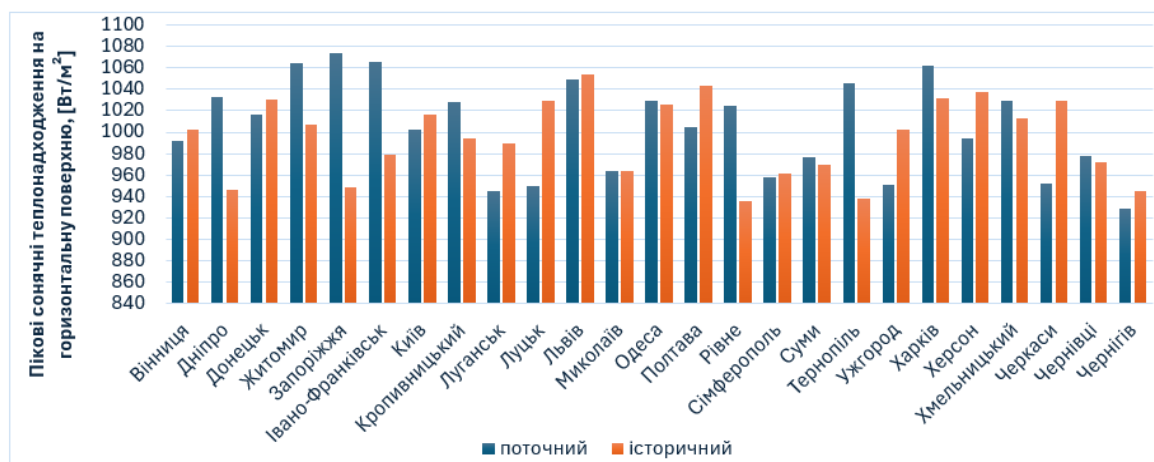


Рисунок 6 – Максимальне середньогодинне сонячне випромінювання ГНІ для міст України

За шкалою Бофорта вітер швидкістю 10,8–13,8 м/с вважається сильним, при 17,2–20,7 м/с ламаються гілки дерев, а від 20,8 м/с починаються штормові руйнівні наслідки. Хоча пориви вітру бувають короткочасні і можуть перевищувати 17,2 м/с та спричиняти руйнівні наслідки.

Міста, де за поточний період часу переважають легкі вітри (0–5,0 м/с) понад 85 % часу за рік – це Житомир, Луганськ, Ужгород, Івано-Франківськ, Черкаси та Полтава. Помірний вітер (5,1–10,0 м/с) найбільше зустрічаються в Сімферополі (30,7 %), Дніпрі (28,8 %), Одесі (27,41 %) та Донецьку (27,41 %). Сильний вітер зі швидкістю 10,1–15,0 м/с найчастіше зустрічається в Сімферополі (868 годин/рік), Дніпрі (199 годин/рік) та Рівному (182 годин/рік). Дуже сильні вітри (15,1–17,0 м/с) зустрічаються в Сімферополі (81 годин/рік), Черкасах (67 годин/рік) та Ужгороді (65 годин/рік). Вітри зі швидкістю понад 17 м/с за поточний період зафіксовані лише у Сімферополі (14 годин/рік).

На підставі погодинного розподілу швидкостей вітру, територію України слід віднести до вітрового класу III або IV за стандартом ДСТУ EN ІЕС 61400-1:2022 [13], що застосовується до проектування вітротурбін. Низька частота сильних вітрів, максимальні значення по Україні, за винятком Сімферополя (20,4 м/с) становлять 13,5–16,8 м/с і переважання слабких режимів (до 5 м/с у 79 % часу по Україні) свідчить про обмежену вітроенергетичну доцільність і мінімальний ризик для конструкцій з точки зору вітрового навантаження.

На основі сценаріїв кліматичних змін RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 для міст Києва та Одеси (рис. 7) проаналізовано прогнозовану кількість годин із сильним вітром у діапазоні 10,1–16,0 м/с до 2100 року.

Результати показують, що незалежно від сценарію більшість значень кількості годин із такими швидкостями вітру залишаються стабільними або змінюються незначно: у межах 75–87 год/рік для Києва та 169–185 год/рік для Одеси. У сценарії RCP 2.6 простерігається тенденція до поступової стабілізації вітрових умов, у той час як у RCP 4.5 можливе незначне зростання тривалості сильного вітру в середині століття.



Рисунок 7 – Погодинні напрямки вітру для регіонів України

Найбільша варіативність спостерігається в сценарії RCP 8.5. За цим сценарієм, попри загалом помірну кількість годин сильного вітру, наявні періодичні коливання, що свідчать про ймовірну зростаючу нестабільність атмосферних процесів. Водночас вітри понад 14 м/с залишаються рідкісними – до 6 разів/рік або рідше для Одеси та раз на рік для Києва або відсутні взагалі по усіх сценаріях і не мають тенденції до зростання.

Загалом, вітрові умови у довгостроковій перспективі залишатимуться переважно безпечними, з незначними змінами, що не впливають суттєво на будівельну безпеку або вітроенергетичну доцільність.

Висновки

За результатами аналізу – річна кількість сонячних теплонадходжень за поточний період в середньому для І температурної зони більша ніж прераховані значення на основі даних з ДСТУ 9190:2022 на 153 (кВт·год/м²), а для ІІ температурної зони більша на 131 (кВт·год/м²). Згідно аналізу погодинних даних GHI з кліматичної бази даних Meteororm для міст Києва та Одеси за різними сценаріями зміни клімату, до 2100 року кількість сонячних теплонадходжень буде зростати. Найбільше зростання GHI для обох міст в майбутньому буде за сценарієм RCP 2.6, трохи менше за RCP 8.5 і найповільніше за RCP 4.5. За результатами досліджень, середньогодинні максимуми GHI в Києві та Одесі не перевищують критичного порогу в 1100 Вт/м.

З аналізу помісячних статистичних даних з бази Meteororm за поточні та історичні періоди, напрямки вітру залишаються незмінними, тоді як швидкість вітру варіюється. При цьому не спостерігається загальної тенденції до збільшення чи зменшення швидкості вітру з часом на території України, оскільки ці зміни є різними для кожного міста. Різниця з нормативних значень та відповідно ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» також є різною для кожного міста.

З аналізу погодинних значень напрямків вітру за поточний період було виділено 4 регіони з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру. Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 – західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний.

Прогнозована динаміка вітрових режимів до 2100 року за сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 не демонструє суттєвого зростання екстремальних значень. Таким чином, вітрові навантаження залишаються на контрольованому рівні, що дозволяє вважати їх несуттєвим обмежувальним фактором для розвитку сонячної енергетики.

Література

1. Yang Y., Javanroodi K., Nik V. Climate change and renewable energy generation in Europe – long-term impact assessment on solar and wind energy using high-resolution future climate data and considering climate uncertainties. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: 10.3390/en15010302.
2. Shanbhag S. S., Dixit M. K. A review of evolving climate and energy economy trends to enhance the dynamic life cycle assessment of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 111. P. 105560. – ISSN 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105560.
3. Рибченко Л. С., Савчук С. В., Тимофеев В. Є., Щеглов О. А. Динаміка фотосинтетично активної радіації за 1986–2015 рр. в Україні. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2022. С. 12–23. DOI: 10.31481/uhmj.30.2022.02.

4. Davy R., Gnatiuk N., Pettersson L., Bobylev L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1652–1659. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.253.

5. Tryhuba A., Bashynsky O., Garasymchuk I., Gorbovy O., Vilchinska D., Dubik V. Research of the variable natural potential of the wind and energy in the northern strip of the Ukrainian Carpathians. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 154. P. 06002. DOI: 10.1051/e3sconf/202015406002.

6. Kozarcanin S., Liu H., Andresen G. B. 21st century climate change impacts on key properties of a large-scale renewable-based electricity system. *Joule*. 2019. DOI: 10.1016/j.joule.2019.02.001.

7. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. 34 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (дата звернення: 25.06.2025).

8. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. На заміну ДСТУ Б А.2.2-12:2015 ; чинний від 2023-03-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 156 с.

9. ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 і таблиці 2 ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.

10. Довідник. Частина I: Програмне забезпечення. *Meteonorm 8. Дані про опромінення для кожного місяця на Землі*. URL: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software (дата звернення: 03.12.2024).

11. Дешко В. І., Білоус І. Ю., Суходуб І. О., Гетманчук Г. О., Крамаренко С. О. Аналіз зміни зовнішньої температури повітря регіонів України зі спеціальним фокусом на можливих екстремальних умовах. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 5. С. 45–56. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.5.5.

12. Chase O. A., Teles M. B., De Jesus dos Santos Rodrigues M., De Almeida J. F. S., Macêdo W. N., Da Costa Junior C. T. A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors*. 2018. Vol. 18, No. 8. P. 2685. DOI: 10.3390/s18082685.

13. ДСТУ EN IEC 61400-1:2022. Системи виробництва енергії вітру. Частина 1. Вимоги до проектування (EN IEC 61400-1:2019, IDT; IEC 61400-1:2019, IDT). На заміну ДСТУ IEC 61400-1:2001 ; чинний від 31.12.2023. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2022.

Bibliography (transliterated)

1. Yang Y., Javanroodi K., Nik V. Climate change and renewable energy generation in Europe – long-term impact assessment on solar and wind energy using high-resolution future climate data and considering climate uncertainties. *Energies*. 2022. Vol. 15. DOI: 10.3390/en15010302.

2. Shanbhag S. S., Dixit M. K. A review of evolving climate and energy economy trends to enhance the dynamic life cycle assessment of buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2024. Vol. 111. P. 105560. ISSN 2210-6707. DOI: 10.1016/j.scs.2024.105560.
3. Rybchenko L. S., Savchuk S. V., Tymofieiev V. Ye., Shchekhlov O. A. Dynamika fotosyntetychno aktyvnoi radiatsii za 1986–2015 rr. v Ukraini. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2022. P. 12–23. DOI: 10.31481/uhmj.30.2022.02.
4. Davy R., Gnatiuk N., Pettersson L., Bobylev L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1652–1659. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.253.
5. Tryhuba A., Bashynsky O., Garasymchuk I., Gorbovy O., Vilchinska D., Dubik V. Research of the variable natural potential of the wind and energy in the northern strip of the Ukrainian Carpathians. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 154. P. 06002. DOI: 10.1051/e3sconf/202015406002.
6. Kozarcenin S., Liu H., Andresen G. B. 21st century climate change impacts on key properties of a large-scale renewable-based electricity system. *Joule*. 2019. DOI: 10.1016/j.joule.2019.02.001.
7. IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report – Summary for Policymakers*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. 34 p. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (data zvernennia: 25.06.2025).
8. DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist budivel. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannia pid chas opalennia, okholodzhennia, ventyliatsii, osvitylennia ta hariachoho vodopostachannia. Na zaminu DSTU B A.2.2-12:2015 ; chynnyi vid 2023-03-01. Vyd. ofits. Kyiv, 2022. 156 p.
9. DSTU-N B V.1.1–27:2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia. Na zaminu SNyP 2.01.01-82 i tablytsi 2 DSTU-N B A.2.2-5:2007 ; chynnyi vid 2011-11-01. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 127 p.
10. Dovidnyk. Chastyna I: Prohramne zabezpechennia. Meteonorm 8. Dani pro oprominennia dlia kozhnoho mistsia na Zemli. URL: https://meteonorm.com/assets/downloads/mn82_software (data zvernennia: 03.12.2024).
11. Deshko V. I., Bilous I. Yu., Sukhodub I. O., Hetmanchuk H. O., Kramarenko S. O. Analiz zminy zovnishnoi temperatury povitria rehioniv Ukrainy zi spetsialnym fokusom na mozhlyvykh ekstremalnykh umovakh. *Tekhnolohii ta inzhynirinh*. 2024. No. 5. P. 45–56. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.5.5.
12. Chase O. A., Teles M. B., De Jesus dos Santos Rodrigues M., De Almeida J. F. S., Macêdo W. N., Da Costa Junior C. T. A low-cost, stand-alone sensory platform for monitoring extreme solar overirradiance events. *Sensors*. 2018. Vol. 18, №8. P. 2685. DOI: 10.3390/s18082685.
13. DSTU EN IEC 61400-1:2022. Systemy vyrobnytstva enerhii vitru. Chastyna 1. Vymohy do proiektuvannia (EN IEC 61400-1:2019, IDT; IEC 61400-1:2019, IDT). Na zaminu DSTU IEC 61400-1:2001 ; chynnyi vid 31.12.2023. DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»), 2022.

УДК 697.132

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, професор, І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
І. О. Суходуб¹, канд. техн. наук, доцент, Г. О. Гетманчук¹, наук. співроб.,
С. О. Крамаренко¹, аспірант, А. В. Гавриш¹, аспірант

АНАЛІЗ ЗМІН СОНЯЧНИХ ТЕПЛОНАДХОДЖЕНЬ І ВІТРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК У РЕГІОНАХ УКРАЇНИ З ФОКУСОМ НА ЕКСТРЕМАЛЬНІ КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

Метою цієї роботи є аналіз змін сонячних теплонадходжень і вітрових характеристик у різних регіонах України на основі історичних, поточних і прогнозованих даних для оцінки потенціалу використання ВДЕ, з урахуванням викликів, пов'язаних з екстремальними кліматичними умовами та потребами в децентралізованому енергозабезпеченні.

Методика включає використання методів синтезу та аналізу кліматичних даних.

Результати включають аналіз та порівняння метеорологічних даних з глобальної кліматичної бази Meteonorm, нормативних показників за ДСТУ 9190:2022, а також кліматичних сценаріїв RCP (2.6, 4.5, 8.5). У цьому дослідженні проаналізовано зміну сонячних теплонадходжень та вітрових характеристик у різних регіонах України. Аналіз здійснено на основі історичних кліматичних даних, метеорологічних даних з бази Meteonorm, нормативних показників за ДСТУ 9190:2022, а також прогнозів відповідно до сценаріїв RCP, що враховують різні рівні глобального потепління.

Встановлено, що для більшості регіонів поточні значення річних сонячних надходжень перевищують нормативні, також у всіх сценаріях кліматичних змін для міст Одеса та Київ передбачається подальше зростання сонячних теплонадходжень на горизонтальну поверхню (GHI) до 2100 року. Середньогодинні максимуми GHI у 25 містах України не перевищують критичного порогу в 1100 Вт/м², проте варто враховувати, що миттєві значення можуть мати більшу величину.

З аналізу погодинних значень напрямків вітру за поточний період було виділено 4 регіони з однаковими погодинними значеннями напрямків вітру. Для 1 регіону переважаючими є західний та південно-західний напрямки вітру, для 2 - західний та північно-західний, для 3 – західний, а для 4 – західний, північно-західний та північний. Встановлено, що для території України характерною є низька частота сильних вітрів, максимальні значення по Україні, становлять 13,5–16,8 м/с. Переважання слабких режимів (до 5 м/с у 79 % часу по Україні) свідчить про обмежену вітроенергетичну доцільність і мінімальний ризик для конструкцій з точки зору вітрового навантаження. Прогнозована динаміка вітрових режимів для міст Києва та Одеси до 2100 року за сценаріями RCP 2.6, RCP 4.5 та RCP 8.5 не демонструє суттєвого зростання екстремальних значень.

Наукова новизна полягає у комплексному порівнянні міжнародних та національних кліматологічних показників GHI та вітрових характеристик у часовій та просторовій динаміці, з урахуванням ризиків, що виникають внаслідок можливих екстремальних погодних умов.

Практична значимість полягає у можливості врахування регіональних кліматичних відмінностей при проектуванні децентралізованих систем енергозабезпечення з використанням ВДЕ на основі історичного, поточного та майбутніх сценаріїв змін клімату.

Ключові слова: кліматичні данні, Meteonorm, GHI, екстремальні погодні умови, швидкість вітру, відновлювані джерела енергії.

V. I. Deshko, I. Y. Bilous, I. O. Sukhodub, H. O. Hetmanchuk, S. O. Kramarenko,
A. V. Gavrysh

**ANALYSIS OF CHANGES IN SOLAR HEAT INCREASES AND WIND
CHARACTERISTICS IN REGIONS OF UKRAINE WITH A FOCUS ON EXTREME
CLIMATE CONDITIONS**

The purpose of the article is to analyze changes in solar heat gains and wind characteristics across various regions of Ukraine based on historical, current, and projected data, in order to assess the potential for using renewable energy sources (RES), considering the challenges associated with extreme climatic conditions and the need for decentralized energy supply.

The methodology includes the application of synthesis and analysis methods for climatic data.

Findings an analysis and comparison of meteorological data from the global Meteonorm climate database, normative indicators according to DSTU 9190:2022, as well as climate scenarios RCP (2.6, 4.5, 8.5). This study analyzes the changes in solar radiation gains and wind characteristics across different regions of Ukraine, based on historical climatic data, Meteonorm meteorological data, national standards, and climate projections reflecting various levels of global warming.

It was found that for most regions, current annual solar radiation values exceed the normative ones. Moreover, under all climate change scenarios for the cities of Odesa and Kyiv, a further increase in the global horizontal irradiance (GHI) is expected by 2100. The average hourly GHI maxima in 25 Ukrainian cities do not exceed the critical threshold of 1100 W/m²; however, potentially hazardous overirradiance events may occur at shorter (minute-scale) intervals and require further investigation.

Based on the analysis of hourly wind direction data for the current period, four regions with similar prevailing wind directions were identified. In Region 1, the dominant wind directions are western and south-western; in Region 2 – western and north-western; in Region 3 – western; and in Region 4 – western, north-western, and northern. It was established that the territory of Ukraine is characterized by a low frequency of strong winds, with maximum wind speeds ranging from 13.5 to 16.8 m/s. The predominance of light winds (up to 5 m/s for 79 % of the time) indicates limited wind energy feasibility and minimal structural risk in terms of wind loads. The projected wind regime dynamics for Kyiv and Odesa up to 2100 under RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenarios do not show a significant increase in extreme values.

Originality is found in the comprehensive comparison of climatic and normative GHI values and wind characteristics across temporal and spatial scales, with consideration of risks arising from potential extreme weather events.

The practical value of the research results lies in the ability to account for regional climatic differences when designing decentralized energy systems based on renewable energy sources (RES), taking into account historical, current, and future climate change scenarios.

Keywords: climate data, Meteonorm, GHI, extreme weather conditions, wind speed, renewable energy sources.