

АНАЛІЗ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕХНІЧНО ДОСЯЖНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЗАСТОСУВАННЯ МАЛИХ ВІТРОВИХ ТА СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК У ЛОКАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ РЕГІОНУ

Отримано 11 серп. 2025 р.; рекомендовано до публікації 09 груд. 2025 р.
Доступно онлайн 31 груд. 2025 р.

Новічонок С. М.¹, Рогозін І. В.², Гнатов А. В.³,
Клец Д. М.⁴, Сокол О. М.⁵, Кравчук А. Д.⁶,
Нечаус А. О.⁷, Сохин А. П.⁸

Автор для кореспонденції: Новічонок Сергій,
e-mail: newhobu4ohok@gmail.com

У статті проведено огляд публікацій, щодо історичного та сучасного досвіду застосування альтернативних джерел енергії на території України, з акцентом на їхнє використання в умовах обмеженого або відсутнього централізованого енергопостачання. Показано, що в умовах надзвичайних ситуацій, спричинених військовими діями, терористичними загрозами або природними катастрофами, традиційна енергосистема може зазнати значних пошкоджень або повного відключення. У таких обставинах альтернативні джерела енергії, зокрема сонячна та вітрова енергетика, можуть стати єдиним доступним джерелом електропостачання для окремих домогосподарств, критичної інфраструктури або соціальних об'єктів.

Обґрунтовано доцільність використання малопотужних вітрових і сонячних установок для автономного електропостачання в сільській або мало забудованій місцевості. Зазначено, що ефективність таких джерел є високочутливою до географічного розташування, рельєфу, кліматичних умов та добових і сезонних коливань природних ресурсів. Наявна довідкова інформація здебільшого орієнтована на великі енергетичні об'єкти й не дозволяє здійснити достовірну оцінку потенціалу для локальних застосувань. У роботі представлено приклад аналізу кліматичних факторів які впливають на величину технічно досяжного потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок на конкретній території Харківської області з урахуванням локальних метеорологічних спостережень, добового й сезонного ходу природних енергоресурсів. Запропонований підхід до аналізу та результати можуть бути використані для оцінки технічно досяжного потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок в подібних регіонах.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, вітрова енергоустановка, сонячна батарея, вітроенергетичний кадастр, хід вітру, добовий хід вітру, технічно досяжний потенціал, сонячна радіація.

1. Вступ

Застосування відновлюваних, або альтернативних джерел енергії останнім часом поширюється на мікро і макrorівнях. Розвиток альтернативної енергетики в Україні відповідає світовим тенденціям. Впровадження альтернативних джерел підтримується на рівні держави, зокрема введено застосування так званого зеленого тарифу [1]. Попри наявні загальнодержавні проблеми підтримка розвитку альтернативної енергетики триває [2]. Питання зменшення енергетичної залежності в

¹ канд. техн. наук, доц.
<https://orcid.org/0000-0003-1269-5797>

² канд. техн. наук, доц.
<https://orcid.org/0000-0003-4126-6705>

³ д-р техн. наук, проф.
<https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

⁴ д-р техн. наук, проф.
<https://orcid.org/0000-0001-7463-1030>

⁵ ст. наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0001-7033-1081>

⁶ нач. наук.-дослід. від.
<https://orcid.org/0000-0002-1032-117X>

⁷ канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

⁸ канд. філос. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

^{1, 2, 5, 6} Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна

^{3, 4, 7, 8} Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

Україні шляхом розробки ефективної програми енергозбереження та розвитку альтернативної енергетики має стратегічне значення.

У період 2023–2024 рр. через пошкодження значної частини генерувальних потужностей національна енергетична компанія «Укренерго» закликає населення придбати генератори електроенергії як превентивний захід проти можливих погодинних (або раптових) відключень електроенергії в зимовий період [3]. Однак зазначимо,

що для багатьох приватних домогосподарств застосування пересувних бензинових або дизельних електричних станцій на постійній основі може виявитися недоступним через постійне зростання цін на енергоносії. Отже, актуальність застосування альтернативних джерел енергії як джерел з потенційно малими експлуатаційними витратами значно зростає. Можна очікувати певне відносне зростання застосування альтернативних джерел енергії в невеликих приватних домогосподарствах, тобто поширення застосування альтернативних міні- та мікроджерел енергії.

Однією з перешкод впровадження альтернативних джерел енергії є нестабільність та певна несвоєчасність надходження енергії з первинних джерел. У великих енергетичних господарствах проблема несвоєчасності надходження енергії вирішується перерозподілом її між споживачами. Підключення мікроджерел до загальної системи може виявитись економічно недоцільним. У поточних умовах, коли національна електромережа перебуває на межі можливостей із забезпечення сталого безперервного постачання електричної та теплової енергії окремому споживачу, подолання зазначеної проблеми лягає на власника альтернативного джерела енергії.

З технічного погляду ця проблема вирішується застосуванням накопичувачів енергії, які повинні вирішувати дві задачі:

- подолання піків споживання;
- накопичення енергії в періоди відсутності її потреби.

Зростання загальної ємності накопичувачів значно підвищує загальну вартість устаткування та негативно впливає та прибутковість використання альтернативної енергії й у певних умовах може зробити їх використання недоцільним. Це здебільшого стосується міні- і мікроджерел через відсутність ефекту масштабування, який спостерігається у великих енергосистемах.

Отже, оцінка потенціалу застосування альтернативного джерела енергії в приватному господарстві потребує детальнішого аналізу. Дослідження, спрямовані на вивчення потенціалу певної локальної території для застосування альтернативних джерел енергії, є актуальними.

2. Аналіз даних літератури та постановка проблеми

Використання відновлюваної енергії є досить популярною темою досліджень, тому кількість публікацій, присвячених ним, дуже велика. Основними та найпродуктивнішими напрямками відновлюваної енергетики в Україні є вітроенергетика, сонячна енергетика, біоенергетика, гідроенергетика та геотермальна енергетика.

Почавши з безпосереднього застосування сонячного світла й тепла, людство перейшло до установок, які перетворюють сонячну енергію на електричну. Саме цей варіант застосування сонячної енергії тепер розглядається як основний варіант її застосування. Наступним відносно широко застосованим відновлюваним джерелом є тепло Землі. Потенціал застосування геотермальної енергії в агропромисловому комплексі України розглянуто в [4].

Досвід та масштаби застосування малої гідро-енергетики, зокрема в Україні, докладно описані в [5]. Зазначається, що відновлювані джерела на основі водних ресурсів мають високий ККД.

Дані багаторічних спостережень за погодою на території України наведені в різноманітних довідниках минулих часів [6] та, зокрема, у [7].

Для оцінки потенціалу отримання відновлюваної енергії корисними також є дослідження властивостей конкретних перетворювачів. Наприклад, у [8, 9] проведено аналіз характеристик сонячної панелі в різних умовах експлуатації, у тому числі у плитах дорожнього покриття.

У цій роботі під установками малої потужності розуміються вітроустановки з діаметром вітроколеса до 10 м і потужністю до 10 кВт, які за призначенням є установками для забезпечення індивідуальних домогосподарств (побутових потреб).

Відповідно до [10], під технічно досяжним потенціалом ВДЕ розуміється частина енергії загального потенціалу, яку можна реалізувати за допомогою сучасних технічних пристроїв. Також у роботі надані рекомендації щодо вибору та використання окремих видів ВДЕ. Серед наведених рекомендацій для оцінки технічно досяжного потенціалу важливо виділити призначення електроустаткування:

- як автономне джерело енергії;
- як резервне джерело енергії за наявності централізованої мережі;
- як установка, що працює на мережу.

Ці варіанти визначають шляхи компенсації незбіжності потоків надходження енергії ВДЕ та її споживання. На наш погляд, слід додати аналіз відповідності динаміки надходження альтернативної енергії очікуваній динаміці споживання (річний, місячний, добовий). Також доцільно виявляти періоди та значення визначених параметрів ВДЕ, коли за наявності енергії через технічні обмеження перетворювача неможливе її споживання. Наприклад, під час оцінки потенціалу використання вітру доцільно вказувати:

- нижню межу швидкості вітру (вітроколесо не обертається);
- верхню межу швидкості вітру (шквальний вітер – вітроколесо переходить у захищене положення);
- зону (діапазон швидкості вітру) найефективнішої роботи.

Так само, оцінюючи можливості перетворення сонячної енергії на електричну, доцільно вказувати межі роботи сонячної батареї залежно від надходження світлового потоку, а також враховувати ефективність роботи батареї за різної температури навколишнього середовища.

Такий аналіз дозволить виявити частку енергії, яка має накопчуватися в системі для компенсації невідповідності періодів надходження та споживання енергії. В авто-

номних джерелах енергії при значній незбіжності часу витрати та споживання енергії потрібна кількість накопичувачів (аккумуляторних батарей) може виявитися чималою. За цих умов витрати на накопичувачі (як капітальні, так і експлуатаційні) можуть виявитись істотними, що також зробить використання установки економічно недоцільним.

Крім того, на результати аналізу може вплинути врахування точного розташування перетворювача енергії на місцевості. Для вітроустановок можливий вплив близькості водойм, лісів, пагорбів, значних висотних споруд тощо [11]. Для геліоустановок – вплив близькості об'єктів, які створюють тінь.

Розглянуті матеріали вказують на те, що:

- взагалі застосування відновлюваних джерел на території України є доцільним, історично підтвердженим як з екологічних міркувань, так і щодо забезпечення енергетичної стабільності, зокрема, приватних домогосподарств;
- у разі значних пошкоджень центральної енергосистеми на тривалий період (у зв'язку з надзвичайними ситуаціями, бойовими діями тощо) застосування ВДЕ для окремих приватних домогосподарств може виявитись єдиним можливим варіантом;
- для України слід передусім розглядати варіанти застосування сонячної, вітрової, геотермальної енергії, енергії малих річок та біоенергетики;
- існує багато готових технічних рішень щодо застосування певного виду енергії, а також гібридних систем;
- за можливості застосування декількох відновлюваних джерел доцільно поєднувати їх в загальну гібридну систему;
- часова та територіальна нестабільність таких видів енергії, як енергія вітру та сонця, є важливими характеристиками для оцінки доцільності їх застосування для малих проєктів, зокрема приватних домогосподарств;
- ведеться робота щодо надання вичерпних вихідних даних для прийняття рішення щодо застосування відновлюваного джерела на певній території. На цей час є можливість оцінити потенціал регіону, області (відносно великої території) щодо застосування певного виду відновлюваної енергії.

Відповідних довідкових матеріалів щодо локальних областей (рівня невеликих міст, селищ, сіл) поки що немає у відкритому доступі.

3. Мета і задачі дослідження

З'ясувати значення показників кліматичних факторів, що мають вплив на величину технічно досяжного потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок у локальній області регіону.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- визначити перелік кліматичних факторів що впливають на потенціал вітрових установок та їх показників;
- визначити перелік кліматичних факторів що впливають на потенціал сонячних енергоустановок та їх показників;
- скласти аналітичний опис за визначеними переліками факторів, призначений для оцінки потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок у локальній області регіону.

4. Матеріали та методи досліджень

Досліджуваною ділянкою регіону була вибрана місцевість поблизу садових товариств неподалік с. Великі Проходи Харківської області (далі будемо називати досліджувану ділянку регіону дослідним полігоном). Дослідження технічно досяжного потенціалу проводили в період з травня 2018 року до травня 2019 року.

Очевидно, що величина технічно досяжного потенціалу має сенс для конкретної енергетичної установки або низки установок. Як приклад було вибрано вітроустановки Flamingo Aero [12]. Для цих установок номінальна швидкість вітру становить 8 м/с. Вітрокоlesa починають обертатись за швидкості 2,5 м/с, а гранична швидкість становитиме 50 м/с. Бажана висота щогли – від 17 до 25 м.

З характеристик Flamingo Aero видно, що за швидкості вітру 5 м/с установки віддаватимуть 25 % встановленої потужності, за швидкості вітру від 6 до 7 м/с – 50 %, від 7 до 8 м/с – близько 75 % і за швидкості близько 8-9 м/с – повну потужність. На ці значення і слід орієнтуватися під час оцінки технічно досяжного потенціалу.

Досліджувана ділянка розташована в зоні лісостепу, у цьому регіоні очікувана середня швидкість вітру близька до 4 м/с. Територія зони лісостепу, що залишається після вилучення лісових ділянок і перешкод антропогенного характеру, є цілком придатною для реалізації економічно ефективних інвестиційних проєктів вітрових енергоустановок (ВЕУ).

У дослідженому регіоні прибирання лісових ділянок і перешкод антропогенного характеру є неприпустимим, і оцінку потенціалу необхідно було провести для ВЕУ з висотою осі ротора не більше 30 м.

Відомо, що енергія вітру пропорційна квадрату його швидкості [1]. Отже, основною характеристикою вітру є його швидкість. Вибір технічних характеристик вітроустановки заздалегідь дозволяє обмежувати опис лише тими значеннями, які вписуються в робочі характеристики установки.

Швидкість вітру має бути оцінена в середньому за рік, за місяць і за добу, що відповідає підходу до оцінки споживання електричної енергії. Для оцінки вітрового потенціалу регіону щодо застосування малої вітроустановки важливо враховувати такі фактори:

- Вітри на малих висотах дують дуже нерівномірно за швидкістю, стабільністю та напрямком. При цьому характер нерівномірності змінюється протягом необхідних періодів оцінювання (рік, місяць, доба).
- Нemoжливiсть значного впливу на ландшафт обмежує використання вітрів певних напрямків, а також іноді спричинює зменшення їх швидкості в певних напрямках.
- Вітроустановка має верхню та нижню межі швидкості вітру.

Для аналізу вітроенергетичного потенціалу місцевості складається сукупність аерологічних і енергетичних характеристик вітру, що об'єднується поняттям вітроенергетичного кадастру. У кадастрі всі характеристики наведені у табличній або графічній формі з використанням матеріалів багатолітніх спостережень.

До основних кадастрових показників вітру належать:

- середньорічна швидкість вітру;
- річний і добовий хід вітру;
- повторюваність швидкостей вітру;
- повторюваність напрямків вітру;
- максимальна швидкість вітру;
- питома потужність і питома енергія вітру (у цій роботі не розглядається).

Основним джерелом вихідних даних для розробки вітроенергетичного кадастру є спостереження за швидкістю вітру на опорній мережі гідрометеослужби. Їх перевагою є те, що вони проводяться за єдиною методикою, а місця (майданчики) проведення спостережень класифіковані за ступенем їх відкритості на місцевості.

Для уточнення інформації також доцільно використовувати дані останнього періоду з найближчих метеостанцій.

Наведені дані метеостанцій належать до періоду з травня 2018 року до травня 2019 року.

Сонячний потенціал місцевості не має такої залежності від локальних географічних умов, як вітровий. Згідно з [4] оцінку сонячного потенціалу на дослідному полігоні можна виконати за даними, що відповідають Полтаві (відстань від околиці міста до зони досліджень близько 140 км). За основний показник сонячного потенціалу взято інтенсивність сонячної радіації. Також визначались кількість днів без сонця та ймовірні проміжки ясного неба. При розгляді показників потенціалу сонячної енергії враховувались характеристики сонячного модуля [8, 14].

5. Результати досліджень

5.1. Середні та середньорічні швидкості вітру

Дані про середньорічні швидкості вітру за 2019 рік отримані з метеостанцій аеропорту Харків (авіаційна станція метеорологічна державна – АСМД) та метеостанції Золочів. Результати обробки рядів спостережень за швидкістю вітру (річний хід вітру) із зазначених метеорологічних станцій, представлені в табл. 1. Для порівняння до таблиці внесено дані, отримані за тривалий період з АСМД, і дані моделі NASA [15].

З аналізу даних, наведених у табл. 1, видно, що значення середньорічної швидкості вітру на дослідницькому полігоні (оцінка за даними метеостанцій) за останній рік нижче, ніж середнє значення за тривалий період. Орієнтуючись на дані табл. 1, можна сказати, що вітроустановки, вибрані для розгляду, в середньому працюватимуть на третину встановленої потужності.

Наступним параметром вітрової обстановки є повторюваність швидкостей вітру. Повторюваність вітрів виражається кількістю випадків у відсотках. Повторюваність розглядається за градаціями швидкості й окремо по кожному сезону. Відповідно до шкали Бофорта, за середньорічними швидкостями вітру, які спостерігаються на дослідницькому полігоні, ці вітри належать до слабких вітрів.

Таблиця 1. Середня місячна та річна швидкість вітру на досліджуваному полігоні за тривалий період та досліджуваний період

	Висота флюгера, м	Середня річна швидкість вітру, м/с	Середня швидкість вітру по місяцях, м/с											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
АСМД (тривал.)	13	5	5,6	5,9	5,9	5,4	5,0	4,3	4,1	3,8	3,9	4,6	5,4	5,8
Золочів	10	2,3	2,3	2,6	2,9	2,5	2,5	2,1	2,0	1,7	2,4	1,8	2,1	2,3
АСМД	13	3,8	4,1	4,1	4,2	3,7	4,0	3,6	3,4	3,1	4,0	3,3	3,7	4,0
NASA	10	3,5	3,6	4,4	3,2	3,8	3,3	3,1	2,5	4,2	3,4	2,8	3,0	3,4

Аналіз даних табл. 1 показує, що близько трьох-чотирьох (літніх) місяців (у різні роки) на рі вибрані установи будуть спроможні видавати не більше 25 % встановленої потужності.

Характерно, що максимум швидкостей вітру для всіх об'єктів припадає на холодну пору року і збігається із сезонним піком споживання теплової й електричної енергії. Мінімум швидкостей вітру для всіх об'єктів припадає на літню пору року. Відповідно до багаторічних спостережень характер зміни середньої швидкості вітру нагадує період синусоїди, тобто відповідає плавній зміні сезонів. Навпаки криві спостереження за 2018–2019 рр. виявляють певне підвищення швидкості вітру в період серпень – жовтень.

5.2. Добовий хід вітру

Наступною характеристикою є добовий хід вітру – зміна середніх швидкостей вітру протягом доби.

На основі ймовірності наявності вітру за градаціями швидкості можна отримати добову тривалість їх впливу на вітроколесо

$$T_{\text{впл.доб}} = \frac{\overline{p(t)\%}}{100} \cdot 24. \quad (1)$$

Графічне представлення ймовірності швидкості вітру за градаціями на відповідних метеостанціях, наведено на рис. 1, 2, 3.

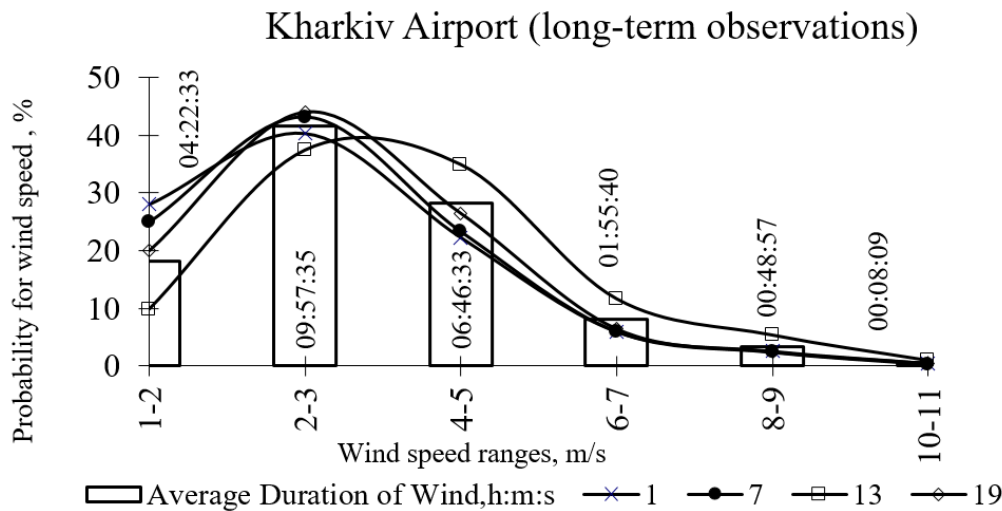


Рис. 1. Імовірність спостереження різних швидкостей вітру (за градаціями) у різні години доби, % та їх розрахункова тривалість по станції АСМД (тривалі спостереження) (м. Харків)

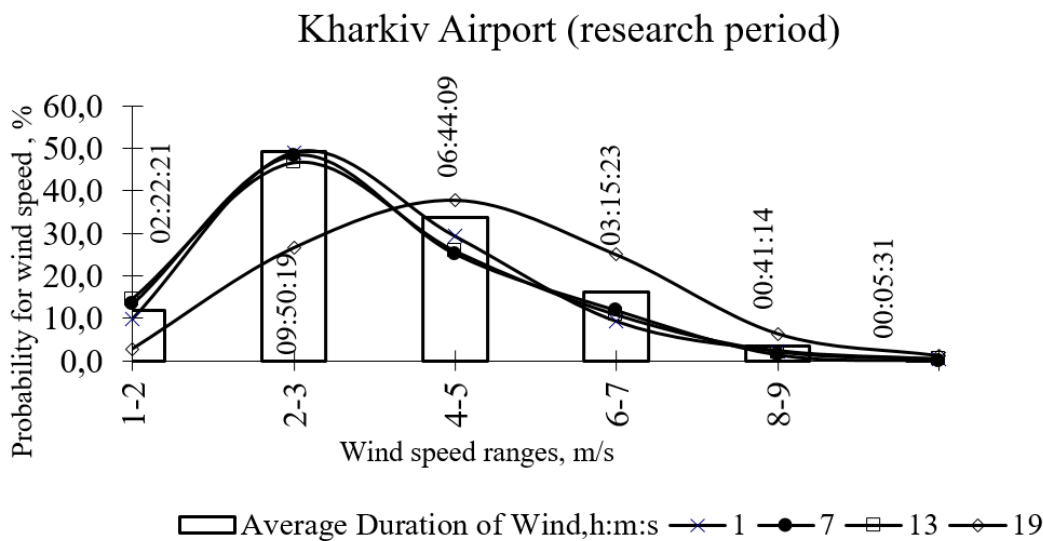


Рис. 2. Імовірність спостереження різних швидкостей вітру (за градаціями) в різні години доби, % та їх розрахункова тривалість по станції АСМД (річні спостереження) (м. Харків)

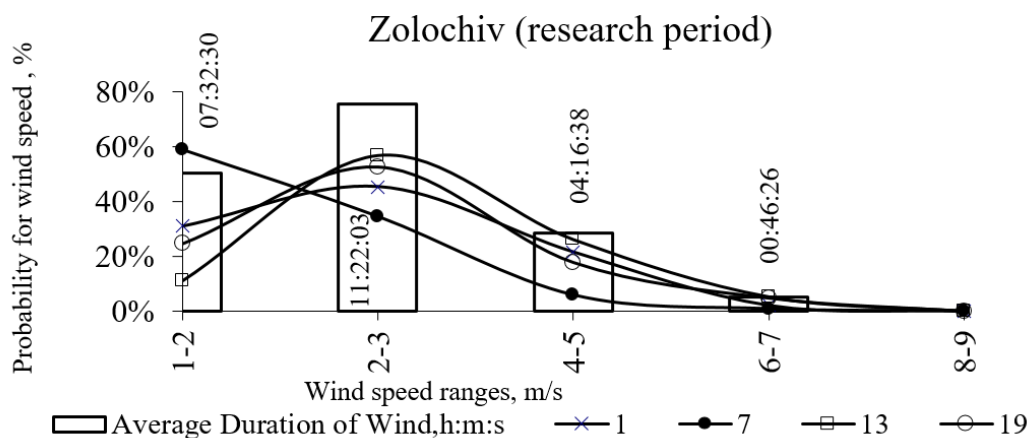


Рис. 3. Імовірність спостереження різних швидкостей вітру (за градаціями) у різні години доби, % та їх розрахункова тривалість по станції м. Золочів (річні спостереження)

З аналізу наведених даних видно, що на дослідницькому полігоні діапазон найімовірніших швидкостей вітру протягом доби – від 2 до 5 м/с. Найтривалішими вітрами є вітри від 4 до 6 м/с. Характер зміни ймовірності спостереження за різними швидкостями по станції АСМД за тривалими та річними спостереженнями в цілому збігається. На графіку річних спостережень можна бачити корисне підвищення тривалості вітрів 6–7 м/с. Водночас відповідно до даних по станції Золочів такі вітри майже не спостерігаються. Співвідношення між градаціями 2–3 м/с та 4–5 м/с у м. Золочів та по станції АСМД показує переважність вітрів 2–3 м/с по станції Золочів.

На рис. 4–6 наведено криві зміни ймовірності спостереження швидкостей вітру від 2 до 6 м/с в різні години доби. Вітри вище за 9 м/с спостерігаються дуже короткий час, а вітри вище за 11 м/с спостерігаються лічені секунди і через інерційність установки не можуть вплинути на генерацію електричної енергії.

Внаслідок аналізу рис. 4–6 можна зробити висновок про те, що час найбільш енергетично корисних швидкостей вітру, з обсягу тих, що зустрічаються найчастіше, спостерігається у денному проміжку доби. Здебільшого пік ймовірності їх спостереження припадає на 13-ту годину.

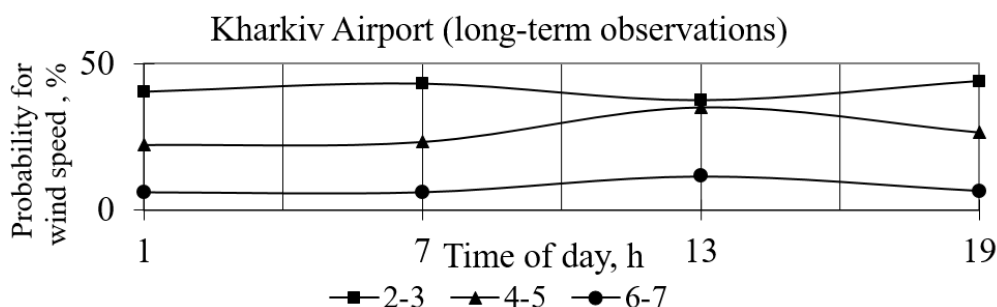


Рис. 4. Імовірність спостереження швидкостей вітру від 2 до 6 м/с в різні години доби, % станції АСМД (тривалі спостереження) (м. Харків)

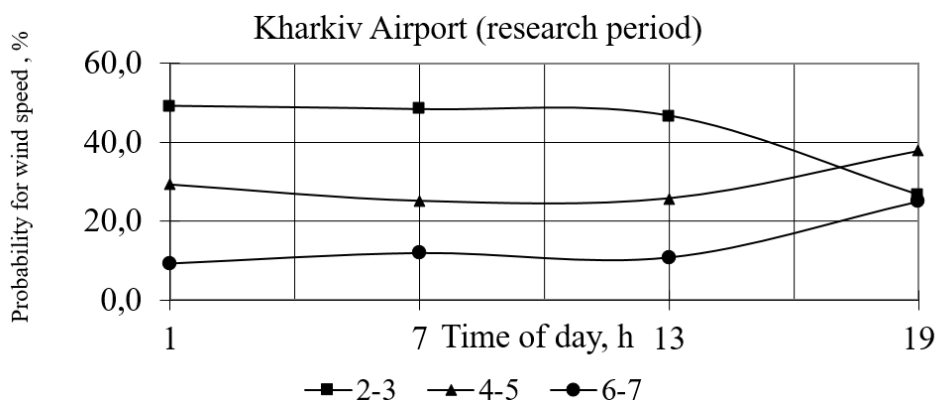


Рис. 5. Імовірність спостереження швидкостей вітру від 2 до 6 м/с в різні години доби, % станції АСМД (річні спостереження) (м. Харків)

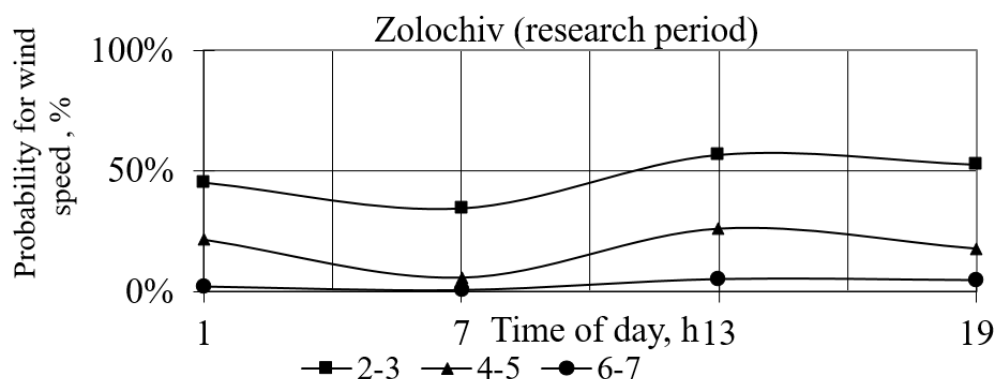


Рис. 6. Імовірність спостереження швидкостей вітру від 2.6 м/с в різні години доби, % по станції м. Золочів (річні спостереження)

5.3. Повторюваність швидкостей та напрямків вітру

Нормальні швидкості вітру для вибраних вітроустановок лежать в діапазоні від 5 до 10 м/с. Тому доцільно проаналізувати рози вітрів, що побудовані з урахуванням лише вітрів зазначеного діапазону. На рис. 7 наведено відповідні річні рози вітрів на досліджуваному об'єкті.

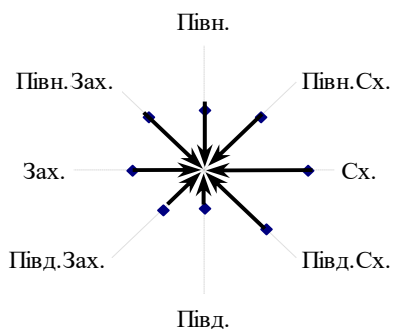


Рис. 7. Повторюваність напрямків вітру по станції АСМД (тривалі спостереження) для вітрів швидкістю 5–10 м/с (9 %– штиль)

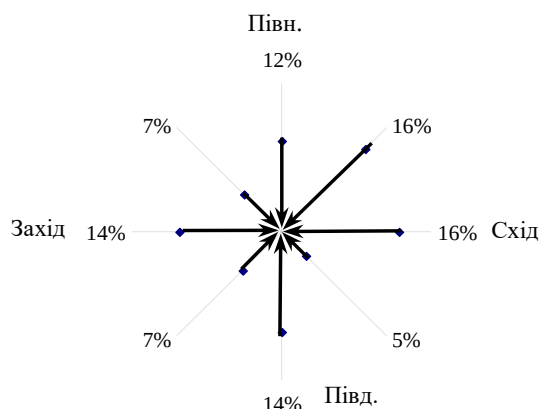


Рис. 8. Повторюваність напрямків вітру по станції АСМД протягом досліджуваного періоду для вітрів швидкістю 5–10 м/с (9 %– штиль)

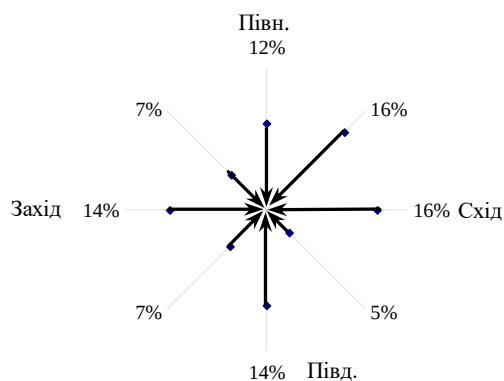


Рис. 9. Повторюваність напрямків вітру по станції Золочів протягом досліджуваного періоду для вітрів швидкістю 5–10 м/с (9 %– штиль)

На рис. 10 для порівняння наведено діаграму повторюваності напрямків вітру по станції АСМД (тривалі спостереження) для всіх вітрів, що спостерігались

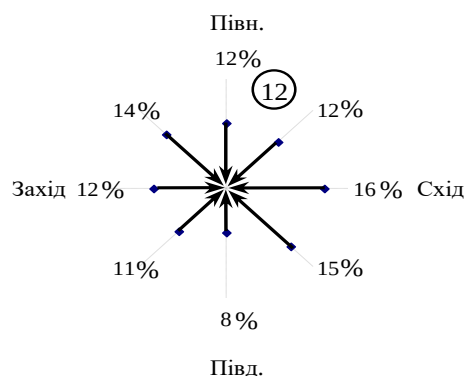


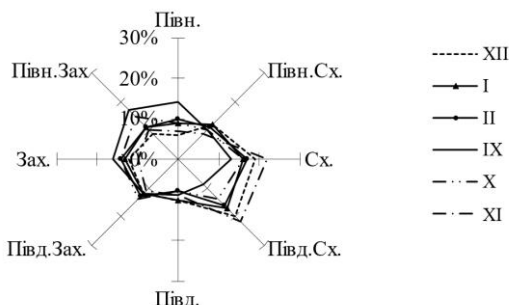
Рис. 10. Повторюваність напрямків вітру по станції АСМД (тривалі спостереження) для всіх вітрів, що спостерігались

Порівнюючи рис. 7 та рис. 10, можна бачити значну різницю по лінії північний захід – південний схід. Це пояснюється спостереженням значної кількості вітрів вище 10 м/с. Зазвичай в атласах наводяться рози вітрів, які

враховують всі спостережені вітри. Як видно з наведеного прикладу, такі рози вітрів не дозволяють зробити точну оцінку для конкретних вітроустановок.

На рис. 11–13 наведено повторюваність напрямків вітру на об'єктах у осінньо-зимовий та весняно-літній періоди для вітрів швидкістю ≥ 10 м/с.

АСМД (тривал.) (осінньо-зимовий період)



АСМД (тривал.) (весняно-літній період)

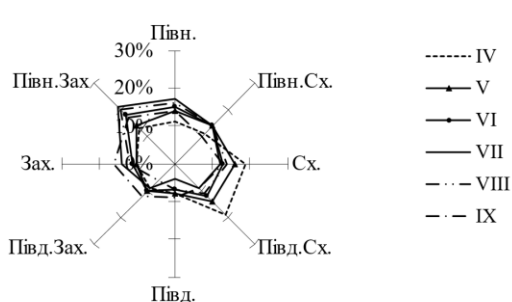
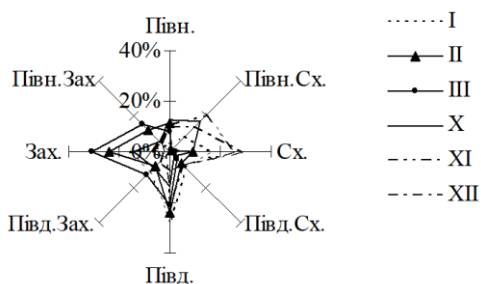


Рис. 11. Повторюваність напрямків вітру за даними АСМД Харків (тривалі спостереження) для вітрів швидкістю 5–10 м/с

Золочів (осінньо-зимовий період)



Золочів (весняно-літній період)

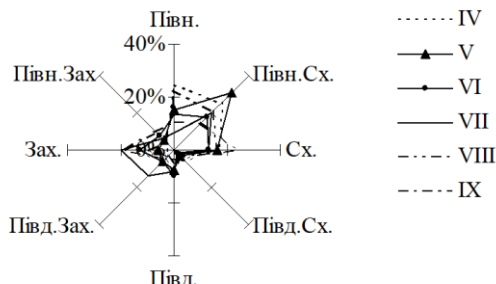
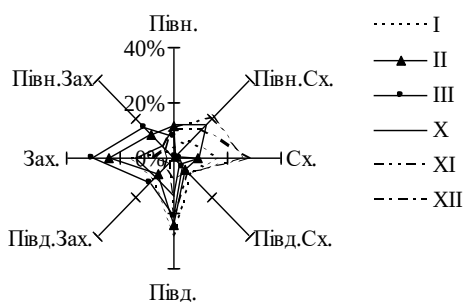
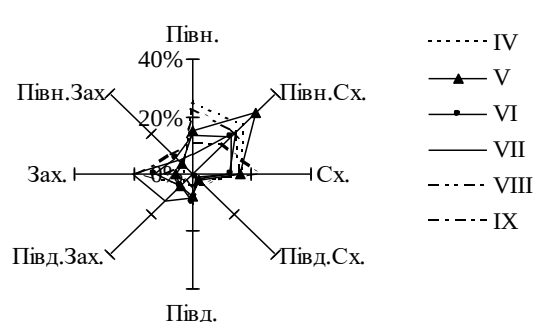


Рис. 12. Повторюваність напрямків вітру за даними ст. Золочів (досліджуваний період) для вітрів швидкістю 5–10 м/с

АСМД (річн.) (осінньо-зимовий період)



АСМД (річн.) (весняно-літній період)



в)

Рис. 13. Повторюваність напрямків вітру за даними АСМД Харків (досліджуваний період) для вітрів швидкістю 5–10 м/с

Аналіз діаграм показує, що основним напрямком вітру в осінньо-зимовий період є схід – захід. У весняно-літній період вплив південно-східних вітрів є порівняним зі східними.

5.4. Аналіз показників надходження сонячної радіації

На рис. 14 наведено залежність інтенсивності сонячної радіації від часу доби по місяцях для об'єктів, які розташовані поблизу м. Харків. Інтенсивності сонячної радіації, що наведені на рис. 14, характерні для середніх значень хмарності за тривалий період. Залежно від хмарності середні місячні інтенсивності можуть відрізнятися від наведених.

Тривалість часу, коли інтенсивність сонячної радіації вище рівня 100 %, є тривалістю часу, коли сонячна панель працює з ККД, що відповідає номінальному значенню. У проміжку між рівнем 100 % (ясно) та рівнем

60 % (легка хмарність) сонячна панель знижує свою перетворювальну здатність до 60 % від номінальної. У проміжку між рівнем 60 % та рівнем 30 % (хмарність)

сонячна панель знижує свою перетворювальну здатність до 30 % від номінальної. Енергією, яка перетворюється батареєю в решту часу, можна нехтувати.

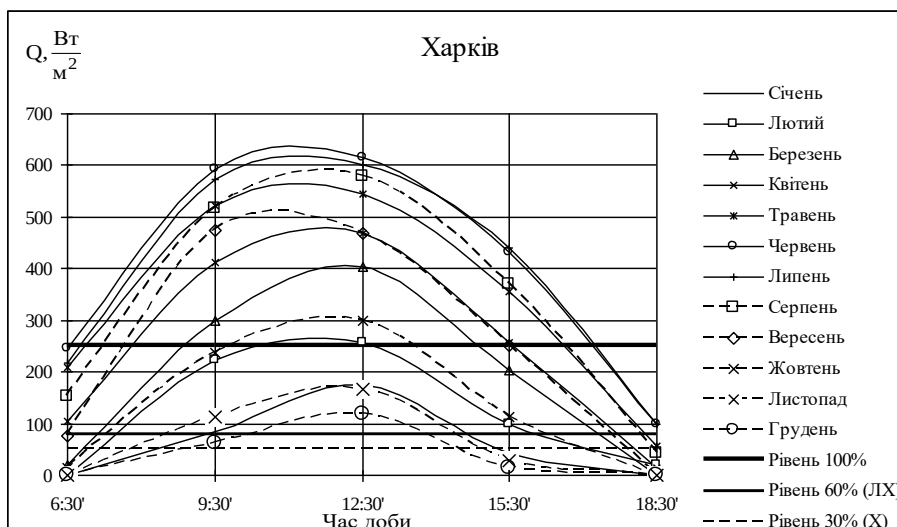


Рис. 14. Залежність інтенсивності сонячної радіації від часу доби по місяцях для об'єктів, які розташовані поблизу м. Харків, $Вт/м^2$

У табл. 2 та 3 наведено потенційну тривалість часу, радіацію на електрику. Дані наведено за трьома рівнями.

Таблиця 2. Тривалість часу перетворення енергії сонячною панеллю (годин на добу), год

Рівень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
100 %	0	2	6	8	10	11	11	9	6	4	0	0
60 %	5	6	4,4	1,6	1,6	2	2	2	3,9	4	5	3
30 %	1,2	1,5	1,3	1	0,8	0,5	0,5	0,8	1	1,3	1,5	1
всього	6,2	9,5	11,7	10,6	12,4	13,5	13,5	11,8	10,9	9,3	6,5	4

Таблиця 3. Тривалість часу перетворення енергії сонячною панеллю (годин за місяцями та на рік), год

Рівень	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Рік
100 %	0	56	186	240	310	330	341	279	180	124	0	0	2046
60 %	155	168	136,4	48	49,6	60	62	62	117	124	150	93	1225
30 %	37,2	42	40,3	30	24,8	15	15,5	24,8	30	40,3	45	31	375,9

За повної хмарності сонячна панель перетворює не більше 3 % енергії, що надходить, тому можна сказати, що коли Сонце повністю закрито хмарами, сонячна панель фактично не є джерелом енергії.

У листопаді, грудні, січні та лютому близько половини місяця сонячна панель майже не буде виробляти

енергію. У березні та жовтні днів з близьким до нульового рівнем генерації енергії буде близько третини. З квітня до вересня включно кількість повністю хмарних днів буде незначною, і ці місяці на досліджуваних територіях можна вважати доцільними для використання сонячної енергії (табл. 4).

Таблиця 4. Кількість днів без сонця

Місяці												Всього
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
19	14	10	3	1	1	1	1	1	7	16	22	96

Сонячне сяйво на дослідному полігоні має рівномірний характер. Більша кількість «ясних» годин спостерігається у середині дня.

Розподіл «ясних» годин по місяцях, наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Імовірні проміжки часу ясного неба

Місяць	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Проміжок часу	10.00-13.00	9.00-13.00	8.00-14.00	7.00-16.00	6.00-16.00	5.00-17.00	5.00-17.00	5.00-17.00	6.00-16.00	8.00-15.00	9.00-13.00	10.00-13.00

6. Обговорення результатів

Отримані результати пояснюються врахуванням місцевих кліматичних та географічних особливостей, що дозволило деталізувати річну та добову динаміку вітрової й сонячної генерації. Значення показників, наведені в таблицях і рисунках, відповідають багаторічним спостереженням, однак уточнені за досліджуваний період, що в подальшому підвищить точність оцінки енергетичного потенціалу.

На відміну від узагальнених підходів у інших джерелах, де розрахунки проводяться за середніми регіональними показниками, у цьому дослідженні використано локальні дані з польових вимірювань, що дало змогу одержати точнішу картину.

Визначення параметрів кліматичних факторів, що впливають на надходження вітрової та сонячної енергії за рік, місяць та добу, в подальшому дозволить безпосередньо зіставляти отримані дані з потрібними графіками навантаження енергоустановки.

Обмеження дослідження полягають у прив'язці до конкретної місцевості та обмеженому часовому періоді спостережень, що слід враховувати при екстраполяції на інші регіони.

Подальший розвиток дослідження може полягати в безпосередній оцінці технічно досяжного потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок у локальній області регіону.

7. Висновки

Проведено аналіз кліматичних факторів, які впливають на величину технічно досяжного потенціалу застосування малих вітрових та сонячних установок у локальній області Харківського регіону. Запропоновано уточнений підхід до аналізу, що враховує як особливості місцевості, її географічного розташування та природних особливостей регіону, так і технічні характеристики енергетичних установок

Встановлено, що на досліджуваній ділянці на висоті застосування малих вітроустановок (10 м) вітер не є сталим і залежить від пори року та часу доби. Найчастіші вітри, що можуть бути використані малою вітроустановкою, мають швидкість 2–3 м/с (близько 11 год на добу) і 4–5 м/с близько (4 год на добу). Відносно потужні технічно припустимі вітри 5–7 м/с (не більше 1 год). Мало-потужні вітри 1–2 м/с від 7 до 8 год на добу). Найпотужніші вітри частіше спостерігаються близько 13-ї години. Основним напрямком вітру у осінньо-зимовий період є схід – захід. Повторюваність напрямків вітрів протягом

року є відносно незмінною. У весняно-літній період вплив південно-східних вітрів є порівнянним зі східними.

Дані, отримані під час оцінки вітрового і сонячного потенціалу, в цілому відповідають усередненим даним для цього регіону, але подані у вигляді, зручному для зіставлення з графіком споживання електричної енергії та з картою місцевості. Дані наводяться саме для енергоустановок малої потужності (наприклад, вітер на висоті 10 м). Наведені таблиці й графіки показують, що відносно невеликий зсув у просторі може мати істотний вплив на значення параметрів (особливо для вітру). Зазвичай рекомендують звертатись до атласів, таких як [10], де наводяться узагальнені дані, до того ж розраховані на потужні енергоустановки (наприклад, дані щодо вітру наводяться для установок з діаметром вітроколеса 126 м). Тобто наявні довідники для енергетиків орієнтовані на промисловий варіант застосування відновлюваної енергії. Такі ресурси, як [15], нібито надають можливість вибрати на карті точку й отримати для неї необхідні параметри. Але насправді дані для Харкова та Золочева не відрізняються, що не відповідає нашим дослідженням. Це підтверджує доцільність проведення досліджень «на місці».

Застосований варіант представлення даних в подальшому дозволить врахувати нерівномірність генерації та використання енергії під час оцінки необхідного обсягу накопичувачів енергії, що своєю чергою буде значно впливати на техніко-економічну оцінку проекту.

Аналіз показників надходження сонячної енергії показав, що кількість годин, коли можна очікувати роботи сонячної батареї на 100 % встановленої потужності, не перевищує 2046 год на рік (близько 23 % річного часу). Ще 1225 год (14 % річного часу) вона буде виробляти від 60 до 100 % номінальної потужності й близько 375 год (близько 4 %) – від 30 до 60 % потужності. Ці дані відповідають ідеальній погоді.

У разі повної хмарності сонячна панель перетворює не більше 3 % енергії, що надходить, тому можна сказати, що коли Сонце повністю закрито хмарами, сонячна панель фактично не є джерелом енергії.

У листопаді, грудні, січні та лютому близько половини місяця сонячна панель майже не буде виробляти енергію. У березні та жовтні днів з близьким до нульового рівнем генерації енергії буде приблизно третина. З квітня до вересня включно кількість повністю хмарних днів буде незначною, і ці місяці на досліджуваних територіях можна вважати доцільними для використання сонячної енергії.

Отримані дані можуть бути використані для оцінки сонячного та вітрового потенціалу місцевостей з умовами, наближеними до умов цього дослідження.

ПОСИЛАННЯ

1. On Alternative Energy Sources : Law of Ukraine on February 20, 2003 № 555-IV // Database «Legislation of Ukraine» / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15> (date of share: July 18, 2025)
2. Renewable energy in Ukraine: current state of affairs. DLF ATTORNEYS-AT-LAW UKRAINE, 6p. Січень 8, 2024 URL: <https://dlf.ua/en/renewable-energy-in-ukraine-current-state-of-affairs/>
3. Уракін М., Федінський О. Аналіз наявних факторів, що впливають на енергетичну систему України та її готовність до зимового періоду 2023/2024 року, Open4Business, 2023 URL: <https://open4business.com.ua/analiz-nayavnyh-faktoriv-shho-vplyvayut-na-energetychnu-systemu-ukrayiny-ta-yiyi-gotovnist-do-zymovogo-periodu-2023-2024-roku/>
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ, 2020 URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
5. World Small Hydropower Development Report 2022. URL: <https://www.unido.org/WSHPDR2022>
6. Кліматологічні дослідження та перспективи їх розвитку URL: <https://www.meteo.gov.ua/ua/Klimatolohichni-doslidzhennya>
7. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/hidrolohichna>
8. Paulus, Antons & Arhun, Shchasiana & Hnatov, Andrii & Dziubenko, Oleksandr & Ponikarovska, Svitiana. (2018). Determination of the best load parameters for productive operation of PV panels of series FS-100M and FS-110P for sustainable energy efficient road pavement. 1-6. 10.1109/RTUCON.2018.8659829. URL: https://www.researchgate.net/publication/331606404_Determination_of_the_best_load_parameters_for_productive_operation_of_PV_panels_of_series_FS-100M_and_FS-110P_for_sustainable_energy_efficient_road_pavement
9. Gnatov, A., Argun, S., & Rudenko, N. (2017, May). Smart road as a complex system of electric power generation. In 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 457-461). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8100531?casa_token=7KmJyq_9e9UAAAAA:6C2xUiSyhJvwPr111bAzAfcEh6FNqnQE61rjZr6DQwKx3h7Nu89fZsxDZCCXyNaY6dKAb6aPVefc
10. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf
11. Ricci A., Kalkman I. M., Blocken B., Repetto M. P., Burlando M., Freda A. Local-scale forcing effects on wind flows in an urban environment // PHYSMOD 2015 – International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena Empa Dübendorf and ETH Zürich, Switzerland, 7th–9th September 2015. Pp. 7–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.08.001>
12. Правильне електроживлення. URL: <https://prel.prom.ua/p617617755-vitrogenerator-flamingo-aero.html>
13. Krawczyk D., Rodero A., Zukowski M., Teleszewski T., Bullejos M. (2019). Bulidings 2020+. Energy sources. URL: https://www.researchgate.net/publication/333699609_Bulidings_2020_Energy_sources
14. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., Romanovs, A. (2020). Development of an unified energy-efficient system for urban transport. 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), 248–253. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9236606>
15. Power Project datasets. Режим доступу до сайту: [https:// power.larc.nasa.gov](https://power.larc.nasa.gov).

ANALYSIS OF CLIMATIC FACTORS AFFECTING THE TECHNICALLY ACHIEVABLE POTENTIAL FOR THE APPLICATION OF SMALL WIND AND SOLAR POWER PLANTS IN THE LOCAL AREA OF A REGION

Received Aug. 11, 2025; accepted Dec. 09, 2025
Available online Dec. 31, 2025

**Novichonok S.¹, Rohozin I.², Hnatov A.³,
Klets D.⁴, Sokol A.⁵, Kravchuk O.⁶,
Nechaus A.⁷, Sokhin P.⁸**

Author for correspondence: Novichonok Serhii,
e-mail: newhobu4ohok@gmail.com

The article provides a review of publications related to the historical and contemporary experience of using alternative energy sources in Ukraine, with an emphasis on their application under conditions of limited or absent centralized energy supply. It is shown that in emergencies caused by military actions, terrorist threats, or natural disasters, the traditional power system may suffer severe damage or a complete shutdown. Under such circumstances, alternative energy sources—particularly solar and wind energy—may become the only available means of electricity supply for individual households, critical infrastructure, or social facilities. The study substantiates the feasibility of using small-capacity wind and solar installations for autonomous power supply in rural or sparsely populated areas. It is noted that the efficiency of such sources is highly sensitive to geographic location, terrain, climatic conditions, and diurnal and seasonal variations of natural energy flows. Existing reference data are generally focused on large-scale energy projects and are insufficient for accurate assessments of technical potential for local applications.

The paper presents an example of analysing climatic factors that influence the technically achievable potential for using small wind and solar installations in a specific area of the Kharkiv region, taking into account local meteorological observations and the daily and seasonal variations of natural energy resources. The proposed approach to analysis and the results can be used to assess the technically achievable potential for deploying small wind and solar installations in similar regions.

Key words: renewable energy sources, wind turbine, solar panel, wind energy cadastre, wind regime, diurnal wind variation, technically achievable potential, solar radiation.

1. Problem statement

Application of renewable or alternative energy sources has recently been expanding at the micro and macro levels. The development of alternative energy in Ukraine is in line with global trends. The introduction of alternative sources is supported at the state level, particularly by the introduction of the so-called “green tariff” [1]. Despite the problems associated with the large-scale invasion of Ukraine by the Russian Federation, support for the development of alternative energy is continued [2]. The issue of reducing energy dependence in Ukraine through the development of an effective energy saving and alternative energy development programme is of strategic importance.

In the period 2023–2024, due to the damage to a significant portion of the generating capacities, the national energy company Ukrenergo calls on the population to purchase power generators as a preventive measure against possible hourly (or sudden) power outages in the winter period [3]. However, it should be noted that for many private households, the use of mobile petrol or diesel power stations on a permanent basis may be unaffordable due to the constant rise in energy prices. Thus, the relevance of alternative energy sources as sources with potentially low operating costs is growing significantly. We can expect a certain relative increase in the application of alternative energy sources in minor private households, i.e., the spread of alternative mini and micro energy sources.

¹ Cand. of Science (Tech), Assoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0003-1269-5797>

² PhD (Engineering)
<https://orcid.org/0000-0003-4126-6705>

³ Dr. of Science (Tech), Prof.
<https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

⁴ Dr. of Science (Tech), Prof.
<https://orcid.org/0000-0001-7463-1030>

⁵ Senior Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-7033-1081>

⁶ Head of Research Department
<https://orcid.org/0000-0002-1032-117X>

⁷ Cand. of Science (Tech), Assoc. Prof.
<https://orcid.org/0000-0001-8833-0802>

⁸ PhD (Philosophy)
<https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

^{1, 2, 5, 6} Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

^{3, 4, 7, 8} Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

One of the difficulties of introducing alternative energy sources is the instability and some intermittency of energy supply from primary sources. In large energy enterprises, the problem of untimely energy supply is solved by redistributing it among consumers. The integration of micro sources into the overall system may prove to be economically impractical. In the current environment, when the national power grid continuous is at the limit of its ability to provide a sustainable, supply of electrical and thermal energy to an individual consumer, the owner of an alternative energy source is responsible for overcoming this problem.

From a technical point of view, this problem is solved by the application of energy storage, which should solve two tasks:

- Overcoming consumption peaks;
- Accumulation of energy during periods when it is not needed.

An increase in the total capacity of energy storage devices significantly raises the overall cost of the equipment and negatively affects the profitability of using alternative energy sources and, in certain conditions, may make their use economically unfeasible. This feature is most important for mini and micro sources due to the lack of the scaling effect observed in large power systems.

Thus, the assessment of the potential for applying an alternative energy source in private households requires a more detailed analysis. Research aimed at studying the potential of a certain local area for the application of mini and micro alternative energy sources is relevant.

2. Analysis of recent research and publications

The use of renewable energy is a fairly popular research topic, so the number of publications devoted to it is very large. The primary and most productive areas of renewable energy in Ukraine are wind energy, solar energy, bioenergy, hydropower, and geothermal energy.

Starting from the direct use of sunlight and heat, humanity moved on to systems that convert solar energy into electricity. This application of solar energy is now considered the primary method for its use. The next widely used renewable energy source is the Earth's heat. The potential for utilizing geothermal energy in Ukraine's agro-industrial complex is discussed in [4].

The experience and scale of small hydropower use, particularly in Ukraine, are described in detail in [5]. It is noted that renewable sources based on water resources have a high efficiency.

Data from long-term weather observations in Ukraine are presented in various historical references [6] and specifically in [7].

For assessing the potential of renewable energy, the research on the properties of specific converters is also valuable. For example, in [8]–[9], an analysis of solar panel characteristics under different operating conditions is carried out, including on road surface plates.

In this study, small power installations refer to wind turbines with a rotor diameter of up to 10 meters and a rated

power of up to 10 kW, designed to supply energy for individual households (domestic needs).

According to [10], the technically achievable potential of RES is understood as the part of the total potential that can be realized using modern technical devices. Recommendations are also provided regarding the selection and use of specific types of RES. Among the recommendations for evaluating the technically achievable potential, it is important to highlight the intended use of electrical equipment:

- as an autonomous energy source;
- as a backup energy source when a centralized grid is available;
- as an installation working with the grid.

These options determine the ways to compensate for the mismatch between the energy flow from RES and its consumption. In our opinion, the analysis should also include the alignment of the dynamics of alternative energy availability with the expected consumption dynamics (annual, monthly, daily). It is also advisable to identify periods and values of certain RES parameters when, due to technical limitations of the converter, energy consumption is not possible even when energy is available.

For example, when evaluating the potential of wind energy, it is useful to indicate:

- the lower wind speed limit (the rotor does not spin);
- the upper wind speed limit (a gale-force wind – the rotor goes into a protected position);
- the zone (wind speed range) for the most effective operation.

Similarly, when assessing the conversion of solar energy into electricity, it is advisable to specify the working limits of the solar panel depending on the incoming light flux, as well as consider the panel's efficiency under various ambient temperatures.

Such an analysis will reveal the share of energy that needs to be stored in the system to compensate for the mismatch between the periods of energy availability and consumption. In autonomous energy sources, with significant mismatches between energy generation and consumption times, the number of accumulators (batteries) required may be considerable. Under these conditions, the costs of accumulators (both capital and operational) may turn out to be significant, making the use of such a system economically unfeasible.

The analysis may also be influenced by considering the exact location of the energy converter in the area. For wind turbines, the results can be affected by the proximity to bodies of water, forests, hills, significant height structures, etc. [11]. For solar installations, the proximity to objects that cast shadows is important.

The materials reviewed suggest that:

- in general, the use of renewable sources in Ukraine is reasonable, historically confirmed, both from ecological

considerations and in terms of ensuring energy stability, particularly for private households;

- in the case of significant damage to the central energy system for an extended period (due to emergencies, military actions, etc.), the use of RES for individual private households may be the only viable option;
- for Ukraine, the primary options should consider solar, wind, geothermal energy, energy from small rivers, and bioenergy;
- there are many ready technical solutions for the application of specific energy types, as well as hybrid systems;
- where multiple renewable sources are available, it is advisable to combine them into a general hybrid system;
- the temporal and territorial instability of such energy types as wind and solar energy is an important characteristic for small renewable energy projects, particularly for private households, for evaluating the feasibility of using these energy types;
- work is underway to provide comprehensive data for making decisions regarding the use of renewable sources in specific areas. Currently, it is possible to assess the potential of a region (province) (for a relatively large area) regarding the use of a particular type of renewable energy. However, relevant reference materials for smaller areas (e.g., small towns, villages, etc.) are not yet available in open access.

3. Goal and Objectives of the Study

To determine the climatic factors that affect the magnitude of the technically achievable potential of small wind and solar installations in a local area of the region.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- to determine the list of climatic factors influencing the potential of wind installations and their indicators;
- to determine the list of climatic factors influencing the potential of solar energy installations and their indicators;
- to prepare an analytical description of the identified factors to evaluate the potential of using small wind and solar installations in a local area of the region.

4. Materials and Methods of Research

The studied area of the region was chosen near the garden communities near the village of Velyki Prokhody in the Kharkiv region. In this article, the studied area will be referred to as the test site. The research on the technically achievable potential was conducted from May 2018 to May 2019.

It is evident that the value of the technically achievable potential makes sense for a specific energy installation or a group of installations. For example, we chose Flamingo

Aero wind turbines [12]. For these turbines, the nominal wind speed is 8 m/s. The wind turbines start spinning at a wind speed of 2.5 m/s, and the maximum wind speed is 50 m/s. The desired tower height is from 17 m to 25 m.

From the characteristics of Flamingo Aero, it can be seen that at a wind speed of 5 m/s, the turbines will generate 25% of their rated power, at wind speeds from 6 m/s to 7 m/s — 50%, from 7 m/s to 8 m/s — nearly 75%, and at wind speeds of 8-9 m/s — full power. These values should be considered when evaluating the technically achievable potential.

The studied area is in the forest-steppe zone, and the expected average wind speed in this region is close to 4 m/s. The area of the forest-steppe that remains after removing forested areas and anthropogenic obstacles is suitable for implementing economically viable wind energy projects.

In the studied region, clearing forest areas and anthropogenic obstacles is unacceptable, so the potential evaluation had to be conducted for wind turbines with a rotor axis height of no more than 30 meters.

It is known that wind energy is proportional to the square of its speed [13]. Therefore, the main characteristic of the wind is its speed. Choosing the technical characteristics of the wind turbine in advance limits the description to only those values that fit the operational characteristics of the installation.

Wind speed should be evaluated annually, monthly, and daily, which corresponds to the approach for evaluating electrical energy consumption. For evaluating the wind potential of the region for small wind turbines, it is important to consider that:

- winds at low heights blow very unevenly in terms of speed, stability, and direction. Moreover, the nature of this unevenness changes over the necessary periods of evaluation (year, month, day);
- the inability to significantly affect the landscape limits the use of winds from certain directions and, in some cases, leads to a decrease in their speed in specific directions.
- the wind turbine has upper and lower wind speed limits.

To analyze the wind energy potential of the area, a set of aerological and energy characteristics of the wind is created, which is combined into the concept of a wind energy cadastre. The cadastre contains all characteristics in tabular or graphical form, using materials from long-term observations.

The main cadastre indicators for wind are:

- annual average wind speed;
- annual and daily wind variations;
- frequency of wind speeds;
- frequency of wind directions;
- maximum wind speed;

- specific power and specific wind energy (not considered in this study).

The primary source of data for developing a wind energy cadastre is wind speed observations from the state hydro-meteorological service's observation network. The advantage of these data is that they are carried out according to a unified methodology, and the locations (sites) of observations are classified by their openness to the terrain.

To refine the data, it is also advisable to use the most recent data from nearby meteorological stations.

The meteorological data refer to the period from May 2018 to May 2019.

The solar potential of the area does not have such dependence on local geographical conditions as wind energy. According to [4], the solar potential in the test site can be estimated based on data corresponding to Poltava (about 140 km from the study zone). The primary solar potential indicator is the intensity of solar radiation. The number of days without sunshine and the probable clear sky intervals were also determined. When considering the solar energy potential indicators, the characteristics of the solar module were taken into account according to [8,14].

5. Research Results

5.1. Average and Annual Wind Speeds

Data on the average annual wind speeds for 2019 were obtained from the meteorological stations at Kharkiv Airport

(State Aviation Meteorological Station (SAMS)) and the Zolochiv meteorological station.

The results of the processing of wind speed observation series (annual wind cycle) from the mentioned meteorological stations are presented in Table 1. For comparison, Table 1 also includes data obtained over a long period from the ASMDS (Aviation Meteorological Station of the State Meteorological Service) and NASA model data [15].

From the analysis of the data shown in Table 1, it is evident that the average annual wind speed at the research polygon (based on meteorological station data) for the last year is lower than the long-term average value. Based on the data from Table 1, it can be concluded that the wind turbines chosen for consideration will operate at approximately one-third of their rated capacity on average.

The next parameter of wind conditions is the frequency of wind speeds. The frequency of winds is expressed in the number of occurrences as a percentage. The frequency is analyzed by speed gradations and separately for each season. According to the Beaufort scale for the average annual wind speeds observed at the research site, these winds are classified as light winds.

Analysis of the data in Table 1 shows that for about three to four (summer) months each year (depending on the year), the selected installations will be able to deliver no more than 25% of the rated capacity.

Table 1. Average monthly and annual wind speeds at the research site for a long period and the last year

	Weathervane height, m	Average annual wind speed, m/s	Average wind speed by month, m/s											
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
SAMS (cont.)	13	5	5.6	5.9	5.9	5.4	5.0	4.3	4.1	3.8	3.9	4.6	5.4	5.8
Zolochiv	10	2.3	2.3	2.6	2.9	2.5	2.5	2.1	2.0	1.7	2.4	1.8	2.1	2.3
SAMS	13	3.8	4.1	4.1	4.2	3.7	4.0	3.6	3.4	3.1	4.0	3.3	3.7	4.0
NASA	10	3.5	3.6	4.4	3.2	3.8	3.3	3.1	2.5	4.2	3.4	2.8	3.0	3.4

It is characteristic that the maximum wind speeds for all sites occur during the cold season and coincide with the seasonal peak in thermal and electric energy consumption. The minimum wind speeds for all sites occur during the summer season. According to long-term observations, the variation of the average wind speed resembles a sinusoidal period, that is, it corresponds to the smooth change of seasons. In contrast, observation curves for 2018–2019 show a certain increase in wind speed during the August–October period.

5.2 Daily Wind Cycle

The next characteristic is the daily wind cycle – the change in average wind speeds during the day.

Based on the probability of wind occurrence by speed gradations, one can determine the daily duration of their impact on the wind wheel

$$T = \frac{\overline{p(t)\%}}{100} \times 24 \quad (1)$$

The graphical representation of wind speed probability by gradations at the respective meteorological stations is shown in Figures 1, 2, and 3.

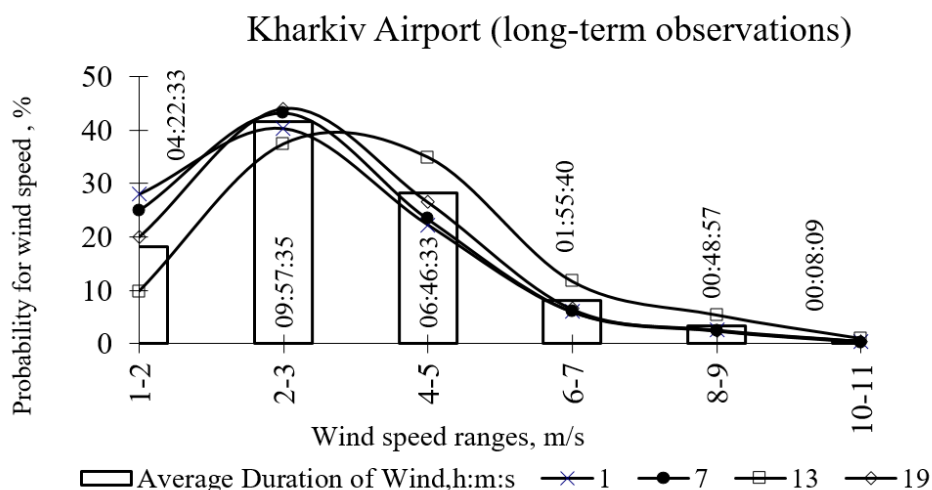


Fig. 1. Probability of observation of different wind speeds (by gradations) at different hours of the day, % and their estimated duration at the SAMS station (continuous observations) (Kharkiv)

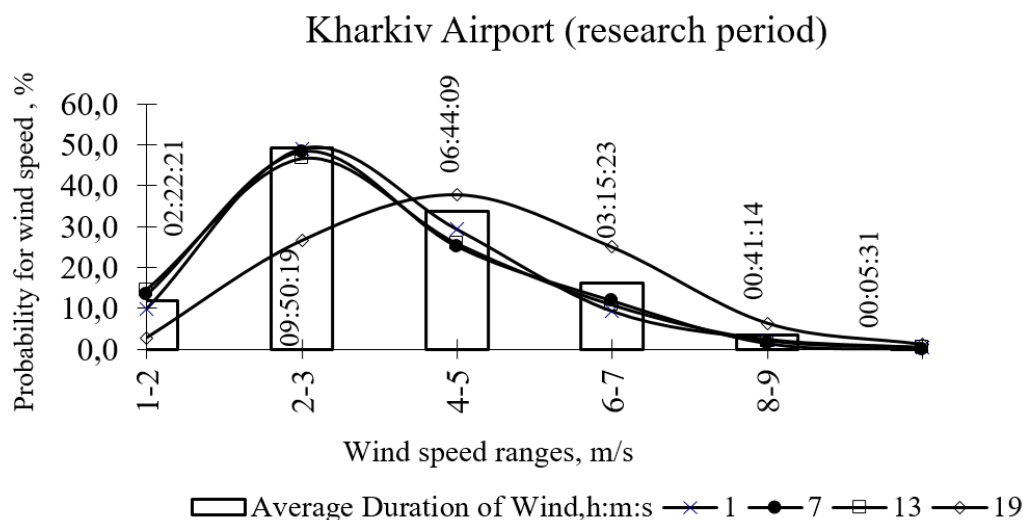


Fig. 2. Probability of observation of different wind speeds (by gradations) at different hours of the day, % and their estimated duration at the SAMS station (continuous observations) (Kharkiv)

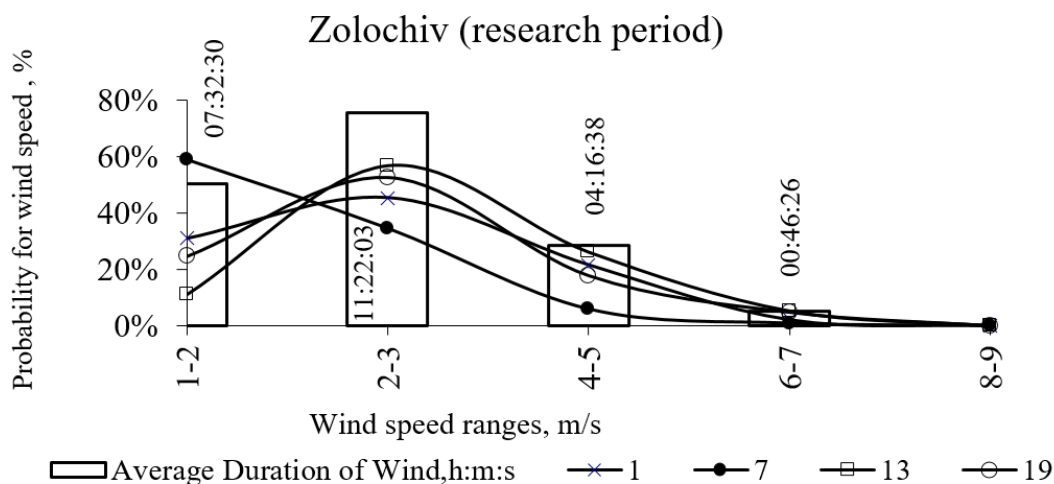


Fig. 3. Probability of observing different wind speeds (by ranges) at various hours of the day, % and their calculated duration at the Zolochiv station (annual observations)

Analysis of the presented data shows that at the research site, the most probable wind speeds during the day range from 2 m/s to 5 m/s. The longest-lasting winds are in the range of 4 m/s to 6 m/s. The pattern of probability distribution for different wind speeds at the ASMD station, based on both long-term and annual observations, generally coincides. On the annual observation graph, a noticeable increase in the duration of winds of 6–7 m/s can be seen. At the same time, according to the data from the Zolochiv station, such winds are almost not observed. The ratio between the 2–3 m/s and 4–5 m/s ranges at Zolochiv and the ASMD station shows the predominance of 2–3 m/s winds at the Zolochiv station.

Figures 4, 5, and 6 present the probability curves of observing wind speeds from 2 m/s to 6 m/s at different hours of the day. Winds above 9 m/s are observed for a very short time, while winds above 11 m/s occur for only a few seconds and, due to the inertia of the installation, cannot influence electricity generation.

From the analysis of Figures 4–6, it can be concluded that the period of the most energetically useful wind speeds, among those most frequently encountered, is observed during the daytime hours. In most cases, the peak probability of their occurrence falls at 1 p.m.

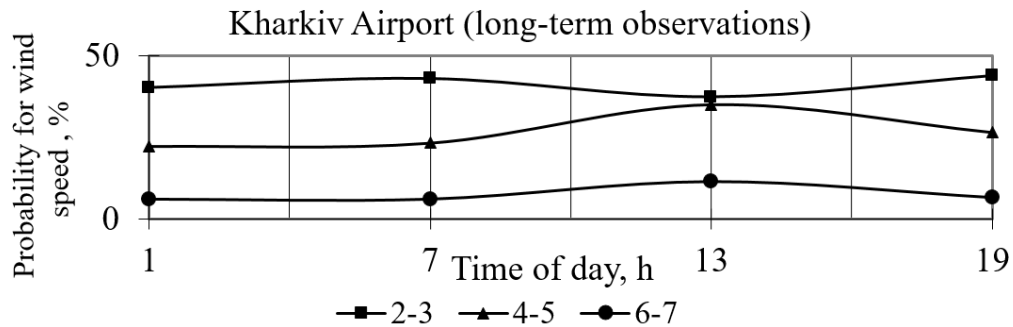


Fig. 4. Probability of observing wind speeds from 2 m/s to 6 m/s at different hours of the day, % at the ASMD station (long-term observations) (Kharkiv)

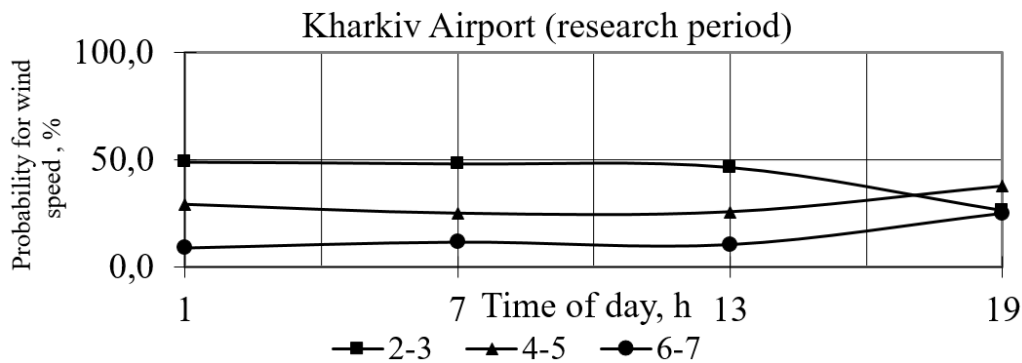


Fig. 5. Probability of observing wind speeds from 2 m/s to 6 m/s at different hours of the day, % at the ASMD station (annual observations) (Kharkiv)

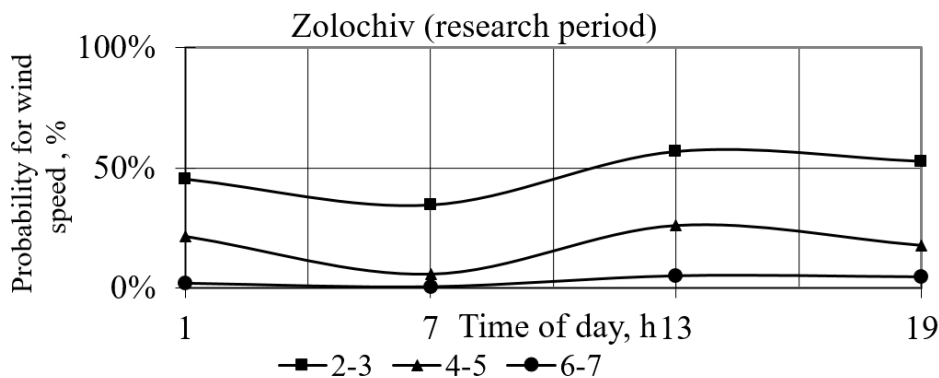


Fig. 6. Probability of observing wind speeds from 2 m/s to 6 m/s at different hours of the day, % at the Zolochiv station (annual observations)

5.3 Recurrence of Wind Speeds and Directions

The normal wind speeds for the selected wind installations fall within the range of 5 m/s to 10 m/s. Therefore, it is reasonable to analyze the wind roses constructed taking into account only winds within this range. Figure 7 presents the corresponding annual wind roses for the studied site.

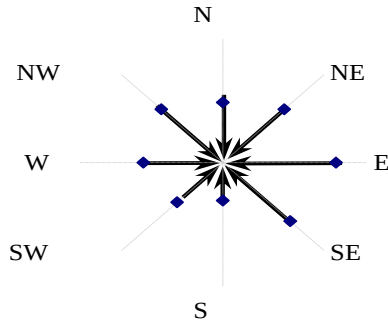


Fig. 7. Recurrence of wind directions at the ASMD station (long-term) for winds with speeds of 5–10 m/s

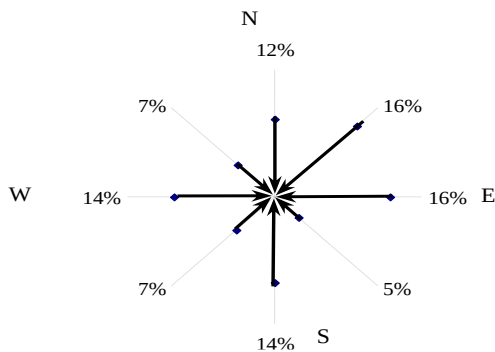


Fig. 8. Recurrence of wind directions at the ASMD station during the studied period for winds with speeds of 5–10 m/s (9% calm conditions)

SAMS (cont.) (autumn-winter)

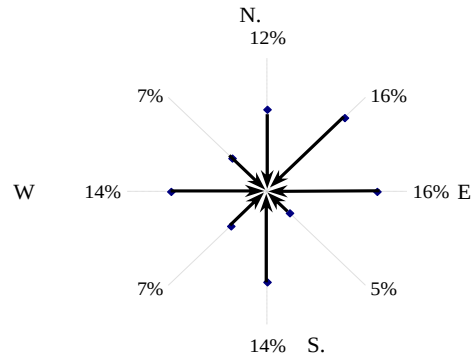
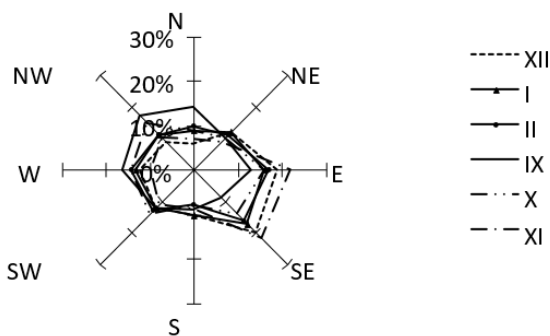


Fig. 9. Recurrence of wind directions at the Zolochiv station during the studied period for winds with speeds of 5–10 m/s (9% calm conditions)

For comparison, Fig. 10 shows the diagram of wind direction recurrence at the ASMD station (long-term observations) for all observed winds.

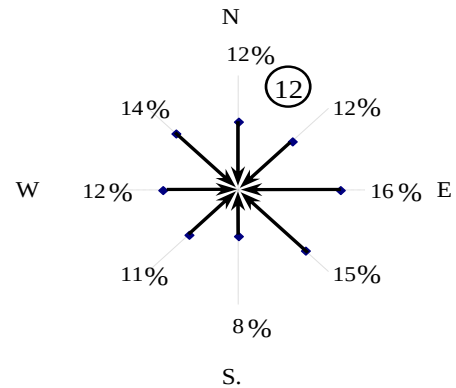


Fig. 10. Recurrence of wind directions at the ASMD station (long-term) for all observed winds

Comparing Figures 7 and 10, a significant difference can be seen along the northwest–southeast line. This is explained by the observation of a considerable number of winds above 10 m/s. Typically, wind atlases present wind roses that take into account all observed winds. As shown in the example above, such wind roses do not allow for an accurate assessment for specific wind installations.

Figures 11–13 present the recurrence of wind directions at the sites during the autumn–winter and spring–summer periods for winds with speeds of 5–10 m/s.

SAMS (cont.) (spring-summer)

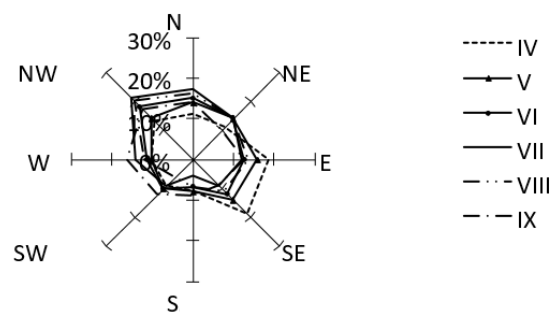


Fig. 11. Recurrence of wind directions based on ASMD Kharkiv data (long-term observations) for winds with speeds of 5–10 m/s

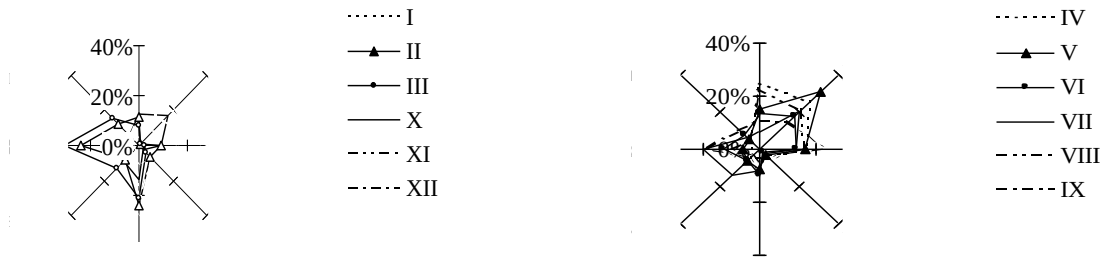
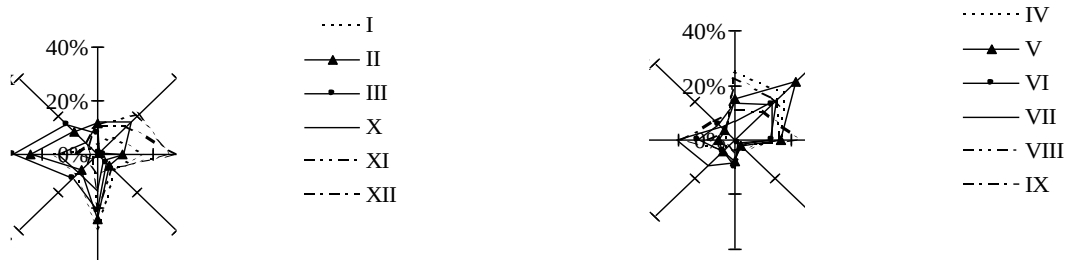


Fig. 12. Recurrence of wind directions based on Zolochiv station data (study period) for winds with speeds of 5–10 m/s

SAMS (ann.) (autumn-winter)

SAMS (ann.) (spring-summer)



В)

Fig. 13. Recurrence of wind directions based on ASMD Kharkiv data (study period) for winds with speeds of 5–10 m/s

The analysis of the diagrams shows that the main wind direction during the autumn–winter period is “east–west.” In the spring–summer period, the influence of southeastern winds is comparable to that of eastern winds.

5.4 Analysis of Solar Radiation Indicators

Figure 14 shows the dependence of solar radiation intensity on the time of day by month for sites located near Kharkiv. The solar radiation intensities presented in Figure 14 are characteristic of average cloudiness over a long period.

Depending on cloud cover, the average monthly intensities may differ from those shown.

The period during which solar radiation intensity exceeds 100% corresponds to the time when a solar panel operates at an efficiency equal to its nominal value. In the range between 100% (clear sky) and 60% (light cloudiness), the solar panel reduces its conversion efficiency to 60% of the nominal. In the range between 60% and 30% (cloudy), the solar panel reduces its conversion efficiency to 30% of the nominal. The energy converted by the panel during the remaining time can be neglected.

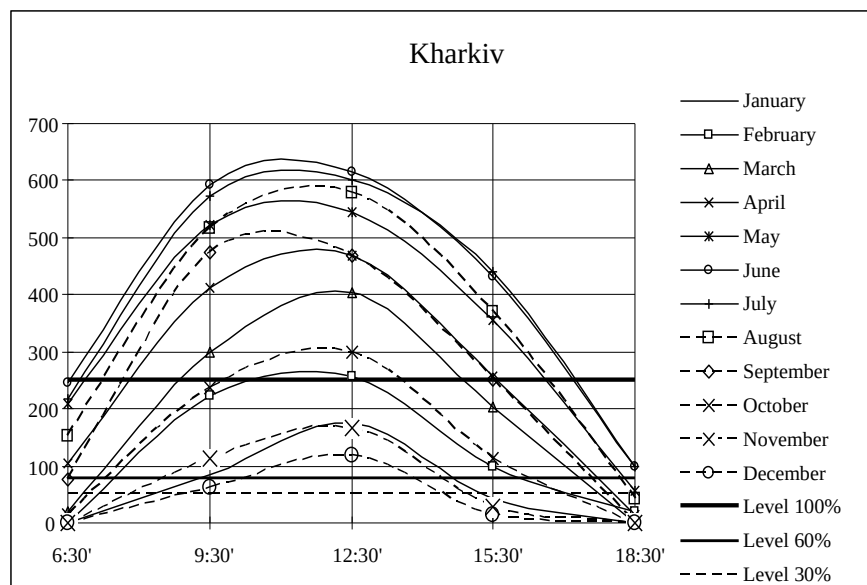


Fig. 14. Dependence of solar radiation intensity on the time of day by month for sites located near Kharkiv, W/m²

Tables 2 and 3 present the potential period during which a solar panel is capable of converting solar radiation into electricity. The data are provided for three levels.

Table 2. Duration of energy conversion time by a solar panel (hours per day), h

Level	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
100%	0	2	6	8	10	11	11	9	6	4	0	0
60%	5	6	4,4	1,6	1,6	2	2	2	3,9	4	5	3
30%	1,2	1,5	1,3	1	0,8	0,5	0,5	0,8	1	1,3	1,5	1
Total	6,2	9,5	11,7	10,6	12,4	13,5	13,5	11,8	10,9	9,3	6,5	4

Table 3. Duration of energy conversion time by a solar panel (hours per year), h

Level	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
100%	0	56	186	240	310	330	341	279	180	124	0	0	2046
60%	155	168	136,4	48	49,6	60	62	62	117	124	150	93	1225
30%	37,2	42	40,3	30	24,8	15	15,5	24,8	30	40,3	45	31	375,9

Under full cloud cover, a solar panel converts no more than 3% of the incoming energy, so it can be said that when the sun is completely obscured by clouds, the solar panel is effectively not a source of energy.

In November, December, January, and February, for about half of each month, the solar panel will produce almost no

energy. In March and October, days with near-zero energy generation will account for about one-third of the month. From April through September inclusive, the number of fully overcast days is insignificant, and these months can be considered suitable for solar energy use in the studied areas (Table 4).

Table 4. Number of sunless days

Months												Total
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
19	14	10	3	1	1	1	1	1	7	16	22	96

The solar light at the research site is uniform. A greater number of 'clear' hours is observed in the middle of the

day. The distribution of 'clear' hours by month is given in Table 5.

Table 5. Probable time intervals of clear sky

Month	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Time interval	10:00 AM-01:00 PM	09:00 AM-01:00 PM	08:00 AM-02:00 PM	07:00 AM-04:00 PM	06:00 AM-04:00 PM	05:00 AM-05:00 PM	05:00 AM-05:00 PM	05:00 AM-05:00 PM	06:00 AM-04:00 PM	08:00 AM-03:00 PM	09:00 AM-01:00 PM	10:00 AM-01:00 PM

6. Discussion of Results

The obtained results are explained by considering local climatic and geographical features, which enabled a detailed analysis of the annual and daily dynamics of wind and solar generation. The values of the indicators presented in the tables and figures correspond to long-term observations, but have been refined for the studied period, which will further improve the accuracy of energy potential assessment.

Unlike generalized approaches found in other sources, where calculations are based on average regional indicators, this study uses local data from field measurements, which made it possible to obtain a more accurate picture. Determining the parameters of climatic factors that affect the availability of wind and solar energy on a yearly, monthly,

and daily basis will allow direct comparison of the obtained data with the required load profiles of the power unit.

The limitations of the study include its attachment to a specific locality and the limited observation period, which should be taken into account when extrapolating to other regions. The further development of the research may involve the direct assessment of the technically achievable potential of small wind and solar installations in the local area of the region.

7. Conclusions

An analysis of climatic factors influencing the technically achievable potential of small wind and solar installations in the local area of the Kharkiv region has been carried out. An improved analytical approach is proposed, which

considers not only the features of the locality, its geographical position, and natural conditions of the region, but also the technical characteristics of energy installations.

It has been established that, in the studied area, at the height of small wind installations (10 m), wind is not constant and depends on the season and time of day. The most frequent winds usable by small wind installations have speeds of 2–3 m/s (about 11 hours per day) and 4–5 m/s (about 4 hours per day). Relatively strong technically permissible winds of 5–7 m/s occur for no more than one hour. Low-power winds of 1–2 m/s last from 7 to 8 hours per day. The strongest winds are most often observed around 1 p.m. The main wind direction during the autumn–winter period is “east–west.” The recurrence of wind directions throughout the year is relatively constant. In the spring–summer period, the influence of southeastern winds is comparable to that of eastern winds.

The data obtained in the assessment of wind and solar potential generally correspond to averaged data for this region, but are presented in a form convenient for comparison with electricity consumption profiles and with the local map. The data are provided specifically for small-scale energy installations (e.g., wind at a height of 10 m). The presented tables and graphs show that even a relatively small spatial shift can significantly affect parameter values (especially for wind). Typically, reference is made to atlases such as [10], which provide generalized data, calculated for large-scale energy installations (for example, wind data given for wind turbines with a rotor diameter of 126 m). In other words, available handbooks for energy specialists are oriented toward industrial-scale renewable energy applications. Resources such as [15] ostensibly allow a point on the map to be selected and the necessary parameters obtained. However, in practice, the data for Kharkiv and Zolochiv do not differ, which does not correspond to our findings. This confirms the expediency of conducting on-site studies.

The applied method of data presentation will make it possible to take into account the unevenness of energy generation and consumption when assessing the required capacity of energy storage systems, which in turn will significantly affect the techno-economic evaluation of the project.

The analysis of solar energy inflow indicators showed that the number of hours when a solar panel can be expected to operate at 100% of its installed capacity does not exceed 2,046 hours per year (about 23% of annual time). For another 1,225 hours (14% of annual time), it will produce from 60% to 100% of nominal capacity, and for about 375 hours (about 4%) from 30% to 60% of capacity. These data correspond to ideal weather conditions.

Under full cloud cover, a solar panel converts no more than 3% of incoming energy, so it can be said that when the sun is completely obscured by clouds, the solar panel is practically not a source of energy.

In November, December, January, and February, for about half of each month, the solar panel will produce almost no

energy. In March and October, days with nearly zero generation will account for about one-third of the month. From April through September inclusive, the number of completely overcast days will be insignificant, and these months, in the studied areas, can be considered suitable for the use of solar energy.

The obtained data can be used to assess the solar and wind potential of areas with conditions similar to those of this study.

REFERENCES

1. On Alternative Energy Sources: Law of Ukraine from February 20, 2003 № 555-IV // Database "Legislation of Ukraine" / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/555-15> (accessed: July 18, 2025)
2. Renewable Energy in Ukraine: Current State of Affairs. DLF ATTORNEYS-AT-LAW UKRAINE, 6 pages. January 8, 2024. URL: <https://dlf.ua/en/renewable-energy-in-ukraine-current-state-of-affairs/>
3. M. Urakin, O. Fedinskyi. Analysis of Existing Factors Affecting Ukraine's Energy System and Its Readiness for the Winter Period of 2023/2024. Open4Business, 2023. URL: <https://open4business.com.ua/analiz-nayavnyh-faktoriv-shho-vplyvayut-na-energetychnu-systemu-ukrayiny-ta-yiyi-gotovnist-do-zymovogo-periodu-2023-2024-roku/>
4. Atlas of the Renewable Energy Potential of Ukraine, Kyiv 2020. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas.pdf>
5. World Small Hydropower Development Report 2022. URL: <https://www.unido.org/WSHPDR2022>
6. Climatological Research and Prospects for Its Development. URL: <https://www.meteo.gov.ua/ua/Klimatolohichni-doslidzhennya>
7. Central Geophysical Observatory Named After Borys Sreznevskiy. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/hidrolohichna>
8. Paulus, Antons, Arhun, Shchasiana, Hnatov, Andrii, Dziubenko, Oleksandr, Ponikarovska, Svitiana. (2018). Determination of the Best Load Parameters for Productive Operation of PV Panels of Series FS-100M and FS-110P for Sustainable Energy Efficient Road Pavement. Pages 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659829>
9. Gnatov, A., Argun, S., Rudenko, N. (2017, May). Smart Road as a Complex System of Electric Power Generation. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 457–461. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8100531>

10. Renewable Energy Sources / Edited by S.O. Kudria. – Kyiv: Institute of Renewable Energy of NASU, 2020. – 392 pages. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf
11. Ricci A., Kalkman I.M., Blocken B., Repetto M.P., Burlando M., Freda A. Local-Scale Forcing Effects on Wind Flows in an Urban Environment. PHYSMOD 2015 – International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena, Empa Dübendorf and ETH Zürich, Switzerland, 7th–9th September 2015, pp. 7–9. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.08.001>
12. Proper Power Supply. URL: <https://prel.prom.ua/p617617755-vitrogenerator-flamingo-aero.html>
13. Krawczyk D., Rodero A., Zukowski M., Teleszewski T., Bullejos M. (2019). Buildings 2020+. Energy Sources. URL: https://www.researchgate.net/publication/333699609_Bulidings_2020_Energy_sources
14. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., Romanov, A. (2020). Development of a Unified Energy-Efficient System for Urban Transport. 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), pp. 248–253. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9236606>
15. Power Project Data Sets. Access mode: <https://power.larc.nasa.gov>