

УДК 332.14; 338.2; 620.9

DOI: <https://doi.org/10.32782/CMI/2025-16-5>

Семенюк А.О.

молодший науковий співробітник,
Державна установа «Інститут економіки та прогнозування
Національної академії наук України»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2308-4713>

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАДАХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЇХНІХ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті проаналізовано можливості використання відновлюваних джерел енергії в окремих територіальних громадах України. Пропонується, що для здійснення моделювання сталих енергетичних трансформацій, які забезпечуються досягненням високої частки вуглецево-нейтральних ресурсів у структурі енергоспоживання, необхідним є ретельне дослідження потенціалу відновлюваної енергетики. Мета дослідження – оцінити потенціал відновлюваної енергетики, а саме сонячної, вітрової, біоенергетики та гідроенергетики в територіальних громадах на прикладі Житомирської та Рівненської ТГ. В подальшому цей потенціал використано при розробці моделей локальних енергетичних систем громад. Зазначено, що в українських реаліях, попри зростання інтересу до моделювання енергетичних процесів, комплексні дослідження локальних енергетичних систем залишаються обмеженими. Одним з оптимальних інструментів для таких досліджень визначено програмний комплекс TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System), що дає змогу здійснювати сценарне прогнозування розвитку локальних енергетичних систем територіальних громад України.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергетичні трансформації, економіко-математичне моделювання, локальні енергетичні системи, територіальні громади, сталий розвиток, низьковуглецевий розвиток.

Semeniuk Andrii

State Organization “Institute for Economics and Forecasting of the
National Academy of Sciences of Ukraine”

ASSESSMENT OF THE RENEWABLE ENERGY POTENTIAL IN TERRITORIAL COMMUNITIES FOR MODELING THE DEVELOPMENT OF THEIR LOCAL ENERGY SYSTEMS

The article examines the opportunities of applying renewable energy sources within selected territorial communities of Ukraine. It is suggested that, for modelling sustainable energy transformations driven by achieving a high share of carbon-neutral resources in the energy consumption structure, a thorough study of the renewable energy potential is essential. The study aims to evaluate the potential of renewable energy in Ukrainian territorial communities, focusing on the cases of Zhytomyr and Rivne communities. The analysis covers the prospects for the use of solar, wind, bioenergy, and hydropower, taking into account both technical parameters and territorial specificities. It is emphasized that local energy systems represent complex socio-technical structures incorporating not only physical infrastructure but also local socio-economic conditions, behavioral patterns of consumers, and institutional frameworks. The global experience demonstrates a variety of modeling approaches, among which integrated optimization models combining endogenous supply and exogenous demand have proven the most efficient for assessing long-term energy transformations. In the Ukrainian context, despite the growing need for energy modeling driven by the cities' participation in the Covenant of Mayors and national legislation which requires for local energy plans development, comprehensive research on the transformation of municipal energy systems remains limited. It is concluded that for modeling energy transitions at the community level, optimization tools based on the bottom-up approach are the most appropriate, as they enable detailed representation of technologies and their interactions within the energy sector. Among the available software, the TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) modeling framework is identified as one of the most effective analytical tools for exploring renewable energy potential and developing evidence-based scenarios for the sustainable energy development of Ukrainian territorial communities. For the purpose of communities' energy system models development, data from the national TIMES-Ukraine model were applied, ensuring methodological consistency and comparability of results.

Keywords: renewable energy sources, energy transformations, economic-mathematical modeling, local energy systems, territorial communities, sustainable development, low-carbon development.

Постановка проблеми. Трансформації локальних енергетичних систем територіальних громад України можуть бути ініційовані цілою низкою економічних, екологічних, кліматичних, технологічних і політико-адміністративних чинників [11]. Одним із таких є досягнення Цілей сталого розвитку ООН (ЦСР), що реалізуються і в Україні. Зокрема: ЦСР №1 (подолання бідності), ЦСР №3 (здоров'я і благо-

получчя), ЦСР №11 (сталий розвиток міст та спільнот), ЦСР №12 (відповідальне споживання та виробництво), ЦСР №13 (пом'якшення наслідків зміни клімату). ЦСР №7 (чиста і доступна енергія) – найбільш повно спрямовує зусилля для здійснення енергетичного переходу на відновлювані джерела енергії. У ній, зокрема, наголошується на таких завданнях: збільшити частку енергії з відновлюваних джерел



у національному енергетичному балансі, зокрема за рахунок введення додаткових потужностей об'єктів, що виробляють енергію з відновлюваних джерел; розширити інфраструктуру та модернізувати мережі для забезпечення надійного та сталого енергопостачання на основі впровадження інноваційних технологій; забезпечити диверсифікацію постачання первинних енергетичних ресурсів тощо [5]. Ще одним вагомим чинником таких трансформацій є військово-політичний. В умовах війни та післявоєнного відновлення необхідність забезпечення енергетичної незалежності держави та громад, диверсифікувати джерела енергії, забезпечити енергетичну стійкість громад є завданнями зміцнення обороноздатності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема енергетичних трансформацій в останні десятиліття цікавила багатьох іноземних (Ф. Гілс, Дж. Джевелл, А. Роснер, О. Черп та ін.) та вітчизняних (М. Бутко, В. Жовтянский, Т. Клебанова, О. Сохацька, О. Трофіменко, Ф. Шкрябець та ін.) науковців і практиків. Об'єктом досліджень фахівців є відновлювані джерела енергії, природоохоронний та економічний ефект їх впровадження, інвестиційна привабливість. Особливе місце займає розвиток практик застосування різноманітних математичних моделей в економічних дослідженнях енергетичних систем.

Важливість енергетичних трансформацій пов'язана з суспільним розумінням сутності проблем та необхідності їх вирішення на глобальному та локальному рівнях. Це стимулює цікавість учених і активність відповідних науково-практичних досліджень у цій сфері. Особливу вагу подібні розвідки мають для України, яка після набуття незалежності активно шукає можливості для удосконалення державної та локальних енергетичних систем. Певним чином показовими в цьому аспекті є праці О. Дячука, Р. Подольця, У. Письменної, Г. Трипольської, М. Чепелева та ін. [2; 7; 8; 13].

Незважаючи на помітну увагу, тема енергетичного переходу на рівні територіальних громад ще недостатньо вивчена.

Формування цілей статті (постановка завдання). Мета цього дослідження – проаналізувати потенціал відновлюваної енергетики в українських територіальних громадах для подальшого використання при моделюванні розвитку і трансформацій локальних енергетичних систем цих ТГ. За приклад обрано міські територіальні громади міст Житомир і Рівне.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для здійснення моделювання сталих енергетичних транс-

формацій в локальних енергетичних системах територіальних громад, які забезпечуються збільшенням частки вуглецево-нейтральних ресурсів, зокрема відновлюваних джерел енергії, у структурі кінцевого споживання, важливо оцінити їхній енергетичний потенціал. У подальшому у процесі моделювання ці показники мають забезпечити базис для ендегенного модельного визначення рівня покриття потреб локальної енергетичної системи за допомогою ВДЕ. На час проведення дослідження стану енергетичного розвитку Житомирської та Рівненської громад, публічно доступних даних щодо потенціалу відновлюваної енергетики (за винятком біоенергетики) не існувало. У зв'язку з цим було здійснено авторські розрахунки потенціалу сонячної та вітрової енергетики з використанням даних відкритих джерел (табл. 1).

Зупинимось більш конкретно на аналізі використання окремих видів ВДЕ.

Сонячна енергетика. Сонячна енергетика в Україні характеризується досить стрімкою динамікою. Вважається, що для її розвитку придатна вся територія нашої країни.

TIMES-Житомир. Розрахунок потенціалу сонячної енергетики для Житомирської територіальної громади ґрунтується на кількох ключових аспектах. З використанням Публічної кадастрової карти України [6] та вбудованого інструменту вимірювання площ вручну було визначено сумарну площу дахів великих промислових будівель – близько 650 тис. м². Із цієї кількості майже 500 тис. м² перебувають у комунальній власності. Ще близько 100 тис. м² становлять дахи муніципальних будівель – шкіл, дитячих садків та інших об'єктів соціальної інфраструктури. Враховуючи, що на 10 тис. м² площі можливо розмістити 500 кВт встановленої потужності сонячних електростанцій, потенціал дахових СЕС юридичних осіб (промислових підприємств і закладів сфери послуг) оцінюється приблизно у 37,5 МВт.

У місті Житомир налічується 2258 багатоквартирних будинків. За результатами вимірювання площ дахів вибірки, що становила 1% (22 будинки), середня площа даху визначена на рівні 1,4 тис. м². При цьому передбачається, що близько 30% усіх дахів є покрівлями похилого типу, тому лише половину їх площі доцільно використовувати для розміщення дахових сонячних електростанцій (СЕС). З урахуванням зазначених припущень загальна площа дахів житлових будинків, придатних для встановлення СЕС, становить приблизно 2,7 млн м². Відповідно, потенціал дахових

Таблиця 1

**Потенціал відновлюваної енергетики в моделях локальних енергетичних систем
TIMES-Житомир, TIMES-Рівне**

Джерело енергії	Житомир	Рівне
Наземні промислові сонячні електростанції (СЕС)	77,5 МВт	50 МВт
Дахові СЕС на приватних та комунальних підприємствах та інших закладах сфери послуг	37,5 МВт	53,25 МВт
Дахові приватні СЕС фізичних осіб	303 МВт	236,7 МВт
Вітрові електростанції	100 МВт	100 МВт
Біоенергетика	1016,5 тис. т.н.е або 11822 ГВт·год щорічно	368,5 тис. т.н.е або 4285,5 ГВт·год щорічно
Гідроенергія	5,5 млн кВт·год щорічно	–

Джерела: розрахунки авторів та [10; 12]

СЕС у багатоквартирному житловому фонді міста оцінюється на рівні близько 135 МВт.

У Житомирі також налічується 13152 приватні будинки садибної забудови. Припускається, що щонайменше на половині з них можливо розмістити дахові СЕС потужністю 25,6 кВт, що відповідає середньому показнику по Україні. Отже, теоретичний потенціал дахових СЕС приватного сектору становить близько 168 МВт, а сукупний потенціал СЕС міста не перевищує 303 МВт.

Для оцінювання потенціалу промислових фотоелектричних станцій у межах Житомирської міської територіальної громади передбачено можливість використання не більше ніж 5% її заміської території. Загальна площа громади становить 93,54 км², із яких площа міста Житомир – 61 км², а села Вереси – близько 1 км² [4]. Таким чином, під наземні промислові сонячні електростанції потенційно може бути відведено близько 1,55 км², що відповідає встановленій потужності близько 77,5 МВт.

Економічно доцільні обсяги будівництва СЕС визначаються в процесі моделювання сценаріїв розвитку енергетичної системи з урахуванням техніко-економічних характеристик відповідних технологій. При цьому не враховано можливе підвищення питомої потужності СЕС на одиницю площі внаслідок подальшого технологічного вдосконалення.

За різними прогнозами, за поточного темпу розвитку галузі, частка домогосподарств, що використовуватимуть дахові сонячні панелі, до 2050 року може сягнути 40–50%. Поступово зростатиме також економічна привабливість використання сонячних колекторів для підігріву води. Ці системи здатні забезпечити до 70–100% потреби приватних домогосподарств у гарячій воді в літній період і близько 15% – у зимовий. У сфері послуг потенціал використання сонячної енергії є відносно нижчим, проте зберігає перспективність упровадження. Крім того, надлишкову електроенергію, вироблену фотовольтаїчними установками, можна використовувати для виробництва водню або накопичення в системах зберігання енергії, що сприятиме більш ефективному енергоперенесенню впродовж доби [17].

Для моделювання всіх сценаріїв, описаних у [2], використовувалися наступні припущення щодо потенціалу (табл. 2) та вартості сонячної енергетики в місті Житомир (табл. 3) із врахуванням даних національної моделі TIMES-Україна. Значення інсоляції прийняті за незмінні в часі і для м. Житомира складають близько 1400 кВт·год/м²/рік [15].

TIMES-Рівне. Коефіцієнт використання встановленої потужності сонячних панелей на широті Рівненської територіальної громади за стандартного орієнтування на південь із нахилом 35° становить 11,3% [15]. Враховуючи цей показник, а також площу незабудованих територій громади згідно з генеральним планом, було зроблено припущення щодо можливості відведення до 100 га земель для розміщення на них наземних сонячних електростанцій сумарною потужністю до 50 МВт із річним виробництвом близько 65,7 ГВт·год. За потреби така площа може бути залучена й за межами громади. Подібні припущення є обґрунтованими, виходячи з принципів лінійного програмування, закладених у модель. У межах базового сценарію, однак,

Таблиця 2

Теоретичний потенціал сонячної енергетики в Житомирській громаді та її окрузі, МВт

Тип електростанцій	Потенціал, МВт
Наземні промислові СЕС	77,5
Дахові СЕС на приватних та комунальних підприємствах та інших закладах сфери послуг	37,5
Дахові приватні СЕС фізичних осіб	303

Джерело: розрахунки авторів

Таблиця 3

Вартість сонячних електростанцій в TIMES-Житомир, євро/кВт

	2017	2020	2030	2050
Наземні промислові	950	850	750	500
Дахові	1000	900	850	600

Джерело: [7]

передбачається реалізація не більш ніж 10% зазначеного потенціалу до 2050 року, оскільки цей сценарій базується на екстраполяції поточного стану енергетичного ринку України та передбачає відсутність ефективних законодавчих і виконавчих механізмів розвитку відновлюваної енергетики та низький рівень попиту бізнесу та населення на реалізацію таких проєктів. Згідно з експертним звітом групи «Електропостачання та ВДЕ» проєкту «Рівне Net Zero», визначено бажану встановлену потужність дахових сонячних електростанцій на муніципальних об'єктах, необхідну для досягнення нульового рівня викидів CO₂ унаслідок споживання електроенергії. Цей показник прийнято за орієнтовний потенціал дахових СЕС на муніципальних об'єктах на 2030 рік і він становить 8169 кВт. Виходячи з того, що сукупна площа дахів муніципальних будівель складає 189 906 м², а усереднений коефіцієнт потужності для дахових СЕС дорівнює 0,2 кВт/м², розраховано, що максимальний теоретичний потенціал таких дахів, який може бути реалізовано до 2050 року, становить 34 528 кВт.

Станом на сьогодні в Рівному вже функціонують дахові СЕС на муніципальних будівлях загальною потужністю 152,45 кВт, встановлені, зокрема, на закладах охорони здоров'я за сприяння ГО «Екоclub» та на дахах підприємства «Рівнеоблводоканал». За відкритими джерелами також відомо про щонайменше 7,8 МВт дахових СЕС, розміщених на приватних будинках.

Для оцінки потенціалу дахових СЕС приватного сектору припускається, що до 2050 року близько половини приватних будинків громади можуть бути обладнані сонячними установками середньою потужністю 26 кВт (показник 2021 року), що становитиме майже 168 МВт. Потенціал дахових СЕС на багатоквартирних будинках розраховано, виходячи з використання половини усередненої площі дахів 1256 будівель, наявних станом на 2020 рік, – 69 МВт. Таким чином, сукупний теоретичний потенціал дахових СЕС житлового сектору громади оцінюється у 237 МВт, що створює значні передумови для переходу до більш сталої та енергоефективної моделі міського енергопостачання.

У таблиці 5 наведено вартісні характеристики, використані при розробці моделі TIMES-Рівне.

Таблиця 4

Теоретичний потенціал сонячної енергетики в Рівненській громаді, МВт

Тип електростанції	Потенціал, МВт
Наземні промислові СЕС	50
Дахові СЕС на приватних та комунальних підприємствах та інших закладах сфери послуг	53,25
Дахові приватні СЕС фізичних осіб	236,7

Джерело: розрахунки авторів

Таблиця 5

Оцінка перспективних вартісних характеристик СЕС в TIMES-Рівне

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Наземні СЕС (трекінг)						
Вартість встановленої потужності, євро/кВт	600	450	415	380	365	350
Операційні витрати, євро/кВт	17,3					
Наземні СЕС						
Вартість встановленої потужності, євро/кВт	500	380	350	320	305	290
Операційні витрати, євро/кВт	15					
Дахові СЕС						
Вартість встановленої потужності, євро/кВт	800	570	515	460	435	410
Операційні витрати, євро/кВт	15	10	7	7	7	7

Джерело: розрахунки авторів та [16]

Вітрова енергетика. Вивчення вітрового потенціалу є актуальним не лише для аналізованих громад, а й для України загалом. Реалізація цього завдання потребує залучення кваліфікованих фахівців і використання сучасних технологічних підходів.

У межах дослідження було здійснено орієнтовну оцінку можливостей використання вітрової енергії. Встановлено, що до 2030 року потенціал Житомирського регіону для розвитку вітроенергетики залишається обмеженим і характеризується сезонною нерівномірністю, що ускладнює будівництво потужних комерційних вітроелектростанцій. Водночас після 2030 року очікується поступове підвищення цього потенціалу завдяки впровадженню нових високоефективних вітрогенераторів із більшим коефіцієнтом використання встановленої потужності, зумовленим можливістю роботи на вищих висотах, а також через зниження вартості обладнання та зростання технологічної ефективності [18].

За даними, наведеними у Схемі теплопостачання м. Рівного [12], на території області природний потенціал вітру на висоті 15 м становить 2010 кВт·год/м² на рік, а технічно досяжний потенціал – 390 кВт·год/м² на рік. На висоті 30 м природний потенціал збільшується до 2710 кВт·год/м² на рік, а технічно досяжний – до 520 кВт·год/м² на рік.

Згідно з даними ресурсу Global Wind Atlas, у зоні міської забудови м. Рівного середній потенціал вітру на висоті 50 м становить 2200 кВт·год/м² на рік при середній швидкості вітру 6 м/с, а на висоті 100 м – 3215 кВт·год/м² на рік при швидкості 7,2 м/с. Це відповідає коефіцієнту використання встановленої потужності (КВВП) приблизно 36% для турбіни потужністю 3,45 МВт. Указані турбіни вже тривалий час доступні на ринку і навіть встановлювалися в Україні, тому в моделі були використані характеристики саме таких сучасних вітротурбін.

На відміну від СЕС, вітрові електростанції потребують суттєво менше земельної площі для безпосереднього розміщення вітрогенеруючих установок

(близько 1400 м² на одну установку), хоча й можуть простягатися на багато кілометрів. Завдяки цьому, ділянки для площадок вітрогенераторів та прокладання електричних мереж можуть знаходитися посеред ділянок з іншим цільовим призначенням, наприклад, для вирощування сільськогосподарської продукції. Зазвичай, відстань між вітротурбінами складає 7–10 діаметрів ротора в напрямку вітру та 3–5 діаметрів поперек [14]. Діаметр ротора турбіни потужністю 3,45 МВт складає 130 метрів [16], відтак потребує від 355 до 845 тис.м². Загальна площа необхідна для ВЕС потужністю 100 МВт, відтак, знаходиться в межах від 10 до 25 км².

Було застосовано припущення, що максимальна встановлена потужність ВЕС при моделюванні локальних енергетичних систем громад може сягати до 100 МВт з необхідністю виділення площі в 17 км². Ця територія або належить Житомирській і Рівненській громадам, або є прилеглою до них, або належить іншим громадам. Найбільш ймовірно, що наявної території Рівненської та Житомирських міських ТГ недостатньо для реалізації повного потенціалу, оскільки також діють обмеження по будівництву ВЕС в населених пунктах. У такому випадку необхідно працювати над реалізацією можливостей міжмуніципальної співпраці, наприклад з сусідніми громадами, де є вільні території і, найголовніше, готовність місцевої влади до співпраці. Так, діюча стратегія розвитку Рівненської МТГ до 2027 передбачає розвиток співпраці з навколишніми громадами, у т. ч. для економічного розвитку [9].

Для встановлення фундаментів 29 вітротурбін потужністю 3,45 МВт кожна необхідно близько 40,6 тис. м². Решта території при цьому може залишатися придатною для ведення сільськогосподарської діяльності. У перспективі очікується поява на ринку більш потужних турбін із більшими висотами веж та діаметрами роторів, що зумовить зростання потреби у площі під їх розміщення, однак сприятиме підвищенню середнього коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП).

У межах цього дослідження не аналізувалися перспективні технології альтернативних конструкцій вітроенергетичних установок, призначених для роботи за низьких швидкостей вітру. Такі розробки наразі проходять стадії випробувань і не мають оприлюднених техніко-економічних характеристик, проте їхній потенціал у майбутньому може виявитися значним.

Для моделювання сценаріїв розвитку локальних енергетичних систем використовувалися наступні припущення щодо вартісних характеристик вітрової енергетики (табл. 6).

Біоенергетика. За даними Біоенергетичної асоціації України, економічно доцільний біоенергетичний потенціал країни має тенденцію до зростання завдяки розширенню площ під енергетичними культурами, призначеними для виробництва рідких, твердих і газоподібних біопалив у відповідь на зростаючий попит. Наразі значна частина потенціалу біоенергетики залишається невикористаною, зокрема енергетичні ресурси відходів лісового та сільськогосподарського виробництва. Для їх ефективного залучення необхідний розвиток логістичної інфраструктури – систем збору, транспортування та зберігання біомаси. Це обумовлено тим, що перевезення деревини з малою насипною щільністю на великі відстані є економічно не вигідним і супроводжується значним вуглецевим слідом.

Для інтеграції біомаси у систему житлово-комунального господарства, крім розв'язання технічних питань, важливим чинником є формування довгострокових контрактів на постачання деревини, які забезпечуватимуть стабільність і передбачуваність біоенергетичного сектору.

TIMES-Житомир. Для оцінки потенціалу біопалива у Житомирському регіоні використано дані Регіональної цільової програми [10]. Згідно з ними, загальний прогнозований обсяг деревних відходів становить приблизно 2,6 млн м³, або 716,5 тис. т н.е. щорічно. Зокрема, близько 2,1 млн м³ утворюється внаслідок очисток зелених насаджень уздовж ліній електромереж, 0,2 млн м³ – від очистки насаджень на узбіччях доріг у радіусі 80 км від м. Житомира, а решта – від діяльності лісових господарств у зонах, вільних від радіаційного забруднення. Слід зазначити, що більшість цієї деревини раніше спалювалася на місці, оскільки станом на 2017 рік у регіоні не було енергогенеруючого обладнання, здатного спалювати деревну тріску з вологістю 45–55%.

Середній показник побічної сировини рослинництва для отримання теплової енергії складає 119,4 тис. т н.е. – це більше ніж 12% від використаного у 2016 році палива на виробничо-експлуатаційні та комунально-побутові потреби міста Житомира. Виро-

щування енергетичних культур, таких як міскантус або верба може дати додаткові 170–180 тис. т н.е.

У місті Житомир наприкінці 2021 року було введено в експлуатацію біоТЕЦ, що дозволило ЖТКЕ на момент початку повномасштабного вторгнення зекономити 37 млн грн. Крім того, планується введення ще трьох подібних біоТЕЦ, що забезпечить можливість скорочення споживання природного газу в централізованому теплопостачанні на 80% [3]. Потужності цих біоТЕЦ представлені в моделі явно для всіх сценаріїв, включно з базовим.

TIMES-Рівне. За даними Схеми теплопостачання м. Рівне [12], потенціал біомаси Рівненської області складає: 1) біомаса зернобобових культур – 200 тис. МВт·год/рік; 2) біомаса кукурудзи – 310 тис. МВт·год/рік; 3) біомаса овочів відкритого і закритого ґрунту – 230 тис. МВт·год/рік.

Річний потенціал тваринницької сільськогосподарської біомаси на Рівненщині: 1) кількість гною – 10,4 млн. т; 2) вихід біогазу – 498 млн. м³; 3) заміщення органічного палива – 3250 тис. МВт·год/рік.

Осереднений об'єм відходів лісу для використання у вигляді палива – 111 тис.м³/рік (240 ГВт·год), енергозбереження відходів для використання у вигляді палива – 21,8 тис.м³/рік (46,5 ГВт·год). В 2017 році запрацювала біогазова електростанція на Рівненському сміттєзвалищі потужністю 500 кВт з виробітком близько 4000 МВт·год на рік.

Біоенергетичні технології, використані для моделювання сценаріїв розвитку локальних енергетичних систем, представлено когенераційними установками (КГУ), які одночасно виробляють електричну та теплову енергію. Як відновлювані джерела енергії в цих технологіях застосовуються деревна біомаса (пелети, тріска), відходи промислового та аграрного виробництва, біогаз, а також енергетичні культури. Дискусійним залишається питання віднесення твердих побутових відходів (ТПВ) та палива, виробленого з них (RDF – *refuse-derived fuel*, SRF – *solid recovered fuel*), до категорії відновлюваних джерел енергії. У моделі технології енергетичного використання ТПВ враховано без застосування механізмів «зеленого тарифу».

Згідно з даними Біоенергетичної асоціації України, виробництво теплової енергії з біомаси за нинішніх цін на природний газ є економічно вигідним і зберігатиме привабливість надалі. Поточний термін окупності ТЕЦ на біомасі становить близько 4,5 року, що робить такі проекти цікавими для бізнесу. Водночас цей показник істотно залежить від ринкової вартості природного газу: за її зниження окупність подовжується, а за зростання – скорочується.

Особливу увагу привертають технології виробництва біометану – газу, який може подаватися в газо-

Таблиця 6

**Оцінка перспективних вартісних характеристик наземних ВЕС
в моделях TIMES-Житомир (остання версія) і TIMES-Рівне**

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Вартість встановленої потужності, євро/кВт	1100	1075	1050	1025	1000	950	900
	1100	1075	1050	1000	975	950	900
Операційні витрати, євро/кВт	13.3						
Усереднений КВВП ВЕС України	36%	36%	36%	37%	38%	39%	40%

Джерела: дані TIMES-Україна [16]

розподільчі мережі та використовуватися у тих самих секторах. Біометан отримують як із сирової біомаси, так і шляхом очищення біогазу на діючих або запланованих підприємствах, зокрема на очисних спорудах і полігонах твердих побутових відходів [1].

Основні технічні характеристики ТЕЦ/КТУ, котелень на біомасі та біогазових установок, що застосовувалися у моделюванні довгострокових сценаріїв розвитку енергетичного сектору м. Житомир, сформовано на основі даних Біоенергетичної асоціації України з урахуванням результатів, отриманих під час розроблення національної моделі TIMES-Україна. Також враховано потенціал зниження капітальних витрат завдяки налагодженню вітчизняного виробництва обладнання.

У всіх моделях локальних енергетичних систем передбачено обмеження на рівні 300 МВт_e до 2050 року для кожного типу нових потужностей електро- та когенераційних технологій, що використовують джерела енергії біологічного походження. Це обмеження встановлено виходячи з орієнтовної відповідності обсягам потужностей, необхідних для забезпечення теплопостачання міста середнього розміру. Існуючі та нові газові ТЕЦ і котельні можуть бути адаптовані до використання біометану, а біоенергетичні установки, оснащені системами вловлювання та зберігання вуглецю, здатні забезпечувати від'ємні викиди CO₂, сприяючи кліматичній нейтральності.

Гідроенергетика. На думку представників громадських екологічних організацій, в Україні відсутні малі гідроелектростанції, що повністю відповідали б принципам сталого розвитку. Наявні об'єкти часто завдають довкіллю більшої шкоди, ніж приносять користі, зокрема у частині скорочення викидів парникових газів. Водночас у низці європейських країн є приклади функціонування малих ГЕС, що відповідають високим екологічним стандартам і не створюють значного антропогенного навантаження.

У межах проведеного моделювання передбачалося впровадження нових технологій малої гідроенергетики, які відповідають суворим екологічним критеріям, що, однак, зумовлює зростання їхньої вартості. Існуюча в місті Житомир мала ГЕС була врахована у моделі як базовий об'єкт: її річне виробництво становить 361 тис. кВт·год, а загальний потенціал оцінюється на рівні близько 5,5 млн кВт·год на рік.

На території Рівненської громади функціонує одна мала гідроелектростанція на підприємстві «Рівнеоблводоканал» із встановленою потужністю 15 кВт, що використовує скидний потенціал очищених стічних вод із каналізаційно-очисних споруд у річку Устя. Згідно зі «Схемою теплопостачання м. Рівного», регіон має значні ресурси поверхневих вод (приблизно 7 км³) і низку річок із перспективним гідротехнічним потенціалом для розміщення малих ГЕС потужністю до

500 кВт (Горинь, Льва, Стубелка, Збитинка, Путилівка, Бобер). Проте річка Устя до цього переліку не входить, а інших актуальних оцінок потенціалу для будівництва нових об'єктів не виявлено. Відтак, у моделі не визначено конкретних меж подальшого розвитку малої гідроенергетики, хоча передбачена можливість інвестування в нові МГЕС до рівня річного виробництва 5500 МВт·год. Наявна станція врахована в моделі як фактор зменшення споживання електроенергії підприємством.

Балансування ВЕС та СЕС. Перехід електроенергетичного сектору на 90–100% використання ВДЕ, насамперед вітрової та сонячної генерації, потребує створення достатніх маневрових потужностей і механізмів для підтримання балансу між виробництвом і споживанням електроенергії. Потенціал гідроенергетики не здатен повною мірою забезпечити необхідну гнучкість системи, тоді як біоенергетика переважно орієнтована на задоволення теплових навантажень. Відтак, розвиток сонячної та вітрової енергетики має відбуватися паралельно з упровадженням технологій накопичення енергії, її зберігання у формі «зеленого» водню або використання балансуючих потужностей (газові турбіни тощо), що дозволить забезпечити стабільність генерації та прогнозованість функціонування енергосистеми. У розрахунках прийнято припущення, аналогічне до моделі TIMES-Україна, згідно з яким на кожен 1 МВт встановленої потужності СЕС чи ВЕС необхідно встановлювати 0,1 МВт акумуляторних батарей.

Висновки. Локальні енергетичні системи розглядаються як багатовимірні соціотехнічні утворення, що поєднують технічну інфраструктуру, соціально-економічні особливості територій, поведінкові чинники споживачів і локальні інституційні умови. Одним із ключових методологічних викликів залишається визначення меж таких систем і узгодження технічних параметрів із соціальними характеристиками середовища. Світовий досвід підтверджує доцільність використання відновлюваних джерел енергії для підвищення стійкості та сталості локальних енергетичних систем, та застосування оптимізаційних математичних моделей для інформування їхнього розвитку. В українських реаліях, попри зростання інтересу до енергетичного моделювання в контексті реалізації Угоди мерів чи створення місцевих енергетичних планів, комплексні дослідження локальних енергетичних систем залишаються обмеженими й потребують подальшого розвитку. Доцільним є розширення застосування модельних інструментів, зокрема оптимізаційного типу «знизу-вгору» прикладом якого є програмний комплекс ETSAP-TIMES, що забезпечує сценарне прогнозування розвитку локальних енергетичних систем територіальних громад.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Біогаз та біометан в Україні. *Біоенергетична асоціація України* : веб-сайт. URL: <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/> (дата звернення: 18.01.2025).
2. Дячук О.А., Семенюк А.О. Методи та моделі оцінки енергетичного переходу на прикладі Житомирської об'єднаної територіальної громади. *Економіка і прогнозування*. 2021. № 4. С.74-101.
3. Житомир завдяки біоТЕЦ лише за січень заощадив 37 мільйонів гривень. *Екополітика.ua*: веб-сайт. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/zhitomir-zavdyaki-biotec-lishe-za-sichen-zaoshhadiv-37-miljoniv-griven/> (дата звернення: 19.06.2025).

4. Житомирщина у цифрах у 2017 році. Державна служба статистики України. Статистичний збірник. 2018. URL: http://www.zt.ukrstat.gov.ua/Publikacii/zbirnyky/zbirn_zhitobl2017.pdf (дата звернення: 11.11.2025).
5. Цілі сталого розвитку та Україна. Кабінет Міністрів України / Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina> (дата звернення: 25.09.2025).
6. Кадастрова карта України. URL: <https://map.land.gov.ua>; <https://kadastr.live> (дата звернення: 23.09.2025).
7. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелев, Р. Подолець, Г. Трипольська та ін. ; за заг. ред. Ю. Огаренко та О. Алісвої. Київ, 2017. 88 с.
8. Письменна У.Є., Трипольська Г.С., Курбатова Т.О., Кубатко О.В. Фактори управління сталими енергетичними трансформаціями в енергосекторі України. *Вісник Сумського державного університету. Серія «Економіка»*, № 3. 2020. С. 149–155.
9. Профіль громади. Рівненська міська територіальна громада, 2023. 155 с.
10. Регіональна цільова програма використання біоенергетичних технологій у тепло- та гарячому водопостачанні у Житомирській області на 2017–2020 роки / Житомирська обласна рада. Житомир, 2017. 28 с.
11. Семенюк А.О. Чинники енергетичних трансформацій в економічному аспекті. *Журнал Економіка та суспільство*, 2023, № 52. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-60> (дата звернення: 21.11.2025).
12. Схема теплопостачання міста Рівне. Том 1. 2021 URL: https://rvrada.gov.ua/portalfiles/1/232/11419/Звіт_Рівне__TOM_1.pdf (дата звернення: 11.11.2025).
13. Chepeliev, M., Diachuk, O., Podolets, R., Semeniuk, A., Trypolska, G. (2024). Net-Zero Transition in Ukraine: Implications for Sustainable Development Goal 7. *Aligning the Energy Transition with the Sustainable Development Goals. Lecture Notes in Energy* / Labriet, M., Espegren, K., Giannakidis, G., Ó Gallachóir, B. (eds). Springer, Cham., 2024. Vol 101. P. 271–293.
14. Mitchell, Peter R. Wind Turbine Separation Distances Matter. 2014. URL: <http://www.na-paw.org/Mitchell/Mitchell-Wind-Turbine-Separation-Distances.pdf> (дата звернення: 12.08.2025).
15. Photovoltaic geographical information system. *EU Science Hub. European Commission*. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html# (дата звернення: 10.08.2025).
16. Technology Data for Generation of Electricity and District Heating. *The Danish Energy Agency*. URL: <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-generation-electricity-and-district-heating> (дата звернення: 14.08.2025).
17. The future for green hydrogen.. *Wood Mackenzie* URL: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/> (дата звернення: 10.08.2025).
18. Wind Vision. Department of Energy. Office of energy efficiency & renewable energy. *Wind Energy Technologies Office*. URL: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-vision-1> (дата звернення: 18.08.2025).

REFERENCES

1. Biohaz ta biometan v Ukraini. Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy [Biogas and Biomethane in Ukraine. Bioenergy Association of Ukraine]. Available at: <https://uabio.org/biogas-and-biomethane/> (accessed: January 18, 2025).
2. Diachuk O.A., Semeniuk A.O. (2021) Metody ta modeli otsinky enerhetychnoho perekhodu na prykladi Zhytomyrskoi obiednanoi terytorialnoi hromady [Methods and Models for Assessing the Energy Transition: The Case of the Zhytomyr United Territorial Community.]. *Ekonomika i prohnozuvannia – Economics and Forecasting*, vol. 4, pp. 74–101.
3. Zhytomyr zavdiaky bioTETs lyshe za sichen zaoshchadyv 37 milioniv hryven. *Ekopolityka.ua* [Zhytomyr saved 37 million hryvnias in January alone thanks to its bio-CHP plant. *Ecopolitics.ua*]. Available at: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/zhytomir-zavdiaky-biotec-lishe-za-sichen-zaoshchadiv-37-miljoniv-griven/> (accessed: June 19, 2025).
4. Zhytomyrshchyna u tsyfrakh u 2017 rotsi. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Statystychnyi zbirnyk, 2018 [Zhytomyr Region in Figures in 2017. State Statistics Service of Ukraine. Statistical Yearbook, 2018]. Available at: http://www.zt.ukrstat.gov.ua/Publikacii/zbirnyky/zbirn_zhitobl2017.pdf (accessed: November 11, 2025).
5. Tsili staloho rozvytku ta Ukraina. Kabinet Ministriv Ukrainy / Uriadovyi portal [Sustainable Development Goals and Ukraine. Cabinet of Ministers of Ukraine / Government Portal.]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/cili-stalogo-rozvitku-ta-ukrayina> (accessed: September 25, 2025).
6. Kadaстрова карта Ukrainy [Cadastral map of Ukraine]. Available at: <https://map.land.gov.ua>; <https://kadastr.live> (accessed: September 23, 2025).
7. Diachuk O., Chepeliev M., Podolets R., Trypolska H. ta in. (2017) Perehid Ukrainy na vidnovliuvanu enerhetyku do 2050 roku [Ukraine's Transition to Renewable Energy by 2050] / za zah. red. Yu. Oharenko ta O. Aliievoi. Kyiv. (in Ukrainian)
8. Pysmenna U. Ie., Trypolska H. S., Kurbatova T. O., Kubatko O. V. (2020) Faktory upravlinnia stalymy enerhetychnymy transformatsiiamy v enerhosektori Ukrainy [Management Factors of Sustainable Energy Transformations in Ukraine's Energy Sector.]. *Visnyk Sumskoho derzhavnoho universytetu. Serii «Ekononika» – Bulletin of Sumy State University. "Economics" Series*, vol. 3, pp. 149–155.
9. Profil hromady. Rivnenska miska terytorialna hromada [Community Profile. Rivne City Territorial Community]. (2023). (in Ukrainian)
10. Rehionalna tsilova prohrama vykorystannia bioenerhetychnykh tekhnolohii u teplo- ta haryachomu vodopostachanni u Zhytomyrskii oblasti na 2017–2020 roky [Regional Target Program for the Use of Bioenergy Technologies in Heat and Hot Water Supply in Zhytomyr Region for 2017–2020]. Zhytomyrska oblasna rada. Zhytomyr. (2017). (in Ukrainian)
11. Semeniuk A. O. (2023). Chynnyky enerhetychnykh transformatsii v ekonomichnomu aspekti [Factors of energy transformations in economic aspect]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, vol. 52. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-60> (accessed: November 12, 2025).
12. Skhema teplopостачання міста Рівне [District heating scheme of the city of Rivne.]. Vol. 1. 2021. Available at: https://rvrada.gov.ua/portalfiles/1/232/11419/Звіт_Рівне__TOM_1.pdf (accessed: November 11, 2025).
13. Chepeliev, M., Diachuk, O., Podolets, R., Semeniuk, A., Trypolska, G. (2024). Net-Zero Transition in Ukraine: Implications for Sustainable Development Goal 7. *Aligning the Energy Transition with the Sustainable Development Goals. Lecture Notes in Energy* / Labriet, M., Espegren, K., Giannakidis, G., Ó Gallachóir, B. (eds). Springer, Cham, vol. 101, pp. 271–293.
14. Mitchell, Peter R. Wind Turbine Separation Distances Matter. 2014. Available at: <http://www.na-paw.org/Mitchell/Mitchell-Wind-Turbine-Separation-Distances.pdf> (accessed: August 12, 2025).

15. Photovoltaic geographical information system. *EU Science Hub. European Commission*. Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html# (accessed: August 10, 2025).

16. Technology Data for Generation of Electricity and District Heating. *The Danish Energy Agency*. Available at : <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-data-generation-electricity-and-district-heating> (accessed: August 14, 2025).

17. The future for green hydrogen.. *Wood Mackenzie*. Available at: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/> (accessed: August 08, 2025).

18. Wind Vision. Department of Energy. Office of energy efficiency & renewable energy. *Wind Energy Technologies Office*. Available at: <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-vision-1> (accessed: August 08, 2025).

Стаття надійшла: 24.10.2025

Стаття прийнята: 17.11.2025

Стаття опублікована: 05.12.2025