



DOI 10.32782/2078-0877-2025-25-1-9

УДК 621.311

С. М. Дудніков<sup>1</sup>, канд. техн. наук., доц.

ORCID: 0000-0002-0337-0707

С. В. Галько<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0001-7991-0311

О. О. Мірошник<sup>1</sup>, канд. техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-6144-7573

О. А. Савченко<sup>1</sup> канд. техн. наук, доц.

ORCID: 0000-0002-6401-0852

Д. М. Зеленков<sup>2</sup>, аспірант

ORCID: 0009-0002-9685-9196

<sup>1</sup> Державний біотехнологічний університет<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

email: galkosv@gmail.com

## ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЄДИНУ ЕНЕРГЕТИЧНУ СИСТЕМУ

*Анотація.* У статті запропоновано використовувати біогазові установки (далі – БГУ) як високогнучкі джерела енергії. При ухваленні рішення про їх використання є прогнозування показників енергоефективності запропонованої системи енергопостачання на основі біогазу порівняно з поточною централізованою моделлю. Показники енергоефективності оцінювалися за допомогою аналізу енергетичних балансів, побудованих з використанням усереднених статистичних даних про втрати та споживання енергії на біогазових об'єктах. Цей підхід рекомендується використовувати на ранніх етапах визначення технічних вимог при побудові або модернізації наявних енергетичних систем. Упровадження БГУ є економічно конкурентоспроможним порівняно із централізованими системами, як-от теплові електростанції та котельні. Інтеграція БГУ допоможе зменшити національну залежність від імпортованої енергії, виправити дисбаланси в енергетичній системі та знизити вартість енергії – електричної, теплової чи хімічної (наприклад, добрив).

*Ключові слова:* біогазова установка, система енергопостачання, енергетичний баланс, сонячна електростанція, вітрова електростанція, енергоефективність.

**Постановка проблеми.** На тлі стрімкого зростання виробництва відновлюваної енергії – насамперед від вітрових турбін (далі – ВЕС) та сонячних електростанцій (далі – СЕС) – зростає потреба в збалансуванні їх змінної потужності для забезпечення стабільності роботи [1–4]. Ключовою характеристикою джерел енергії від ВЕС [5] та СЕС [6; 7] є їх залежність від погодних умов, що призводить до нестабільного виробництва енергії. Дослідження показують, що найефективнішим універсальним підходом для збалансування цієї мінливості є вбудована гнучкість в енергетичну систему інших відновлюваних джерел енергії (далі – ВДЕ) (наприклад, БГУ), що дає змогу коригувати виробництво або споживання електроенергії у відповідь на коливання від ВЕС та СЕС.

**Аналіз останніх досліджень.** Коли великомасштабні ВДЕ інтегруються в енергосистеми, виникають проблеми зі збереженням як статичної, так і динамічної стабільності режимів роботи [8–11]. Наприклад, якщо частка ВДЕ в загальному енергетичному балансі перевищує 2 %, наявним мережам часто не вистачає технічної можливості впоратися з піками генерації та потоку, що вимагає модернізації інфраструктури та модернізації мереж [12–14]. ВДЕ також опосередковано впливають на амортизаційні властивості енергосистем, що призводить до проблем зі стабільністю, зниження запасу стабільності (наприклад, скорочення критичного часу знеструмлення під час коротких замикань) та погіршення якості перехідного процесу (наприклад, збільшення відхилень кута ротора генератора й зменшення демпфування) [9; 15; 25].



Сьогодні, наприклад, розвиток ВЕС передбачає інтеграцію великої кількості вітрогенераторів в енергетичні системи багатьох країн світу. Для того щоб це було ефективним, централізована система енергозабезпечення повинна стати «гнучкою», що вимагатиме вирішення різних значних наукових і технічних проблем. Одним із потенційних варіантів вирішення цього питання є використання БГУ як резервного джерела живлення для вітрових та сонячних електростанцій. Вироблений біогаз, який можна зберігати протягом тривалого часу, потім може бути використаний за потребою споживачів [18].

Перспективи впровадження біогазу в газову систему є дуже перспективними, зокрема в контексті ефективного використання ВДЕ у високоякісному, але енергоємному виробництві виливків в автомобілебудуванні, енергоємних технологіях зберігання зерна [20; 21], що вимагає підтримки з боку промислової статистики [22]. Особливо корисним рішенням може стати об'єднання котелень [23], що працюють на зручному для зберігання біогазі з ефективними, але нестабільними фотоелектричними установками [24], які можуть бути розташовані на рекультивованих забруднених територіях [25]. На жаль, кажучи загалом, у компонентах енергетичних установок, що працюють на біопаливі, необхідно протидіяти дуже сильній корозійній та деградації конструктивних компонентів [27; 28]. Підкреслюється [26], що використання методів комп'ютерного моделювання надає неоціненні можливості для оптимізації процесів управління виробництвом в складних системах, що особливо актуально для виконання завдань балансування ВДЕ.

**Формулювання мети статті.** Виконати первинні дослідження щодо доцільності впровадження БГУ в централізованій системі енергозабезпечення та обґрунтування її конкурентоспроможності.

#### **Основна частина**

### **1. Перспективи розвитку біоенергетики в Європейському Союзі.**

Сучасна політика Європейського Союзу (далі – ЄС) спрямована на утвердження сталого економічного розвитку, який містить соціальний, економічний та екологічний складники [29]. Енергетичне поле є ключем до утвердження цього поняття. Ідея захисту навколишнього середовища та збереження клімату посідає провідне місце в європейській енергетиці. Збільшення кількості ВДЕ, які підтверджують безпеку енергетичної системи, мінімізація використання вугілля у виробництві електроенергії та зменшення шкідливих викидів є одними з основних заходів у процесі сталого енергетичного розвитку. Цей принцип має велике значення для економіки та соціального добробуту країн – членів ЄС.

Поєднання цих принципів утілено в Європейському зеленому курсі. У грудні 2019 року Європейська комісія представила дорожню карту заходів, спрямованих на перехід до кліматично нейтральної економіки. Основною метою цієї стратегії є досягнення нульових викидів вуглекислого газу до 2050 року. Для цього потрібна оптимізація паливно-енергетичного сектору та зменшення залежності від імпортової сировини. Окрім енергетики, реформи також мають стосуватися таких секторів: транспорт, сільське господарство, будівництво, а також харчова та хімічна промисловість. Ключові елементи цієї стратегії проілюстровані на рис. 1.

Країни – члени ЄС зобов'язані впроваджувати «зелену» політику, але для деяких ця стратегія є справжнім викликом. Незважаючи на амбітні цілі, національні енергетичні стратегії країн ЄС залишаються неузгодженими. Більшість європейських країн не мають достатніх природних ресурсів і не можуть швидко зменшити свою залежність від імпорту енергоносіїв. Рівень економічного розвитку також суттєво різниться в різних країнах Європи. Крім того, деякі країни значною мірою покладаються на власне викопне паливо, як-от вугілля, що робить вимушену відмову від цих ресурсів особливо складною при переході до зеленої енергетики. Додаткові перешкоди передбачають застарілу енергетичну інфраструктуру, нестабільне



Рис. 1. Основні цілі Європейського зеленого курсу

виробництво електроенергії та залежність від ВДЕ. Досягнення цих цілей є складним завданням навіть для високорозвинених економік. Відповідно до Договору про функціонування ЄС, кожна держава-член самостійно несе відповідальність за розробку та реалізацію власної енергетичної стратегії.

Країни ЄС мають значний досвід у виробництві енергії шляхом переробки біомаси. До кінця 2021 року в Європі налічувалося 1 067 заводів з виробництва біометану, що на 184 більше, ніж у 202-му, що зробило 2021 рік найбільшим за темпами зростання біометанових установок. За даними Європейської біогазової асоціації (EBA), до вересня 2022 року вже запущено 155 нових біометанових заводів (рис. 2).

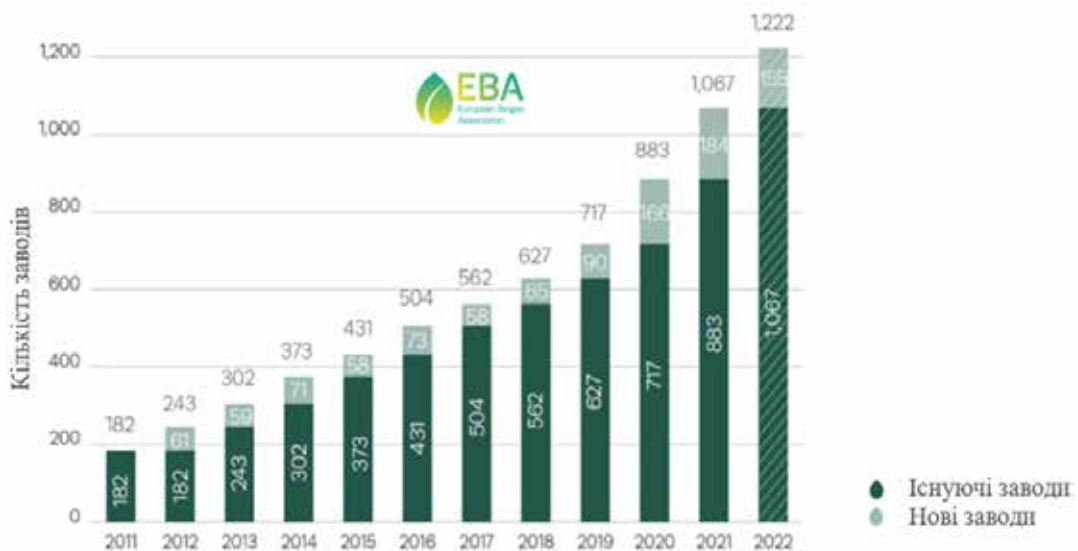


Рис. 2. Кількість біометанових заводів у Європі [36]

Виробництво біогазу та біометану в Європі у 2022 році становило 21 млрд кубометрів – 6 % від споживання природного газу в ЄС. Лише виробництво біометану зросло до 4,2 млрд кубометрів у 2022 році (рис. 3).



Рис. 3. Сукупне виробництво біогазу та біометану в Європі [37]

Виробництво біометану продовжує зростати, на відміну від виробництва біогазу. Найбільший річний приріст відбувся у 2021 році з додаванням 6,1 ТВт·год, або 0,6 млрд м³. Загальне виробництво біометану у 2021 році склало 37 ТВт·год, що еквівалентно 3,5 млрд м³.

Наразі 58 % біометанових установок у Європі під'єднано до газорозподільної мережі, тоді як 19 % – до газотранспортної. Крім того, 9 % європейських біометанових установок працюють незалежно, а інформація про решту 14 % недоступна в базі даних ЕВА (рис. 4).

У Франції, Нідерландах, Іспанії, Австрії, Данії та Сполученому Королівстві біометанові заводи переважно під'єднані до розподільних газових мереж. Однак в Італії великі біометанові заводи переважно будують для під'єднання до транспортних газових мереж

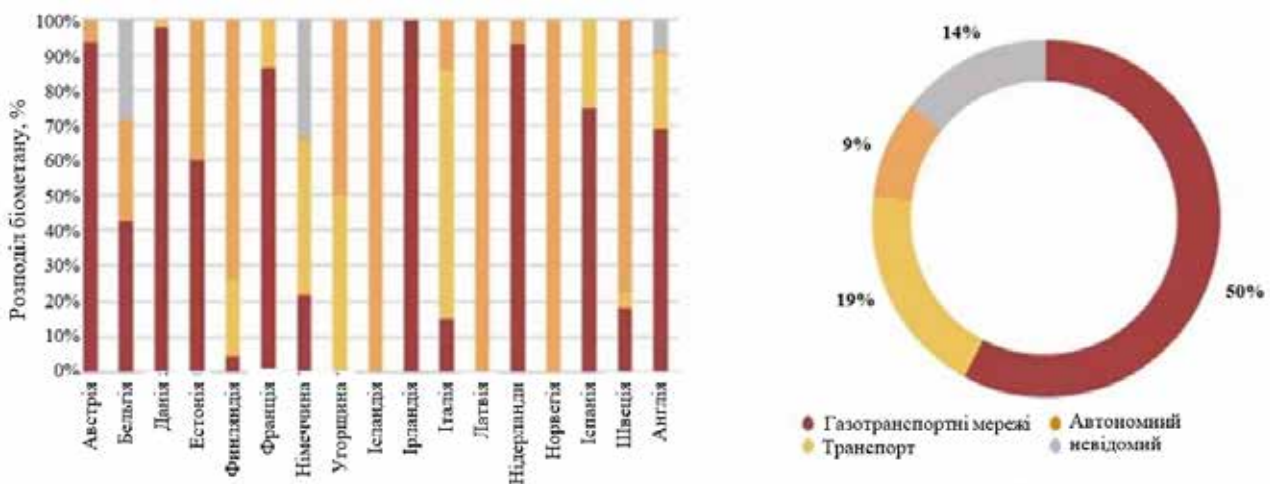


Рис. 4. Під'єднання до мереж природного газу [38]



(далі – ТГМ). газових мереж. Однак в Італії великі біометанові заводи переважно будують для під'єднання до транспортних газових мереж (далі – ТГМ). ТГМ також відіграє важливу роль у Німеччині. У скандинавських країнах біометанові установки здебільшого працюють в автономному режимі. В усіх регіонах частка ріллі під покривні культури встановлена на рівні 20 %. Було оцінено доцільність збільшення покриття для додаткових культур на кожній ділянці.

Цей підхід передбачає, що в середньому 10 % теоретичного потенціалу буде досягнуто до 2030 року (з 65 % для Італії, 20 % для Франції та Німеччини) і 100 % до 2050 року (рис. 5).



Рис. 5. Структура потенціалу виробництва біометану в Європі [39]

Потенціал для виробництва біометану містить:

- придорожню траву: це стосується трави, зібраної під час обслуговування узбіччя дороги, яка переробляється як відходи для виробництва біогазу;
- постійні луки: це ділянки багаторічних пасовищ. У Німеччині, наприклад, є значна площа таких луків, які не потрібні для годівлі тварин, близько 2 млрд м<sup>3</sup> щороку використовують для виробництва біогазу.

В Україні потенціал виробництва біогазу (біометану) оцінюється приблизно в 10 млрд м<sup>3</sup> на рік (табл. 1). Планується збільшити виробництво біогазу завдяки покривним культурам, щоб досягти понад 20 млрд м<sup>3</sup> на рік до 2050 року. Збільшення обсягів біометану в результаті цього значно підвищить енергетичну незалежність України, що зробить розвиток цієї галузі перспективною можливістю.

Таблиця 1

Потенціал виробництва біогазу / біометану в Україні у 2021 та 2050 роках\*

Біогаз / біометан, млрд м <sup>3</sup> /рік	2021 р.	2050 р.
Біогаз з відходів тваринництва	0,83	0,9
Біогаз з поживних залишків сільськогосподарських культур	4,36	5,2
Біогаз із побічних продуктів харчової промисловості	0,66	0,7
Біогаз з твердих побутових відходів	0,53	0,5
Біогаз з осад стічних вод (міські очисні споруди)	0,07	0,1
Енергетичні рослини: біогаз з кукурудзяного силосу (з 1 млн га)	3,00	3,8
Біогаз з покривних культур (20 % ріллі)	0,00	9,8
Біогаз з БМ, отриманий шляхом термічної газифікації (10 %)	0,00	1,0
Біогаз / Біометан, всього	9,45	21,8

\* Оцінку зроблено на основі технічно доступної сировини.



Але зацікавленість споживачів у масовому застосуванні БГУ можлива лише за умови їх конкурентоспроможності порівняно, наприклад, із централізованою системою енергопостачання (далі – ЦСЕ). Розглянемо оцінку ефективності впровадження БГУ на основі аналізу їх енергетичного балансу.

## 2. Енергетичний баланс біоенергетичного комплексу

Енергетичний баланс є найважливішим елементом при проведенні енергетичних аудитів, які охоплюють установки, процеси та технології, пов'язані з виробництвом та споживанням енергії. За допомогою аналізу енергетичних балансів можна визначити рівні енергоспоживання, втрати й витрати, формуючи цінну основу для проектування та оптимального управління енергетичними системами. До основних функцій енергетичних балансів можна зарахувати:

- аналіз надходжень, втрат і витрат на різні види енергії;
- оцінку ефективності процесів перетворення енергії.

На практиці різні види енергетичних балансів можуть бути розроблені на основі різних джерел даних, включно з технічною документацією, експлуатаційними даними, результатами експериментальних досліджень. До найбільш часто використовуваних видів енергетичних балансів належать:

- синтетичний баланс: показує розподіл придбаних, поставлених і вироблених енергетичних ресурсів у межах одиниці енергозабезпечення;
- фактичний баланс: дає змогу оцінювати показники енергоефективності установок та обладнання порівняно з їх проектними характеристиками;
- аналітичний баланс: представляє характер зміни споживання енергоресурсів, з розбивкою їх корисної цінності і втрат;
- нормативна збалансованість: ураховує можливості раціоналізації використання енергії та мінімізації втрат;
- перспективний баланс: охоплює довгострокові прогнози розвитку виробництва на п'ять років і більше.

Основною інформацією для створення енергетичного балансу підприємства є: формування статистичної звітності; енергетичний паспорт; норми питомих витрат; проектна, технічна та експлуатаційна документація; звітні дані з енергоспоживання (добові, сезонні, річні), включно з графіками навантаження; експериментальні дослідження і їх математична обробка; дані вимірювань та розрахунків та інші.

Будуючи систему енергопостачання на базі БГУ, необхідно отримати всі види виробленої енергії, а також втрати й витрати на кожному етапі перетворення енергії з одного виду в інший.

На основі результатів аналізу енергетичних балансів енергоспоживання сільськогосподарськими об'єктами складають організаційно-технічні заходи щодо економії енергетичних ресурсів.

Скористаємося детермінованим підходом створення синтетичного енергетичного балансу БГУ. Як вхідні параметри використовуємо техніко-економічні показники БГУ, основні дані яких наведено в таблиці 2.

Потенціал виробництва біогазу залежить як від виду сировини, що використовується, конструкції БГУ, якості теплоізоляції та виконання умов технологічного процесу, матеріалів і конструкції основних їх елементів, так і від кліматичних умов у районах їх розташування. При цьому середнє споживання виробленої енергії для забезпечення процесу роботи БГУ в кліматичних широтах України становить у середньому: теплової – від 20 до 50 %, і додатково електричної – від 6 до 9 % від загальних вироблених обсягів енергії.

У подальшому для отримання загальних результатів енергетичного балансу будемо оцінювати їх показники у відносних величинах на основі вищенаведених експериментальних даних.

Так, узагальнений енергетичний баланс БГУ має вигляд:

Таблиця 2

Техніко-економічні показники біогазових установок

Показник	Кобос – I	Біогаз 301	УкрНДІ Агропроект	Агрофірма «Енбом», Фінляндія	«Зорг біогаз» Україна	ТОВ «Екоген»
Об’єм реактора, м <sup>3</sup>	225	300	150	120	3x2400 +1000	100
Температура бродіння, °С	40	40	40	35-40	35-40	35-40
Добовий вихід біогазу, м <sup>3</sup>	500	350	178	140	9000	50
Добова переробка біогазу, м <sup>3</sup>	до 50	30,9	16,5	7	400	2,4
Вихід біогазу з 1 т біомаси, м <sup>3</sup>	2	1,1	1,2	1,46	1,4	1,4
Час обігу біомаси, доби	5	10	9	14	15	15
Вологість біомаси на виході, %	96,2	99,5	93,7	95,2	94	94
Товарний біогаз, %	59,3	55,2	52,1	60	80	80
Потужність, кВт·год/доб	100,2	151	24,5	-	22000	50
Кількість персоналу	4	4	4	4	10	2
Визначення	біогаз, добрива	Знезара- ження відходів ферми	біогаз, добрива	біогаз, , добрива	біогаз, добрива	біогаз, добрива

$$E_{be} + E_e + E_m = E_o + E_{be} + \Delta E_{be}, \tag{1}$$

де  $E_{be}$  – кількість біологічної енергії, наявної в органічних відходах;  
 $E_e$  – електроенергія, яка споживається для задоволення внутрішніх потреб БГУ (як-от змішування, подрібнення, завантаження, вивантаження та зволоження органічних відходів, а також робота компресорних установок);  
 $E_m$  – теплова енергія, яка необхідна для підтримки теплового режиму установки;  
 $E_o$  – указує на біологічну енергію, що зберігається у вироблених добривах;  
 $E_{be}$  – енергетичний потенціал утвореного біогазу;  
 $\Delta E$  – сумарні втрати електричної та теплової енергії на всіх етапах виробництва.

Відповідно до [30–32], на рис. 6 наведено узагальнений енергетичний баланс БГУ для виробництва біогазу, електроенергії, теплової енергії та добрив.

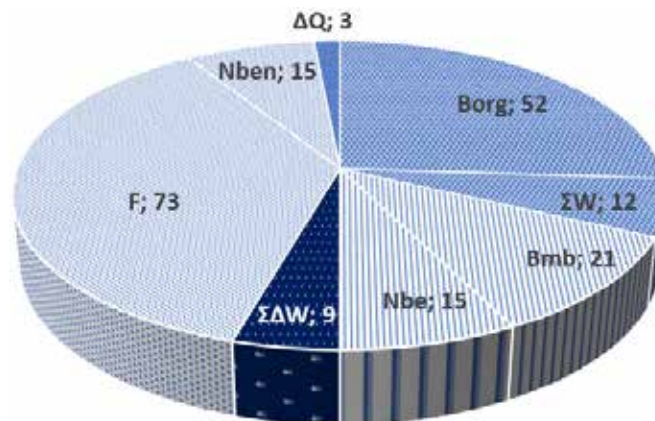


Рис. 6. Узагальнений енергетичний баланс БГУ



Структура узагальненого енергетичного балансу для БГУ містить такі складники:  $B_{org}$  – енергія з органічних відходів, %;  $\Sigma W$  – сумарні витрати теплової та електричної енергії, необхідні для забезпечення технологічного процесу БГУ, %;  $B_{mb}$  – енергія від гною в результаті життєдіяльності кислото- та метаноутворювальних бактерій, %;  $N_{be}$  – енергія біогазу, що утворюється в результаті дії метаноутворювальних бактерій, яка може бути використана в технологічному процесі та перетворена в електричну або теплову енергію, %;  $\Sigma \Delta W$  – загальні втрати енергії та витрати (як електричні, так і теплові), пов’язані з роботою БГУ, %;  $F$  – енергія, що міститься в добриві, %;  $N_{ben}$  – обсяги біогазу з БГУ, які були утилізовані за заявкою споживача;  $\Delta Q$  – втрати теплової енергії під час вивантаження добрив, %.

Порівняємо системи енергопостачання від БГУ та ЦСЕ, розглядаючи діяльність у сферах [33; 34]. Установлено, що обидві системи мають схожу структуру:  $A$  – підготовка органічних відходів до використання (виробництво або вилучення, транспортування, підготовка до використання, завантаження тощо);  $B$  – виробництво з органічних парових відходів, при цьому БГУ виробляє біогаз й органічні добрива та сприяє їх поширенню;  $C$  – перетворення енергії біогазу (пари) в механічну, потім електричну або теплову енергію;  $D$  – розподіл теплової та електричної енергії споживачам;  $E$  – перетворення теплової або електричної енергії в інші види. Аналіз загального енергетичного балансу показує, що 73 % енергетичних ресурсів БГУ міститься в добривах ( $F = B_{org} + B_{mb}$ ). Сумарні втрати енергії та витрати на забезпечення технологічного процесу становлять 12 % ( $\Sigma W = \Sigma \Delta W + \Delta Q$ ). Коли БГУ постачається енергією з інших ВДЕ, наприклад, з ВЕС і СЕС, кількість комерційної енергії біогазу відповідає 15 % від загальної, тобто в цьому випадку  $N_{be} = N_{ben}$ .

Узагальнений енергетичний баланс БГУ охоплює всі робочі сектори ( $A, B, C, D, E$ ) ЦСЕ [35], хоча тут потужність, дальність передачі та кількість перетворень енергії значно нижчі.

На основі узагальненого енергетичного балансу БГУ (рис. 6), формули (1) та аналізу [31; 32] визначимо значення коефіцієнта використання енергії (КВЕ) так:

- для сектору « $A$ », коли встановлено гравітаційну систему видалення гною, КВЕ становить приблизно 1;
- для сектору « $B$ » КВЕ становить 0,91;
- для сектору « $C$ », який містить дизельну електростанцію, КВЕ становить 0,16;
- коли відстань до споживачів у секторі « $D$ » мінімальна, КВЕ наближається до 1;
- для сектору « $E$ », який передбачає перетворення виробленої енергії в інший тип, ми припускаємо, що середній КВЕ становить 0,8.

Очікується, що кількісна середня оцінка КВЕ (за винятком енергії добрив) у процесі виробництва електроенергії на БГУ буде в межах діапазону:

$$K_{БГУе} = K_A \cdot K_B \cdot K_C \cdot K_D \cdot K_E = 0,115. \quad (2)$$

З огляду на умови виробництва теплової енергії:

$$K_{БГУт} = K_A \cdot K_B \cdot K_C \cdot K_D \cdot K_E = 0,58. \quad (3)$$

На основі даних [12; 17] проведено кількісну оцінку КВЕ централізованих систем електропостачання (ЦСЕ) з ТЕС:

$$K_{ЦСЕ} = K_A \cdot K_B \cdot K_C \cdot K_D \cdot K_E = 0,29, \quad (4)$$

і ТЕС:

$$K_{ТЕС} = K_A \cdot K_B \cdot K_C \cdot K_D \cdot K_E = 0,12. \quad (5)$$

На підставі аналізу отриманих значень КВЕ (2–5) можна зробити висновок, що виробництво енергії (як теплової, так й електричної) локальними системами на базі БГУ можна порівняти



із централізованими ТЕС та котельнями. Однак для віддалених споживачів і сільськогосподарських підприємств використання БГУ підвищить надійність і незалежність енергопостачання та сприятиме покращенню навколишнього середовища.

### Висновки

1. Проведені дослідження висвітлюють унікальні аспекти реформування енергетичного сектору відповідно до вказівок Європейської комісії та потенціал досягнення цілей Зеленої угоди за різними сценаріями. Підкреслюється важливість розвитку енергетичного сектору, оскільки він безпосередньо впливає як на добробут населення, так і на економічне зростання.

2. Економічна життєздатність впровадження БГУ як локального джерела електроенергії є конкурентоспроможною порівняно із централізованими енергосистемами, як-от ТЕС і котельні, з подібною структурою, але меншою кількістю робочих зон.

3. Запровадження БГУ зменшити: залежність країни від імпорту енергоносіїв; дисбаланс енергетичної системи при використанні БГУ як високогнучких установок; а для конкретних виробничих підприємств – витрати на придбання енергії – електричної, теплової, хімічної у вигляді добрив.

4. Дані енергетичного балансу свідчать про те, що 73 % енергетичних ресурсів БГУ зосереджено в біомасі.

### Список використаних джерел

1. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>.

2. Syromyatnikov D., Druzenianova V., Beloglazov A., Bakshtanin A., Matveeva T. Evaluation of the economic profitability of using renewable energy sources in agro-industrial companies. *International Journal of Renewable Energy Development*. 2021. 10(4). 827–837. <https://doi.org/10.14710/ijred.2021.37908>.

3. Halko S., Halko K. Research of electrical and physical characteristics of the solar panel on the basis of cogeneration photoelectric modules. *Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial: Colección de documentos científicos «ΛΟΓΟΣ» con actas de la Conferencia Internacional Científica y Práctica*, 24 de abril de 2020. Barcelona, España: Plataforma Europea de la Ciencia. 2020. 2. 39–44. <https://doi.org/10.36074/24.04.2020.v2.10>.

4. Bien J., Bien B. Rapid assessment of solar PV micro-system energy generation in Poland based on freely available pvlib-py library. *Production Engineering Archives*. 2024. (30)3. 326–332. <https://doi.org/10.30657/pea.2024.30.32>.

5. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Pazyi V., Sereda A., Dudnikov S. The analysis of use of typical load schedules when the design or analysis of power supply systems. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2020. 61–64. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250120>.

6. Chub A., Vinnikov D., Stepenko S., Liivik E., Blaabjerg F. Photovoltaic Energy Yield Improvement in Two-Stage Solar Microinverters. *Energies*. 2019. 12. 3774. <https://doi.org/10.3390/en12193774>.

7. Savchenko O., Miroshnyk O., Moroz O., Trunova I., Sereda A., Dudnikov S., Kozlovskyi O., Buinyi R., Halko S. Improving the Efficiency of Solar Power Plants Based on Forecasting the Intensity of Solar Radiation Using Artificial Neural Networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 137–140. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570009>.

8. Галько С. В., Жарков В. Я., Жарков А. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств : монографія. Мелітополь : Люкс. 2019. 215 с.

9. Androniceanu A. M., Georgescu I., Dobrin C., Dragulanesu I. V. Multifactorial components analysis of the renewable energy sector in the OECD countries and managerial implications. *Polish Journal of Management Studies*. 2020. 22(2). 36–49. <https://doi.org/10.17512/pjms.2020.22.2.03>.

10. Ulewicz R., Siwiec D., Pacana A., Tutak M., Brodny J. Multi-Criteria Method for the Selection of Renewable Energy Sources in the Polish Industrial Sector. *Energies*. 2021. 14. 2386. <https://doi.org/10.3390/en14092386>.



11. Kolcun M., Rusek K., Valentyn T. Power plants of Poland and Slovakia in aspect of sustainable development. *Polish Journal of Management Studies*. 2019. 20(2). 300–310. <https://doi.org/10.17512/pjms.2019.20.2.25>.
12. Belik M., Rubanenko O. Implementation of Digital Twin for Increasing Efficiency of Renewable Energy Sources. *Energies*. 2023. 16. 4787. <https://doi.org/10.3390/en16124787>.
13. Qawaqzeh M., Lazurenko A., Miroshnyk A., Dudnikov S., Savchenko A., Trunova I. Analysis of the energy balance of the local energy supply system based on the bioenergy complex. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2020. 134–138. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160050>.
14. Roncero-Clemente C., Stepenko S., Husev O., Romero-Cadaval E., Vinnikov D. Maximum boost control for interleaved single-phase Quasi-Z-Source inverter. *IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China. 2017. 7698–7703. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217349>.
15. Viacheslav B., Roman B., Andrij S., Volodymyr T. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine. 2019. 84–87. <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>.
16. Olatomiwa L., Mehilef S., Huda A., Ohunakin Olayinka S. Economic evaluation of hybrid energy systems for rural electrification in six geopolitical zones of Nigeria. *Renewable energy*. 2015. 83. 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.057>.
17. Redko K., Borychenko O., Chernyavskiy A., Sayenko V., Dudnikov S. Comparative analysis of innovative development strategies of the fuel and energy complex of Ukraine and EU countries: international experience. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2023. 13(2). 301–308. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14035>.
18. Aslani A., Helo P., Naaranoia M., The role of renewable energy policy in energy dependence in Finland: a system dynamics approach. *Applied energy*. 2014. 113. 758–765. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.015>.
19. Geletukha G., Zhelezna T., Bashtovyi A. Energy and ecology, analysis of technology for production capacity from biomass. *Part 1 Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. 39(1). <https://doi.org/10.31472/andhe.1.2017.09>.
20. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S., Mikhailov E., Kovalov O., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V. Improving energy efficiency of grain cleaning technology. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. 12(10). 5190. <https://doi.org/10.3390/app12105190>.
21. Markovic S. Exploitation characteristics of teeth flanks of gears regenerated by three hard-facing procedures. *Materials*. 2021. 14. art. 4203. <https://doi.org/10.3390/ma14154203>.
22. Dwornicka R., Pietraszek J. The outline of the expert system for the design of experiment. *Production Engineering*. 2018. 20. 43–48. <https://doi.org/10.30657/pea.2018.20.09>.
23. Fialko N. Environmental aspects of heat recovery systems of boiler plants. *E3S Web of Conf.* 2019. 10010. art. 00015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910000015>.
24. Галько С.В. Експериментальне дослідження і визначення параметрів когенераційного фотоелектричного модуля для гібридних сонячних електростанцій. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали Міжнар. наук. конф.*, 10 квіт. 2020 р. Луцьк: МЦНД. 2020. Т. 1. С. 83–90. <https://doi.org/10.36074/10.04.2020.v1.10>.
25. Галько С.В. Використання когенераційних фотоелектричних модулів для зарядки акумуляторів електромобілів. *Праці ТДАТУ. Технічні науки*. Мелітополь: ТДАТУ. 2019. Вип. 19. Т. 3. С. 130–141. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-130-141>.
26. Lipiński T. The structure and mechanical properties of Al-7 %SiMg alloy treated with a homogeneous modifier. *Solid State Phenomena*. 2010. 163. 183–186. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.163.183>.
27. Scendo M., Radek N., Trela J. Influence of laser treatment on the corrosive resistance of WC-Cu coating produced by electrospark deposition. *International Journal of Electrochemical Science*. 2013. 8. 9264–9277.
28. Krynke M., Klimecka-Tatar D. The use of Computer Simulation Techniques in Production Management. *Materials Research Proceedings*. 2022. 24. 126–133. <https://doi.org/10.21741/9781644902059-19>.
29. Ingaldi M., Ulewicz R. The Business Model of a Circular Economy in the Innovation and Improvement of Metal Processing. *Sustainability*. 2024. 16. 5513. <https://doi.org/10.3390/su16135513>.
30. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskiy A.O. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «ЧТНП-Черніхив-330» in the residential



area and methods of its decreasing to a safe level. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. 6. 55–62. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>.

31. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>.

32. Korchevoi Y. State and prospects of solid fuel energy development of Ukraine. Heat energy – new challenges of the time, Lviv: Ukrainian Technologies Fund. 2009. 29–35.

33. Al. Issa H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>.

34. Красножон А. В., Буйний Р. О., Пентегов І. В. Розрахунок втрат активної потужності в заземлювальному проводі повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2016. 4(2016). С. 23–25. <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.023>.

35. Миколюк О., Желавська І., Ляховець В. Формування ключових векторів забезпечення енергетичної безпеки крізь призму інноваційного розвитку альтернативних джерел енергії. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2018. 3(1). С. 199–204. <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/6698>.

36. Розвиток європейського ринку виробництва біогазу і біометану – статистика ЄБА 2022. URL: <https://uabio.org/materials/14133/> (дата звернення: 08.02.2025).

37. EBA Statistical Report 2023 | European Biogas Association. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/> (дата звернення: 08.02.2025).

38. Європейська карта видобутку біометану. URL: [https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/05/GIE\\_EBA\\_Biomethane-Map-2022-2023.pdf](https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2023/05/GIE_EBA_Biomethane-Map-2022-2023.pdf) (дата звернення: 08.02.2025).

39. Розвиток виробництва біометану в Європі та можливості Україні. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2023/02/2023-02-10-UABio-Friday-Matveev.pdf> (дата звернення: 08.02.2025).

*Стаття надійшла до редакції 17.02.2025 р.*

**O. Dudnikov<sup>1</sup>, S. Halko<sup>2</sup>, O. Miroshnyk<sup>1</sup>, O. Savchenko<sup>1</sup>, D. Zelenkov**

<sup>1</sup> State Biotechnological University

<sup>2</sup> Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

## PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE UNIFIED ENERGY SYSTEM

### *Summary*

Against the backdrop of the rapid growth of renewable energy production – primarily from wind turbines and solar power plants – there is a growing need to balance their variable capacity to ensure stability of operation. A key characteristic of energy sources from wind farms and solar power plants is their dependence on weather conditions, which leads to unstable energy production. When large-scale renewable energy sources (RES) is integrated into power systems, there are problems with maintaining both static and dynamic stability of operating modes. If the share of RES in the total energy balance exceeds 2 %, existing grids often lack the technical ability to cope with generation and flow peaks, which requires infrastructure modernization and grid modernization. Research shows that the most effective one-size-fits-all approach to balancing this variability is to build flexibility into the energy system of other RES, which allows for adjustments in electricity production or consumption in response to fluctuations from wind farms and solar power plants.

The article proposes to use biogas plants (BGP) as highly flexible energy sources. An important step in deciding whether to use them is to predict the energy efficiency of the proposed biogas-based energy supply system compared to the current centralized model. Energy efficiency indicators were evaluated using the analysis of energy balances constructed



using averaged statistical data on energy losses and consumption at biogas facilities. Цей підхід рекомендується використовувати на ранніх етапах визначення технічних вимог, що дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо побудови або модернізації існуючих енергетичних систем. The introduction of BGPs as local energy sources turns out to be economically competitive compared to centralized systems, such as thermal power plants (TPPs) and boiler houses. BGP have a similar structure to these systems, but work with less equipment required to operate. The integration of BGPs can help reduce national dependence on imported energy, correct imbalances in the energy system due to their flexibility, and reduce the cost of energy – electrical, thermal or chemical (e.g. fertilizers) – for specific manufacturing plants. Data on the energy balance show that 73 % of the energy resources of the BGP are concentrated in biomass.

**Keywords:** biogas plant, energy supply system, energy balance, solar power plant, wind farm, energy efficiency.