

О. А. Шевчук,*доктор економічних наук, професор,*

ORCID 0000-0003-4117-1474,

e-mail: shevchuk.olena@lil.kpi.ua,

М. О. Черняєв,*магістрант*

ORCID 0009-0008-9027-9151,

e-mail: olhaklymovych@ukr.net,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПЕРСПЕКТИВИ ПОБУДОВИ ТА РОЗВИТКУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ МІКРОМЕРЕЖ

Постановка проблеми. Починаючи з 2014 року, енергетична безпека України почала зазнавати значних проблем. Головними чинниками цього стали тривалі переговори щодо ціни на природний газ, втрата державного контролю над територією Автономної Республіки Крим та військові дії у східній частині країни. Зокрема, у Донецькому вугільному басейні суттєво скоротився видобуток вугілля через затоплення значної кількості шахт та масштабне руйнування енергетичної і транспортної інфраструктури. Як наслідок, країна зіткнулася з серйозними логістичними труднощами, які ускладнили процес постачання енергоресурсів кінцевим споживачам.

З лютого 2022 року повномасштабна російська військова агресія ще більше загострила ситуацію. Безперервні ракетні та безпілотні атаки на об'єкти критичної енергетичної інфраструктури по всій Україні спричинили значні пошкодження та руйнування електростанцій, підстанцій та енергорозподільних мереж. Внаслідок цього було не лише порушено енергопостачання на внутрішньому ринку, але й виникли серйозні проблеми з забезпеченням стабільності в регіональних енергетичних системах [1].

Зазначені процеси спричинили початок нових змін в енергетичній політиці України, зумовивши потребу в пошуку альтернативних джерел енергії, диверсифікації каналів постачання та формуванні ефективних механізмів підвищення стійкості енергетичного сектору до зовнішніх та внутрішніх загроз шляхом формування та розвитку децентралізованої енергетичної системи.

Аналіз та дослідження публікацій. Перспективи створення децентралізованої енергетичної системи в Україні стали предметом уваги науковців, зокрема, з точки зору її ефективності, економічної доцільності та спроможності забезпечити енергетичну безпеку в умовах сучасних геополітичних викликів. Особливої актуальності ці питання набули в контексті триваючого бойових дій, які серйозно впли-

нули на функціонування енергетичної інфраструктури країни.

Письменна, Кривда та Трипольська (2024) дослідили вплив державних механізмів на розвиток альтернативної енергетики, акцентуючи на важливості підтримки домогосподарств-прос'юмерів, стимулюванні децентралізації енергетичної системи та необхідності вдосконалення нормативно-правової бази для зменшення залежності від централізованих постачальників, особливо в умовах війни [2]. На думку А. Лісового (2024), енергетичній безпеці України серйозно загрожує залежність від імпортованих енергоресурсів та наявність морально та фізично застарілої інфраструктури. Автор підкреслює, що підвищення енергетичної незалежності шляхом диверсифікації джерел та інвестування у внутрішні ресурси має вирішальне значення для стабілізації енергетичного сектору в умовах війни та після її завершення [3]. О. Дьяченко (2024) наголошує на тому, що інвестиції в сонячну енергетику можуть значно зменшити залежність від імпортованого вихопного палива, що забезпечує стабільне довгострокове енергопостачання. Автор зазначає, що війна зумовила потребу в інвестиціях у відновлювані технології, які необхідні для забезпечення енергетичної інфраструктури, а сонячна енергетика є однією з ключових альтернатив для досягнення енергетичної незалежності та сталого розвитку [4]. Є. Руднев та Ю. Романченко (2024) стверджують, що втілення smart grid-рішень може підвищити ефективність та надійність розподілу електроенергії, особливо в повоєнний період, коли об'єкти інфраструктури зазнали значних пошкоджень. Розумні мережі можуть забезпечити більше ефективне управління відновлюваними джерелами енергії, сприяючи підвищенню надійності функціонування енергосистеми [5].

Мета статті. Водночас, недостатньо уваги придіється аналізу шляхів проектування та побудови нової децентралізованої енергетичної системи Ук-



раїни на основі microgrid, яка зможе забезпечити необхідні виробничі потужності та високий рівень енергетичної безпеки в умовах сучасної політичної ситуації, що визначило мету статті.

Виклад основного матеріалу. Українська енергетична мережа, яка ще до початку війни демонструвала обмежену масштабність, недостатню ефективність управління та недосконалість систем моніторингу й контролю, вже тоді мала труднощі з підтриманням стабільності роботи, що проявлялося у перевантаженнях, енергетичних втратах та нестабільності постачання. Однак, системні руйнування та цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру внаслідок російської агресії значно посилили ці проблеми, що виявило вразливість централізованої енергетичної системи. Зокрема, за даними Моніторингової місії ООН з прав людини, станом на літо 2024 року було втрачено щонайменше 18 гігават генерувальних потужностей, половина з яких була знищена лише протягом літніх місяців [6].

Варто зазначити, що до 2022 року Україна виробляла приблизно 44 ГВт доступної електроенергії, більше половини якої надходило з ядерних джерел. Вугілля було джерелом близько 23% генерації в країні, за ним йдуть природний газ (9%), гідроелектростанція (6,5%), сонячна (4%) і вітрова (2%) [7]. Однак сьогодні Запорізька атомна електростанція, найбільша атомна електростанція країни, перебуває під російською окупацією, лише через що генеруючі потужності України зменшилися на 6 гігават [8]. Сотні тисяч ліній розподілу електроенергії, підстанцій і високовольтних трансформаторів були зруйновані, а електростанції всіх видів залишаються цілями під час ракетних ударів, а спроби відновити централізований сектор, що базується на викопному паливі чи атомній енергетиці, чреваті військовими ризиками, повільним прогресом, високими витратами для держави та недостатньою привабливістю для приватних інвесторів, які обережно ставляться до вразливих, високоризикових активів.

Крім того, вітчизняна енергетика має суттєві проблеми, які полягають як у незадовільному стані технічного оснащення – використовується в основному старе, зношене і малоефективне обладнання, так і у негативних тенденціях щодо зростання дефіцитності вітчизняних первинних енергоресурсів. Не варто забувати, що відбудова енергетичної інфраструктури країни потребує великих коштів. Згідно з дослідженням Київської школи економіки, «загальні збитки, завдані енергетичному сектору України, перевищують 56 мільярдів доларів, включаючи 16 мільярдів доларів прямого фізичного знищення та понад 40 мільярдів доларів непрямих фінансових збитків» [9].

З огляду на суттєві втрати генеруючих потужностей, руйнування критичної інфраструктури та високі ризики, пов'язані з централізованою енергетичною системою, постає нагальна потреба у роз-

робці децентралізованої енергетичної моделі, яка забезпечить гнучкість, стійкість до зовнішніх загроз та привабливість для інвестицій в умовах сучасної політичної та економічної ситуації. У даному контексті йдеться про концепцію Microgrid.

Microgrid – це локалізована та автономна енергетична система, яка може працювати незалежно від основної енергосистеми (режим off-grid) або як керований об'єкт по відношенню до основної енергосистеми (режим on-grid). Вона складається з розподілених енергетичних ресурсів (РЕР), таких як сонячні фотоелектричні станції, вітрові турбіни, системи зберігання, такі як акумулятори і звичайні генератори, всі вони інтегровані і управляються за допомогою передових програмних засобів і комунікаційних технологій. Мікромережі можуть обслуговувати невелике енергетичне співтовариство, комплекс будівель або навіть окремий будинок і можуть працювати в автономному режимі або паралельно з основною електромережею.

По суті, будь-яка система мікромереж (ММ) складається з наступних частин: генерація, система накопичення енергії, система енергоменеджменту (EMS), навантаження, контролер, точка загального приєднання (рис. 1).

Як можна побачити з рисунку, система генерації мікромережі може складатися з різних диспетчеризованих і недиспетчеризованих генераторів. Існує цілий ряд диспетчеризованих генераторів, таких як генератори природного газу, біогазу та комбіноване виробництво тепла та електроенергії (ТЕЦ). Недиспетчеризовані джерела включають відновлювані джерела, такі як сонячна енергія, вітер, гідроенергія, біопаливо тощо. Система накопичення енергії (ESS) виконує безліч функцій в ММ, таких як забезпечення якості електроенергії, зменшення пікових навантажень, регулювання частоти, згладжування виробітку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та забезпечення резервного живлення для системи. ESS також відіграє вирішальну роль в оптимізації витрат на ММ. EMS забезпечує розумне управління ММ за допомогою лічильників енергії та засобів зв'язку. Вона контролює генерацію та диспетчеризацію навантаження на основі економічних критеріїв та критеріїв надійності. На ТЕС є два основних типи навантажень: (i) критичні навантаження, які необхідно обслуговувати за будь-яких умов, та (ii) відкладені навантаження, які можна регулювати для балансування навантаження ТЕС, а отже, для досягнення найбільш економічного виробництва електроенергії. Контролер ММ контролює миттєву роботу системи. Точка загального приєднання (ТЗП) є важливим компонентом, оскільки вона виступає в якості фізичної точки з'єднання між ММ та основною мережею. Він слугує інтерфейсом, де відбувається обмін електричною енергією між ММ та більшою енергосистемою. Центр управління електропостачання (ЦУЕ) включає в себе різноманітне обладнання та пристрої для полегшення з'єднання, обміну

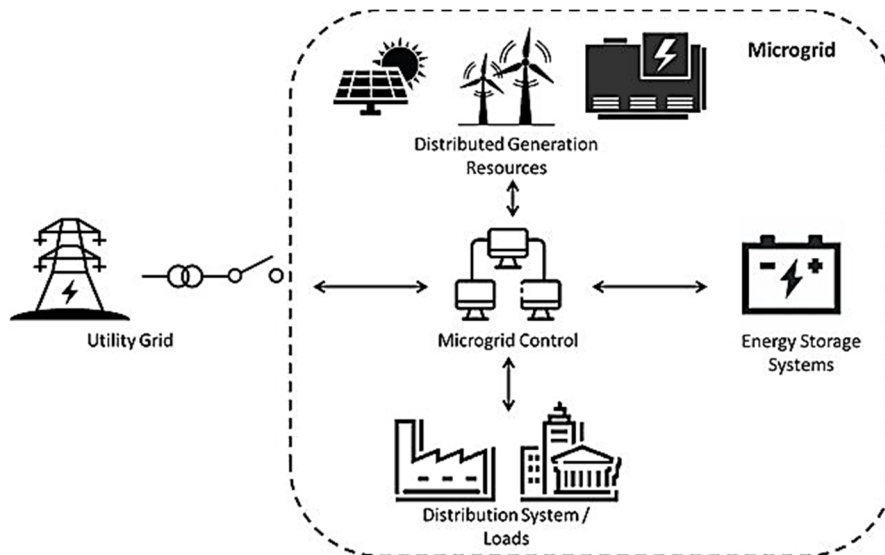


Рис. 1. Компоненти базової архітектури мікромережі [10]

електроенергією, управління та захисту між МГ та основною мережею. Сюди входять такі компоненти, як автоматичні вимикачі, захисні реле та обладнання для синхронізації.

При цьому, концепція Microgrid має ряд незаперечних переваг, що робить це рішення придатним для української енергетичної системи:

Надійність електропостачання. Мікромережа може забезпечити надійне джерело електроенергії в районах з частими перебоями в електропостачанні або ненадійною мережевою інфраструктурою. Завдяки власним генеруючим потужностям та накопичувачам енергії мікромережа може забезпечити постійне живлення критично важливих навантажень.

Економія витрат на електроенергію. Мікромережа може допомогти вам оптимізувати витрати на електроенергію, використовуючи комбінацію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна або вітрова енергія, паливні елементи та системи зберігання енергії. Зменшуючи залежність від традиційних джерел викопного палива, мікромережа може допомогти знизити витрати на електроенергію та покращити ваш прибуток.

Екологічна стійкість. Мікромережа може зменшити ваш вуглецевий слід, генеруючи та зберігаючи відновлювану енергію на місці. Це допоможе вам досягти цілей сталого розвитку та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Енергетична незалежність. Мікромережа може забезпечити енергетичну незалежність, дозволяючи вам генерувати та зберігати власну енергію. Це може бути особливо корисно у віддалених місцях, де доступ до електромережі може бути обмеженим або взагалі відсутнім.

Стійкість. Мікромережа може забезпечити стійкість до стихійних лих, екстремальних погодних умов або інших перебоїв в роботі мережі. Завдяки власним можливостям генерації та зберігання, мікромережа може продовжувати забезпечувати елект-

роенергією критично важливі навантаження навіть тоді, коли велика мережа виходить з ладу.

Електрифікація ізольованих районів. Наразі 975 міст в Україні не мають доступу до електроенергії, отже, ізольована мікромережа може стати рішенням цієї проблеми [6].

Варто зазначити й те, що microgrids є ключовим компонентом сучасних енергетичних систем, особливо в інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, сонце, гідро та біомаса. Ці децентралізовані енергетичні системи є дуже гнучкими, допускаючи як диспетчерські, так і недиспетчерські генератори, що робить їх ідеальними для розміщення різноманітних відновлюваних джерел енергії. Джерела з диспетчеризацією, такі як генератори природного газу та біогазу, можуть забезпечити стабільне електропостачання, реагуючи на коливання попиту, тоді як джерела без диспетчеризації, як-от сонячна, вітрова, гідро- та біомаса, залежать від умов навколишнього середовища. Ці джерела енергії за своєю суттю є змінними, що створює проблему для стабільності мережі. Однак мікромережі використовують системи накопичення енергії (ESS) для управління цими коливаннями, накопичуючи надлишкову енергію, коли вироблення високе (наприклад, у сонячні або вітряні дні), і розряджаючи його, коли вироблення мало, таким чином забезпечуючи стабільне постачання. Система управління енергією (EMS) мікромережі відіграє вирішальну роль в інтеграції та оптимізації виробництва енергії з цих різноманітних джерел. Він координує роботу різних генераторів на основі економічних критеріїв і критеріїв надійності, забезпечуючи ефективний розподіл енергії та скорочуючи експлуатаційні витрати. Наприклад, він може віддавати перевагу використанню недорогих джерел з низьким рівнем викидів, таких як вітер і сонце, у періоди високої генерації, і переходити на більш надійні джерела, такі як біогаз або природний газ, коли відновлювані джерела не-

доступні. Ще більше підвищуючи ефективність системи, точка спільного зв'язку (РСС) з'єднує мікромережу з основною мережею, забезпечуючи двонаправлений потік енергії. Це з'єднання гарантує, що надлишок енергії з відновлюваних джерел може надходити до ширшої мережі під час періодів високої генерації, тоді як мікромережа може отримувати з основної мережі, коли місцевого виробництва відновлюваних джерел недостатньо. Удосконалене захисне та синхронізаційне обладнання в Централізованому управлінні електропостачанням (CPSC) забезпечує безпечний та ефективний обмін енергією між мікромережею та більшою мережею. У цьому контексті інтеграція джерел енергії вітру, сонця, гідроенергії та біомаси в мікромережі являє собою стійкий і стійкий підхід до виробництва енергії. Використання систем накопичення енергії та систем управління енергією надає можливість цим відновлюваним джерелам стати більш надійними, підтримуючи перехід до більш екологічної та децентралізованої енергетичної інфраструктури.

Зауважимо й на те, що сьогодні у більшості розвинених країн світу використання відновлюваних джерел енергії є одним із основних пріоритетів розвитку енергетики, що обумовлено необхідністю усунення енергетичної нестабільності країн, пов'язаної з енергетичними кризами, та зменшення обсягів шкідливих викидів, що утворюються в процесі використання традиційних енергоносіїв. Зокрема, США, Німеччина, Іспанія, Швеція, Данія, Японія планують у першій половині XXI ст. довести частку ВДЕ у власному загальному енергобалансі до 50%. У 2009 р. країни-члени Європейського енергетичного співтовариства досягли згоди щодо імплементації Директиви ЄС 2009/28/ЄС із розвитку відновлюваної енергетики, спільною метою якої є досягнення 20 % енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії в Європейському Союзі до 2020 року. При цьому рівень викидів парникових газів має знизитися щонайменше на 20% порівняно з 1990 р., ефективність використання енергії – зрости на 20%, а частку біопалива в загальному споживанні транспортного палива планується довести до 10% [11]. Щодо України, то енергетичною стратегією до 2035 р. передбачено збільшення частки «зеленої» енергії до 25% у енергетичному балансі країни, зниження імпортозалежності енергетичної галузі України з 51% у 2015 р. до 33% у 2035 р., а також повноцінна інтеграція з енергетичною системою ЄС [8]. Варто зазначити, що в Україні за останні роки спостерігається досить відчутне збільшення частки відновлюваної енергетики в енергетичній галузі, особливо це стосується електроенергетики на основі вітрових та сонячних електростанцій. Стабільно розвивається мала гідроенергетика, помітні зрушення є також у розвитку біоенергетичної галузі.

Значний прогрес у розвитку відновлюваних джерел енергії, створює сприятливі передумови для

ширшого використання окремих видів альтернативної енергії, таких як вітрова енергетика, що характеризується доступністю, поширеністю та важливістю для регіонів із обмеженим доступом до централізованого енергопостачання. До переваг вітрової енергії перш за все відноситься доступність, повсюдне поширення і практична невичерпність ресурсів. Джерело енергії не потрібно здобувати і транспортувати до місця споживання: вітер сам поступає до встановленого на його шляху вітродвигуна. Ця особливість вітру надзвичайно важлива для важкодоступних (степових, пустинних, гірських і т. п.) районів, віддалених від джерел централізованого енергопостачання, і для відносно дрібних (потужністю до 100 кВт) споживачів енергії. Основним недоліком при використанні вітру як енергетичного джерела є непостійність його швидкості, а отже, і енергії в часі. Вітер характеризується не тільки багаторічною і сезонною мінливістю, але також змінює свою активність протягом доби і за дуже короткі проміжки часу (миттєві пульсації швидкості і пориви вітру).

Ефективність виробництва електроенергії вітровими електростанціями (ВЕС) значною мірою залежить від природних умов розташування. Найменш придатними для будівництва є гірські райони через значні витрати на інфраструктуру, транспортування обладнання та обслуговування. Лісові зони також малопривабливі через створення деревами турбулентності вітрових потоків, що знижує продуктивність і прискорює знос вітроустановок. Натомість степова зона України є найбільш перспективною для реалізації інвестицій у ВЕС завдяки сприятливим вітровим умовам, логістичним перевагам і наявності низькопродуктивних для сільського господарства земель площею близько 100 тис. км². Крім того, мілководні акваторії Азовського й Чорного морів, а також внутрішні водойми створюють додаткові можливості для будівництва офшорних ВЕС, що забезпечує економічну доцільність проектів (табл. 1).

З поданих в таблиці даних випливає, що географічні умови території України дозволяють побудувати 249.7 ГВт економічно ефективних вітроелектростанцій на базі сучасних моделей вітроелектричних установок трьохмегаватного класу.

Попри численні переваги, зокрема екологічну безпечність і доступність, розвиток вітрової енергетики має певні обмеження, пов'язані з територіальними особливостями та природними умовами. Це спонукає до інтеграції інших видів відновлюваних джерел, зокрема сонячної енергії, яка є ще одним важливим напрямом сталого розвитку енергетичного сектору. Сонячна енергія є одним із найперспективніших відновлюваних джерел енергії, оскільки характеризується екологічною чистотою, практично невичерпними ресурсами та широкою доступністю, що забезпечує її значну роль у збалансованій структурі відновлюваної енергетики.

Таблиця 1

Результати оцінювання потенціалу потужності офшорних ВЕС на території України [11]

№ з/п	Акваторія	Площа мільководдя, км ²	Експертна оцінка частки території зони, придатної для ВЕС, %	Площа для ВЕС, км ²	Щільність розстановки, МВт/км ²	Потужність ВЕС, ГВт
1	Азовське та Чорне море (українська акваторія)	19000	30	5700	35	199,5
2	Залив Сиваш	2500	25	625	30	18,8
3	Дніпровський каскад	6888	15	1033	25	25,8
4	Лимани	1500	15	225	25	5,6
5	Разом	29888	25	7583	105	249,7

Вона ефективно використовується на більшості ділянок земної поверхні, а сучасні технології дозволяють безпосередньо перетворювати сонячну радіацію на електричну чи теплову енергію.

Залежно від методу перетворення сонячні енергетичні системи поділяються на дві основні групи: активні та пасивні. Активні сонячні технології базуються на використанні технологій перетворення енергії сонячної радіації на електричну енергію та на отримання теплової енергії з метою перетворення сонячного випромінювання на корисний вихід енергії. В активних енергосистемах сонячна енергія сприймається, накопичується і транспортується в спеціальних пристроях. Пасивні сонячні технології базуються на виборі та використанні матеріалів із ефективними тепловими характеристиками, вигідному розташуванні будівель відносно положення Сонця та інше. У пасивних системах приймачем служать самі об'єкти, що нагріваються. У сучасній сонячній енергетиці можна виділити два основних практичних напрями використання енергії сонячної радіації:

1) перетворення сонячної енергії в електричну енергію, у тому числі: фотоелектричний метод

перетворення (електромагнітне випромінювання оптичного діапазону Сонця перетворюється в електроенергію постійного струму) та термодинамічний метод перетворення (сконцентрована сонячна енергія використовується для одержання пари, яка, обертаючи турбогенератор, виробляє електроенергію);

2) перетворення сонячної енергії в теплову енергію, у тому числі: опалення; гаряче водопостачання а також технологічні процеси.

При виборі типу та потужності сонячної енергетичної установки для певної місцевості в першу чергу необхідно орієнтуватись на питомі показники з надходження сонячної радіації в даній місцевості (середня добова, місячна і річна кількість прямої, розсіяної та сумарної сонячної радіації), продуктивність геліотехнічної установки.

В Україні існують достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що потрапляє на 1 м² поверхні, на території України знаходиться в межах від 1070 кВт·год/м² в її північній частині до 1400 кВт·год/м² і вище на півдні України, що показано на рис. 2.

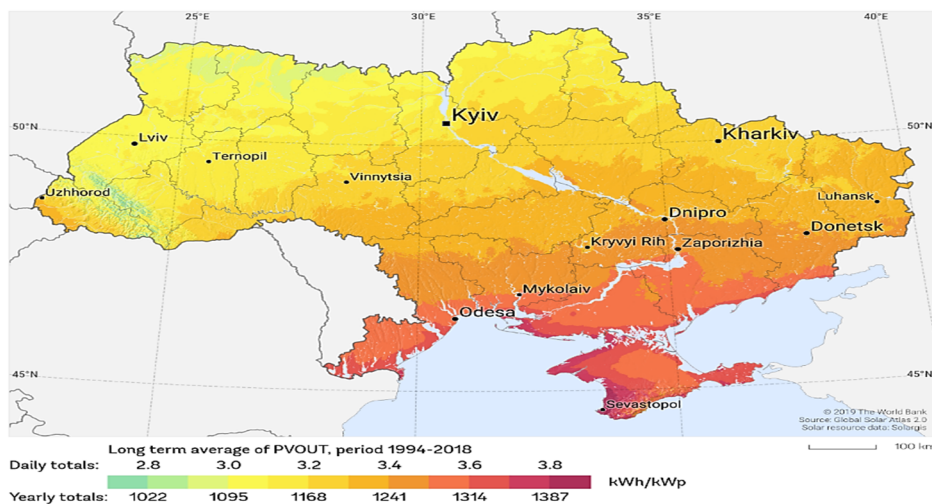


Рис. 2. Потенціал річного виробітку електроенергії сонячними електростанціями України [12]

Як можна побачити з рисунку, розподіл основних кліматичних показників такий: радіаційний режим території характеризується зміною тривалості сонячного сйива в середньому за рік від 1690 – 1850 годин у західних районах Полісся та Лісостепу

до 2150 – 2450 годин у Криму та на узбережжях Чорного й Азовського морів. При цьому, кількість сумарної радіації – енергії, що потенційно може бути використана на формування всіх природних процесів, перебуває у межах від 3400 МДж/м² за рік

на заході (Прикарпаття) до 5000 МДж/м² в Криму. Величини середніх річних значень радіаційного балансу, тобто сонячної енергії, засвоєної діяльним шаром земної поверхні, змінюються по території від 1200 МДж/м² на Волині до 2100 МДж/м² на узбережжях Чорного й Азовського морів і в Криму. Теоретичний потенціал, або сумарне річне надходження сонячної радіації на територію України, оцінюється на рівні $720 \cdot 10^{12}$ кВт·год [13].

Високий теоретичний потенціал сонячної енергії на території України свідчить про значні можливості її використання у виробництві енергії, особливо у регіонах з максимальною кількістю сонячного випромінювання. Однак у структурі відновлюваної енергетики не менш важливе місце займає використання біомаси, яка є ще одним перспективним джерелом енергії завдяки її широкій доступності та екологічній доцільності.

Біомаса є одним із основних видів відновлюваних енергетичних ресурсів, що утворюються у процесі природного та антропогенного кругообігу орга-

нічної речовини. Залежно від походження виділяють первинну біомасу, яка включає природні рослинні ресурси, та вторинну біомасу, що формується як відходи після переробки сільськогосподарської продукції, деревини або побутових органічних відходів.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні є значним. За даними Інституту відновлюваної енергетики НАН України, річне виробництво зернових та зернобобових культур в Україні сягає більше ніж 60 млн т, при цьому у значних обсягах утворюються такі побічні продукти, як солома і рослинні відходи. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал твердої біомаси в Україні є еквівалентним 35 млн т н.е., а його використання дасть змогу щорічно заощаджувати близько 40 млрд м³ природного газу [14]. Найбільший потенціал твердої біомаси зосереджений у Вінницькій, Дніпропетровській, Житомирській, Київській, Одеській, Полтавській, Сумській, Харківській та Чернігівській областях і становить близько 2,0 млн т н.е./рік (рис. 3).

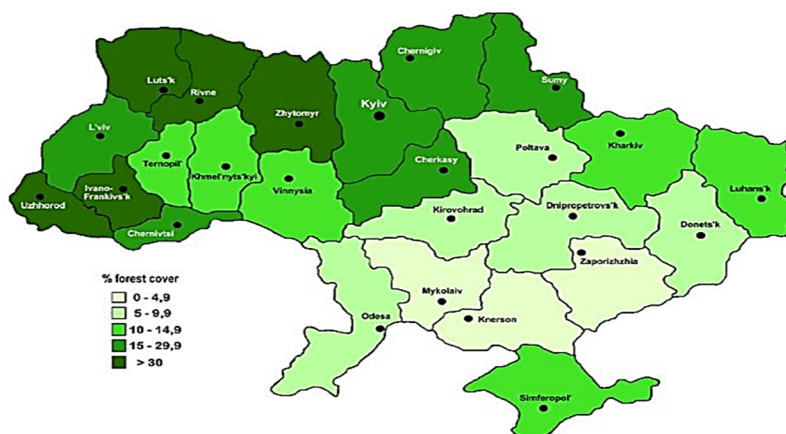


Рис. 3. Карта енергетичного потенціалу твердої біомаси та торфу України [14]

Слід відзначити наявність зростаючої тенденції до збільшення можливостей використання твердої біомаси, що зумовлено підвищенням продуктивності сільського господарства, змінами в управлінні лісовим господарством та модифікаціями в практиці утилізації відходів, як промислових, так і побутових. Так, наприклад, в Україні виробляють гранули із соломи злакових культур в обсязі 120 тис. т/рік, на підприємствах олійної промисловості спалюється біля 500 тис. т лушпиння соняшнику, ще більш ніж 700 тис. т гранулюється, а оскільки лісистість території України становить біля 16 %, то заготівля ліквідної деревини досягла 19 млн м³. Сумарні ресурси паливних дерев, відходів заготівлі та переробки деревини складають біля 10 млн м³ [15]. Відбувається розширення використання дерев, деревних брикетів та пелет, зокрема у побуті та промислових котельнях.

Хоча використання ресурсів біомаси в Україні значно зросло, потенціал відновлюваної енергетики країни цим не обмежується. Мала гідроенергетика

відіграє важливу роль у диверсифікації джерел енергії, особливо враховуючи сприятливі географічні особливості України, такі як численні річки та водосховища. Так, відповідно до Енергетичної стратегії України до 2030 року, основними задачами визначено: першочергове відновлення малих гідроелектростанцій з гідроспорудами, що збереглися; реконструкція діючих малих гідроелектростанцій; спорудження нових малих ГЕС на існуючих водосховищах господарського призначення; будівництво нових малих ГЕС на річках Тисі, Дністер та їх притоках з метою комплексного вирішення проблем енергозабезпечення західних областей та захисту прилеглих територій від повеней; типізація проектних рішень для нових малих ГЕС, що дозволить максимально використовувати однотипне обладнання та зменшити капіталовкладення при спорудженні [16].

У цьому контексті, варто звернути увагу на досвід Данії, яка є одним з лідерів у світі у впровадженні відновлювальних джерел енергії та роз-

витку децентралізованих енергетичних систем MicroGrid. Мікромережі в Данії активно використовуються для інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрових (у 2022 році Данія виробила 19,5 ТВт·год від вітрової енергії, що складає близько 50% від загального обсягу електричної енергії країни) та сонячних електростанцій (у 2022 році сонячна енергетика забезпечувала приблизно 6-7% від загального споживання електроенергії), в локальні енергосистеми [11]. Політика розвитку мікромереж Данії охоплює в собі наступні пункти: підтримку встановлення домашніх сонячних панелей та інвестицій в акумулятори енергії; розвиток локальних енергетичних кооперативів, де громади об'єднуються для спільного виробництва та споживання енергії; використання смарт-мереж для управління енергетичними потоками в реальному часі, що дозволяє ефективно інтегрувати відновлювальні джерела енергії [11]. Варто зазначити, що Україна має великий потенціал для розвитку децентралізованих енергетичних систем на основі досвіду Данії, враховуючи свою багатий природний ресурсний потенціал та потребу в модернізації енергетичної інфраструктури.

Водночас, незважаючи на потенційні переваги, розвиток ММ має низку викликів та обмежень. Перш за все, йдеться про економічні виклики. Інвестиції в ММ залишаються значними. Деякі з його компонентів, включаючи паливні елементи, технології зберігання енергії, інфраструктуру «розумних» мереж та програмне забезпечення для управління мережею, поки що не є комерційно життєздатними без певної фінансової підтримки. Ця проблема може бути вирішена за допомогою державної підтримки. Зі створенням програм фінансування, вигідних тарифів на продаж електроенергії та сприятливих податкових умов розвиток мереж Microgrid прискориться в разі і перейде на якісно новий рівень.

Варто зазначити й та те, що ММ є відносно новою галуззю. Необхідно розробити стандарти і протоколи для інтеграції мікро-джерел та участі в традиційних і дерегульованих ринках електроенергії, а також рекомендації щодо безпеки і захисту. Якщо ММ буде дозволено автономно розподіляти енергію для пріоритетних навантажень під час будь-яких перебоїв в основній мережі, ключовим питанням є те, хто буде відповідати за ціноутворення на енергопостачання під час перебоїв. Оскільки основна мережа буде відключена, а ринок електроенергії втратить контроль над цінами на енергію, ГП можуть продавати енергію за дуже високою ціною, користуючись монополічним становищем на ринку. Як наслідок, для підтримки довгострокового розвитку ММ необхідно створити та впровадити належну ринкову інфраструктуру. В Україні ці проблеми не врегульовані з точки зору законодавства. Для того, щоб сприяти поширенню мікромереж, необхідно розробити законодавчі акти, які регулюватимуть

відносини між усіма учасниками українського ринку електроенергії.

Незважаючи на готовність міст до децентралізації енергосистеми, чинне законодавство України створює значні перешкоди. У законі немає чіткого визначення «децентралізованого виробництва електроенергії», а процес підключення до електромереж не врегульовано належним чином. У 2023 році змінами до Закону України «Про ринок електричної енергії» було введено поняття «малі системи розподілу» [17]. Тим не менш, це визначення має розглядати ширше питання про те, як має функціонувати децентралізоване/розподілене виробництво. Законодавство також має роз'яснити, як системи зберігання енергії можуть бути інтегровані в децентралізовану генерацію або як невеликі системи розподілу можуть підключати існуючі установки в містах без створення оператора системи розподілу (DSO). На практиці окремі станції підключаються до мереж DSO, але потрібна законодавча база для об'єднання цих станцій у локальні мережі в малих містах. Ця прогалина робить фінансово нежиттєздатним виробляти більше електроенергії через необхідність платити за транзит до мережі після підключення. Для вирішення цих проблем Україна має розробити чіткий алгоритм для малих мереж і внести відповідні зміни до нормативно-правової бази. Цей алгоритм має включати положення про запозичення, коли держава надає гарантії у вигляді активів і надає великі кредити для реалізації «зелених проектів», забезпечених цими суверенними гарантіями.

Іншим значним бар'єром є відсутність у національному законодавстві поняття «енергетичне співтовариство». Хоча влітку 2023 року до Закону України «Про ринок електричної енергії» [17] були внесені позитивні зміни, спрямовані на активних споживачів та їхнє право постачати електроенергію сусіднім споживачам, громади все ще мало зацікавлені у створенні власних енергетичних проектів через фінансові проблеми. Активні воєнні дії створили серйозні перешкоди для децентралізації, включаючи нестачу робочої сили, труднощі з ланцюгом постачання, труднощі з пошуком фінансування. Капітальний ремонт енергетичної інфраструктури вимагає великих капіталовкладень, але інвестори не вагаються вкладати кошти в Україну через проблеми безпеки та невпевненість у майбутньому. За даними Віденського інституту міжнародних економічних досліджень, після вторгнення Росії у 2022 році прями іноземні інвестиції впали з 6,5 мільярдів доларів у 2021 році до лише 570 мільйонів доларів у 2022 році [18]. Водночас, варто зазначити, що певна допомога надходить від Європейського Союзу та США. У вересні Європейська комісія оголосила про кредит у розмірі до 39 мільярдів доларів, який має бути витрачений на енергетику, а адміністрація президента США оголосила про виділення 325 мільйонів доларів енергетичної допомоги [9]. Тим не

менш, державне фінансування може бути більшою частиною того, на що країна може розраховувати.

Висновки. На тлі посилення енергетичної кризи та зростання загроз енергетичній безпеці України будівництво нової децентралізованої енергетичної системи стає першочерговим завданням. Враховуючи економічну ситуацію та міжнародну політичну обстановку, побудова нової енергетичної системи за концепцією Microgrid є найкращим рішенням поточної проблеми. Мікромережеві системи мають кілька переваг, серед яких: енергетична незалежність, стійкість, інтеграція відновлюваних джерел енергії; місцева генерація; економія коштів; підтримка енергосистеми; розширення прав і можливостей громади; гнучкість і масштабованість, підвищена енергетична безпека; впровадження інноваційних технологій.

Література

1. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter. *IEA*. URL: <https://iea.blob.core.windows.net>.
2. Письменна У., Кривда О., Трипольська Г. Розвиток децентралізованих джерел енергії та систем управління попитом на основі домогосподарств-просьюмерів: оцінка ризиків і заходи сприяння. *Економіка та суспільство*. 2024. № 63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-63-117>.
3. Лісовий А. Енергетична безпека України: другий рік війни. *Modeling the development of the economic systems*. 2024. № 1. С. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-11-17>.
4. Дьяченко О. С. Інвестиції в сонячну енергетику в децентралізованій енергосистемі як чинник зміцнення енергетичної безпеки України під час війни. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 2(77). С. 73-78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).73-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).73-78).
5. Rudniev Y., Romanchenko J. Comprehensive condition analysis and perspectives of energy development in Ukraine according to the smart grid concept. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2024. № 1. P. 120-124. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297587>.
6. Ukraine Energy Profile. *IEA*. URL: <https://iea.blob.core.windows.net>.
7. International Renewable Energy Agency (IRENA). Bioenergy Data. 2021. URL: <https://www.irena.org/bioenergy>.
8. Materials of the “Energy security” working group. *Government portal*. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app>.
9. Ukraine Partnership. *USAID-NREL Partnership*. URL: <https://www.nrel.gov>.
10. Definition of a Microgrid. *Energy Pool*. URL: <https://www.energy-pool.eu>.
11. European Electricity Review 2024. *EMBER*. URL: <https://ember-energy.org>.
12. Кудрі С. О. Відновлювані джерела енергії. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf.
13. Prospects for the Development of Photovoltaics in Ukraine. *European Research Studies Journal*. URL: <https://ersj.eu/journal/3287>.
14. Renewable energy potential of Ukraine. *Ukraine Hydrogen Council*. URL: <https://uabio.org/wp-content>.
15. Energy potential of Biogas Production in Ukraine. *Research Gate*. URL: <https://www.researchgate.net>.
16. Ukraine Small Hydro Summary. *The World Bank*. URL: <https://documents1.worldbank.org/>.
17. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13 квітня 2017 року № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#top>.
18. Концепція Smart Grid та її поточний стан впровадження в Україні. URL: <https://expro.com.ua>.

References

1. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter. *IEA*. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net>.
2. Pysmenna, U., Kryvda, O., Trypolska, H. (2024). Rozvytok detsentralizovanykh dzherel enerhii ta system upravlinnia popytom na osnovi domohospodarstv-prosiumeriv: otsinka ryzykiv i zakhody spriyannia [Development of Decentralized Energy Sources and Demand Side Management Systems Based on Prosumer Households: Risk Assessment and Promotional Measures]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, 63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-63-117> [in Ukrainian].
3. Lisovyi, A. (2024). Enerhetychna bezpeka Ukrainy: druhyi rik viiny [Energy security of Ukraine: the second year of war]. *Modeling the development of the economic systems*, 1, pp. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-11-17> [in Ukrainian].
4. Diachenko, O. (2024). [Investments in solar energy in a decentralized energy system as a factor in strengthening the energy security of Ukraine during wartime]. *Vidnovlyvana Energetika*, 2(77), pp. 73-78. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).73-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).73-78)
5. Rudniev, Y., Romanchenko, J. (2024). Comprehensive condition analysis and perspectives of energy development in Ukraine according to the smart grid concept. *Power engineering: economics, technique, ecology*, 1, pp. 120-124. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297587>.
6. Ukraine Energy Profile. *IEA*. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net>.
7. International Renewable Energy Agency (IRENA). Bioenergy Data. (2021). Retrieved from <https://www.irena.org/bioenergy>.
8. Materials of the “Energy security” working group. *Government portal*. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/storage/app>.
9. Ukraine Partnership. *USAID-NREL Partnership*. Retrieved from <https://www.nrel.gov>.

10. Definition of a Microgrid. *Energy Pool*. Retrieved from <https://www.energy-pool.eu>.
11. European Electricity Review 2024. *EMBER*. Retrieved from <https://ember-energy.org>.
12. Kudri, S. O. (2020). Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]. Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine. 392 p. Retrieved from https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf [in Ukrainian].
13. Prospects for the Development of Photovoltaics in Ukraine. *European Research Studies Journal*. Retrieved from <https://ersj.eu/journal/3287>.
14. Renewable energy potential of Ukraine. *Ukraine Hydrogen Council*. Retrieved from <https://uabio.org/wp-content>.
15. Energy potential of Biogas Production in Ukraine. *Research Gate*. Retrieved from <https://www.researchgate.net>.
16. Ukraine Small Hydro Summary. *The World Bank*. Retrieved from <https://documents1.worldbank.org/>.
17. Pro rynok elektrychnoi enerhii: Zakon Ukrainy vid 13 kvitnia 2017 roku № 2019-VIII [On the Electricity Market: Law of Ukraine No. 2019-VIII of April 13, 2017]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#top> [in Ukrainian].
18. Kontsepsiia Smart Grid ta yii potochnyi stan vprovadzhennia v Ukraini [Smart Grid concept and its current state of implementation in Ukraine]. Retrieved from <https://expro.com.ua> [in Ukrainian].

Шевчук О. А., Черняєв М. О. Перспективи побудови та розвитку децентралізованої енергетичної системи України на основі мікромереж

У статті розглядаються технічні, економічні та політичні аспекти впровадження децентралізованої енергетичної системи в Україні на основі мікромереж, з урахуванням сучасних геополітичних викликів. Визначено, що енергетична безпека країни зазнала серйозних загроз через військову агресію, що призвела до значних руйнувань енергетичних об'єктів, підстанцій та розподільчих мереж. Доведено потребу переходу від великих централізованих енергомереж до менших, більш стійких децентралізованих систем. Обґрунтовано впровадження мікромереж, що інтегрують відновлювальні джерела енергії, таких як сонячна, вітрова, біомаса та гідроенергетика та являють собою перспективне рішення для підвищення енергетичної безпеки і зменшення залежності від зовнішніх джерел енергії. Визначено переваги мікромереж, зокрема їх здатність функціонувати автономно під час відключень у центральній системі, зменшувати залежність від викопного палива та сприяти інтеграції відновлюваних джерел енергії. Розглянуто виклики, з якими стикається перехід до децентралізованої енергетики, зокрема високі початкові витрати, застаріла інфраструктура та відсутність чіткої законодавчої бази для регулювання діяльності мікромереж. Обґрунтовано потребу в системних законодавчих реформах для регулювання діяльності мікромереж, стимулювання інвестицій та сприяння децентралізації енергетичної системи. Спираючись на кращі практики таких країн, як Данія та Німеччина, запропоновано рекомендації щодо інтеграції мікромереж в енергетичну систему України.

Ключові слова: енергетична безпека, енергетичні ресурси, децентралізація енергетичної системи, технології, відновлювані джерела енергії, інновації, міжнародне співробітництво, підприємництво, MicroGrid.

Shevchuk O., Cherniaiev M. Perspectives of Building and Developing a Decentralized Energy System of Ukraine Based on Microgrids

This study investigates the technical, economic, and political aspects of developing a decentralized energy system in Ukraine based on microgrids amid ongoing geopolitical challenges. The critical state of Ukraine's centralized energy system, worsened by military aggression and infrastructure destruction, necessitates a transition to a more resilient and flexible decentralized model. The research emphasizes the role of renewable energy sources such as wind, solar, biomass, and hydropower in creating a sustainable energy system. Microgrids, with their capacity for local energy generation, storage, and distribution, are identified as a promising solution to enhance energy security and independence. The analysis highlights the significant advantages of microgrids, including their ability to operate independently during outages, reduce reliance on fossil fuels, and facilitate the integration of renewable energy. However, the study underscores several challenges, including the high costs of implementing microgrids, outdated infrastructure, and a lack of comprehensive legal frameworks. Addressing these issues requires international investment, government support, and the promotion of modern renewable energy technologies. The findings emphasize the critical need for systemic legislative reforms to regulate microgrid operations, incentivize investments, and promote energy decentralization. Drawing on global best practices, particularly from Denmark and Germany, the study provides recommendations for integrating microgrids into Ukraine's energy landscape. Key measures include financial incentives for renewable projects, enhancing public-private partnerships, and fostering international collaboration to attract investments and transfer technology. The study concludes that transitioning to a decentralized energy system is vital for Ukraine's economic and energy security, particularly in wartime. By leveraging renewable energy, implementing microgrid solutions, and modernizing energy infrastructure, Ukraine can build a resilient and sustainable energy future.

Keywords: energy security, energy resources, decentralization of the energy system, technologies, renewable energy sources, innovations, international cooperation, entrepreneurship, MicroGrid.

Стаття надійшла до редакції 02.09.2024