

УДК 620.952:658.5

DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.217.270-279>**Варченко О.М.**

докторка економічних наук

Білоцерківський національний аграрний університет

Varchenko Olga

Dr. of Economic Sc.

Bila Tserkva National Agrarian University

<https://orcid.org/0000-0002-9090-0605>

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

У статті обґрунтовано методичні підходи до оцінювання та моніторингу біоенергетичних ресурсів переробних підприємств з урахуванням ресурсних, енергетичних, технологічних, економічних та екологічних параметрів. Запропоновано послідовне визначення валового, доступного, технічного, економічно доцільного та фактично використаного потенціалу біомаси. Сформовано систему показників моніторингу, яка охоплює обсяги ресурсів, їхні якісні характеристики, енергетичну конверсію, собівартість біоенергії, рівень енергетичної автономії, циркулярність та екологічний ефект. Розроблено алгоритм моніторингу, який передбачає ідентифікацію ресурсів, паспортизацію, збір і верифікацію даних, автоматизований розрахунок показників, виявлення відхилень та управлінське реагування. Обґрунтовано доцільність цифровізації моніторингу та інтеграції його результатів у систему енергетичного менеджменту підприємства.

Ключові слова: біоенергетичні ресурси, переробні підприємства, біомаса, енергетичний потенціал, моніторинг, енергетична автономія, циркулярна економіка, енергетичний менеджмент.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT AND MONITORING OF BIOENERGY RESOURCES OF PROCESSING ENTERPRISES

The article substantiates methodological approaches to the assessment and monitoring of bioenergy resources at processing enterprises under increasingly stringent requirements for energy autonomy, resource efficiency, decarbonization, and the transition to a circular model of economic activity. The purpose of the study is to develop a comprehensive methodological toolkit for determining the gross resource, available, technical, economically feasible, and actually utilized potential of bioenergy resources, thereby providing an analytical basis for managerial decision-making. The methodological framework combines systemic, computational and analytical, coefficient-based, comparative, and environmental-economic approaches, as well as methods of analysis, synthesis, systematization, classification, and monitoring. A sequential procedure for assessing bioenergy potential is proposed, ranging from the gross resource potential to its economically feasible and actually utilized components, taking into account feedstock availability, seasonality, moisture content, technological suitability, energy conversion efficiency, costs, and alternative uses of by-products. A system of indicators has been developed encompassing resource, energy, technological, economic, managerial, circularity, environmental, and risk-related dimensions. A ten-stage monitoring algorithm is proposed, including resource identification and profiling, data collection and verification, automated calculation of indicators, comparison with target values, deviation alerts, corrective actions, and periodic updating of system parameters. The scientific novelty of the study lies in the development of a multi-level assessment and monitoring system that integrates material, energy, economic, and environmental parameters within a unified information and analytical framework. The practical significance of the proposed approach lies in its potential integration into management accounting and energy management systems of processing enterprises in order to improve the efficiency of waste and by-product utilization, strengthen energy autonomy, and enhance resilience to external energy-related risks.

Keywords: bioenergy resources, processing enterprises, biomass, energy potential, monitoring, energy autonomy, circular economy, energy management.

JEL Classification: Q20, Q42, Q56, C81.

Постановка проблеми. Посилення декарбонізаційних вимог, зростання вартості традиційних енергоресурсів та необхідність зміцнення енергетичної стійкості підприємств актуалізують проблему ефективного

використання біоенергетичного потенціалу переробної промисловості. Органічні відходи й побічна продукція виробництва становлять вагомий ресурс для формування вторинних енергетичних потоків, використання

ISSN друкованої версії: 2224-6282

ISSN електронної версії: 2224-6290

© Варченко О.М., 2026

яких здатне знизити енергозалежність, виробничі витрати та екологічне навантаження та водночас підтримувати принципи циркулярної економіки. Проте існуючі методичні підходи зосереджені переважно на окремих видах сировини або агрегованих показниках і недостатньо враховують комплексний взаємозв'язок ресурсних, енергетичних, економічних та екологічних параметрів на рівні підприємства. Це зумовлює необхідність удосконалення інструментарію оцінювання й моніторингу біоенергетичних ресурсів із урахуванням галузевої специфіки, технологічних можливостей та критеріїв економічної ефективності їх використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика формування, оцінювання та ефективного використання біоенергетичних ресурсів набуває особливої актуальності в контексті підвищення енергетичної автономії підприємств, декарбонізації виробництва та переходу до циркулярної моделі господарювання. У наукових працях І. Купчука, Я. Гонтарука та Ю. Присяжнюка обґрунтовано перспективи використання агробіомаси для виробництва біогазу й підвищення енергетичної самозабезпеченості переробних підприємств АПК [1], Н. Зеленчук розроблено підхід до оцінювання еколого-економічної ефективності біогазового виробництва з урахуванням ресурсних, економічних та екологічних параметрів [2], а Г. Гелетухою, Т. Железною, П. Кучеруком і С. Драгневим комплексно оцінено енергетичний потенціал основних видів біомаси України та напрями їх залучення до енергетичного балансу [3]. Перспективи поєднання основного виробництва з переробкою побічної продукції на біогаз і біоетанол досліджено І. Фурман [4]. У свою чергу І. Фурман і Д. Ксенчин акцентують увагу на формуванні інтегрованих систем управління переробкою органічних відходів підприємств АПК [5]. У працях І. Гончарук, Д. Токарчук, Я. Гонтарука та Т. Коломієць біогаз і біометан розглядаються як інструменти кліматичної нейтральності та раціонального управління ресурсними потоками [6], а І. Фурман, О. Дмитрик та І. Лисогор обґрунтовують необхідність комплексного оцінювання біоенергетичного потенціалу з урахуванням сировинної бази, інфраструктури та технологічних можливостей [7]. О. Шабала та Л. Матійчук визначають біоенергетику важливим резервом зміцнення енергетичної стійкості України в умовах воєнного стану [8], тоді як О. Присяжнюк, О. Маляренко, А. Лаздіньш та Т. Костина доводять доцільність застосування супутникових технологій і БПЛА для моніторингу біоенергетичних культур [9].

Водночас переважна більшість досліджень зосереджена на макро- і регіональному рівнях або на окремих видах біомаси та технологіях її переробки, що зумовлює необхідність розроблення комплексного методичного підходу до оцінювання й систематичного моніторингу біоенергетичних ресурсів безпосередньо на рівні переробного підприємства з поєднанням натуральних, енергетичних, економічних, технологічних та екологічних показників у динаміці.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та удосконалення методичних підходів до комплексного

оцінювання й моніторингу біоенергетичних ресурсів переробних підприємств, спрямованих на визначення їхнього ресурсного, технічно доступного, енергетичного та економічного потенціалу, встановлення ефективності залучення відходів і побічної продукції до енергетичного використання, а також формування інформаційно-аналітичної основи для ухвалення управлінських рішень щодо підвищення енергетичної автономії, ресурсоефективності та екологічної стійкості підприємств.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано методи аналізу й синтезу – для узагальнення теоретико-методичних засад оцінювання біоенергетичного потенціалу; систематизації та класифікації – для групування відходів і побічної продукції за походженням, фізичними характеристиками, енергетичною цінністю та технологічною придатністю; розрахунково-аналітичний метод – для послідовного визначення теоретичного, технічно доступного та економічно доцільного потенціалу біоенергетичних ресурсів; коефіцієнтний метод – для трансформації натуральних обсягів сировини в енергетичний еквівалент; порівняльний аналіз – для оцінювання альтернативних напрямів енергетичного використання біомаси; економічний аналіз – для визначення потенційного ефекту заміщення традиційних енергоресурсів; еколого-економічний підхід – для врахування ресурсозберігаючих та природоохоронних результатів використання біоенергетичних ресурсів.

Виклад основних результатів дослідження. Формування ефективної системи оцінювання біоенергетичних ресурсів переробних підприємств потребує відмови від їхнього трактування винятково як статичного обсягу відходів або побічної продукції, що потенційно може використовуватися для отримання енергії. Біоенергетичні ресурси доцільно розглядати як динамічну складову матеріально-енергетичних потоків підприємства, кількісні та якісні характеристики якої змінюються залежно від обсягів основного виробництва, структури сировини, сезонності її надходження, технологічних параметрів переробки, умов зберігання, логістики та способу подальшої енергетичної конверсії. Такий підхід відповідає сучасній концепції циркулярної біоекономіки, відповідно до якої побічна продукція та органічні відходи розглядаються не як кінцевий результат виробничого процесу, а як вторинний ресурс, здатний повторно включатися у господарський оборот [5; 6; 15-18].

На основі узагальнення наявних підходів [2; 3; 7; 12; 14; 18] запропоновано здійснювати оцінювання біоенергетичних ресурсів переробного підприємства за принципом послідовного уточнення їх потенціалу: валовий ресурсний потенціал – доступний ресурсний потенціал – технічний енергетичний потенціал – економічно доцільний потенціал – фактично використаний потенціал. Така послідовність дає можливість уникнути завищення оцінок, яке виникає у разі механічного множення загальної маси відходів на їхню теплотворну здатність без урахування втрат, альтернативного використання, сезонності, вологості,

технологічних обмежень та економічної доцільності.

На першому етапі визначається валовий ресурсний потенціал як сукупний обсяг біогенних відходів і побічної продукції, що утворюється внаслідок виробничої

діяльності підприємства протягом установленого періоду. Для i -го виду ресурсу його величину доцільно визначати за формулою (1):

$$BR_i = Q \times k_i \quad (1)$$

де:

BR_i – валовий обсяг i -го виду біоенергетичного ресурсу, т;

Q – обсяг переробленої основної сировини або виробленої продукції, т;

k_i – нормативний або фактичний коефіцієнт утворення відповідного виду побічної продукції чи відходів, т/т.

У разі наявності первинного обліку доцільним є використання безпосередньо фактичної маси ресурсу, отриманої за даними вагового обладнання, технологічних журналів, ERP-системи чи складського обліку. Розрахунковий метод на основі коефіцієнтів утворення доцільно застосовувати як контрольний або за відсутності систематизованих первинних даних.

Водночас валовий обсяг ще не характеризує

реальну кількість ресурсу, яку підприємство може спрямувати на енергетичне використання. Частина побічної продукції може реалізовуватися чи використовуватися як корм, добриво, технологічна сировина або мати інше економічно доцільне призначення. Крім того, можливі втрати під час зберігання та транспортування. Тому пропонується визначати доступний ресурсний потенціал за формулою (2):

$$BR_i^a = BR_i \times k_i^a \quad (2)$$

де:

BR_i^a – доступний обсяг i -го ресурсу, т;

k_i^a – коефіцієнт доступності ресурсу, частка одиниці.

Коефіцієнт доступності має враховувати альтернативні напрями використання, технологічну необхідність залишення частини матеріалу у виробничому циклі, фактичні втрати, можливості накопичення та зберігання. Це особливо важливо для ресурсів із сезонним характером утворення. Дослідження сучасних біоенергетичних ланцюгів свідчать, що стабільність ресурсної

бази, передбачуваність її кількості та якості є одними з головних передумов економічної ефективності біоенергетичних проєктів [12; 13; 18].

Наступним рівнем оцінювання є визначення теоретичного енергетичного потенціалу доступної біомаси, що визначається за формулою (3):

$$E_i^{th} = BR_i^a \times q_i \quad (3)$$

де:

E_i^{th} – теоретичний енергетичний потенціал i -го ресурсу, ГДж;

q_i – нижча теплота згоряння або енергетичний еквівалент ресурсу, ГДж/т.

При використанні біомаси для анаеробного зброджування замість нижчої теплоти згоряння доцільно використовувати показник потенційного виходу біогазу або метану на одиницю органічної сухої речовини. Відповідно для біогазового напрямку оцінювання енергетичний потенціал залежить не лише від маси

сировини, а й від вмісту сухої речовини, органічної сухої речовини, біодоступності субстрату, його складу та технологічного режиму зброджування [2; 5; 6].

Оскільки весь теоретичний потенціал не може бути трансформований у корисну енергію, визначається технічний енергетичний потенціал (4)

$$E_i^{tech} = E_i^{th} \times k_i^t \times \eta_i \quad (4)$$

де:

k_i^t – коефіцієнт технологічної придатності ресурсу для обраного способу енергетичної конверсії;

η_i – коефіцієнт корисного перетворення енергії відповідною установкою.

Зазначимо, що включення двох коригуючих параметрів є принципово важливим. Коефіцієнт технологічної придатності характеризує частку доступної біомаси, яка за своїми характеристиками може використовуватися у визначеній технології, а коефіцієнт корисного перетворення враховує втрати в процесі виробництва тепла, електроенергії, біогазу або іншого енергоносія. Відмінності у вологості, зольності,

фракційному складі та теплотворній здатності біопалива безпосередньо впливають на режим роботи енергетичного обладнання, його ККД і рівень викидів, що підтверджує необхідність постійного контролю якісних параметрів біомаси [19].

Сумарний технічний потенціал підприємства визначається за формулою (5):

$$E^{tech} = \sum E_i^{tech} \quad (5)$$

Однак сам факт технічної можливості використання біомаси не означає економічної доцільності реалізації відповідного проєкту. Тому наступним

елементом запропонованої методики є оцінювання вартості одиниці корисної енергії, отриманої з біоенергетичного ресурсу (6):

$$C_{\beta} = (C^c + C^p + C^s + C^l + C^{\text{conv}} - R_{\beta}) / E^{\text{use}} \quad (6)$$

де:

C_{β} – собівартість одиниці корисної біоенергії;

C^c – витрати на збір ресурсу;

C^p – витрати на підготовку;

C^s – витрати на зберігання;

C^l – логістичні витрати;

C^{conv} – витрати на енергетичну конверсію;

R_{β} – дохід або економія від реалізації супутньої продукції;

E^{use} – обсяг корисно отриманої енергії.

Для біогазових установок до супутніх економічних ефектів можна віднести використання або реалізацію дигестату, а для інших технологій – реалізацію побічних продуктів біоконверсії. Урахування таких результатів узгоджується з принципом комплексної переробки ресурсів та дозволяє об'єктивніше визначати економічну доцільність біоенергетичних рішень [2; 5; 15-17].

Порівняння C_{β} із вартістю енергоресурсу, який замінюється, дозволяє визначити прямий економічний ефект. Для капіталомістких проєктів оцінювання доцільно доповнювати традиційними інвестиційними критеріями – чистою приведеною вартістю (NPV), внутрішньою нормою дохідності (IRR), дисконтованим терміном окупності та індексом прибутковості. Економічно доцільним пропонується визнавати потенціал тієї

частини ресурсної бази, використання якої забезпечує позитивне значення NPV за обґрунтованої ставки дисконту та прийнятного для підприємства строку повернення інвестицій. Такий підхід має особливу актуальність за умов волатильності цін на традиційні енергоресурси, оскільки економічна привабливість локальної біоенергетики може змінюватися разом із цінами газу, електроенергії та логістичними витратами [13].

Важливим результатом дослідження є обґрунтування системи показників моніторингу, які характеризують не лише обсяги біоенергетичних ресурсів, а й стабільність їхнього формування, ефективність перетворення, економічний ефект, рівень заміщення традиційних енергоресурсів та екологічні результати. Запропонована система представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Система показників оцінювання та моніторингу біоенергетичних ресурсів переробного підприємства

Група	Показник	Метод визначення / формула	Одиниця виміру	Рекомендована періодичність
1	2	3	4	5
Ресурсні	Обсяг утворення біогенного ресурсу	фактичне зважування або $Q \times k_i$	т	змінна / доба
Ресурсні	Питомий вихід побічної продукції	BR_i / Q	т/т	місяць
Ресурсні	Коефіцієнт доступності	BR_i^a / BR_i	частка, %	місяць
Ресурсні	Вологість	лабораторне або інструментальне визначення	%	партія / доба
Ресурсні	Вміст сухої речовини	лабораторний аналіз	%	партія / тиждень
Ресурсні	Зольність	лабораторний / інструментальний аналіз	%	партія
Ресурсні	Нижча теплота згоряння	лабораторне визначення / NIR-модель	МДж/кг	партія / online
Ресурсні	Коефіцієнт варіації обсягів ресурсу	$\sigma(BR) / \overline{BR} \times 100$	%	місяць / квартал
Енергетичні	Теоретичний енергетичний потенціал	$BR_i^a \times q_i$	ГДж, МВт·год	місяць
Енергетичні	Технічний енергетичний потенціал	$E_i^{\text{th}} \times k_i^t \times \eta_i$	ГДж, МВт·год	місяць

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
Енергетичні	Фактична корисна енергія	дані вузлів обліку	ГДж, МВт·год	доба / місяць
Технологічні	Коефіцієнт енергетичної конверсії	$E^{usc} / E^{th} \times 100$	%	змiна / доба
Технологічні	Вихід біогазу	$V_{bio} / \text{маса субстрату}$	м³/т	доба
Технологічні	Вміст метану у біогазі	інструментальне вимірювання	%	безперервно
Економічні	Собівартість біоенергії	сукупні релевантні витрати / E^{usc}	грн/ГДж; грн/МВт·год	місяць
Економічні	Економія витрат на енергію	витрати базового сценарію – фактичні витрати	грн	місяць
Економічні	NPV біоенергетичного проєкту	дисконтований грошовий потік	грн	квартал / рік
Економічні	Термін окупності	інвестиції / середній чистий грошовий ефект	років	квартал / рік
Управлінські	Коефіцієнт використання біоенергетичного потенціалу	$E^{usc} / E^{tech} \times 100$	%	місяць
Управлінські	Рівень енергетичної автономії	$E_{bio} / E^{tot} \times 100$	%	місяць
Циркулярні	Коефіцієнт енергетичної утилізації біовідходів	$BR^{en} / BR^{tot} \times 100$	%	місяць
Екологічні	Уникнені викиди парникових газів	$E_{bio} \times (EF^{fossil} - EF_{bio})$	кг або т CO ₂ -екв.	місяць / рік
Екологічні	Зменшення відходів, що потребують видалення	$BR^{tot} - BR^{disp}$	т; %	місяць
Ризикові	Забезпеченість запасами ресурсу	фактичний запас / середньодобове споживання	днів	доба
Ризикові	Частота критичних відхилень якості	кількість невідповідних партій / загальна кількість партій	%	місяць

Джерело: розроблено автором на основі [2; 3; 5; 12; 17–20].

Зміст табл. 1 свідчить, що моніторинг доцільно будувати на поєднанні ресурсного, енергетичного, технологічного, економічного, циркулярного, екологічного та ризикового блоків. Лише контроль тоннажу відходів не дозволяє оцінити реальний стан біоенергетичної системи. Наприклад, збільшення маси ресурсу за одночасного підвищення його вологості не обов'язково означає зростання енергетичного потенціалу. Аналогічно стабільний обсяг ресурсів може супроводжуватися

падінням фактичної енерговіддачі через погіршення якісних характеристик сировини або зниження ефективності технологічного обладнання. Тому кількісні показники повинні аналізуватися у взаємозв'язку з показниками якості та енергетичної конверсії [19].

Одним із головних узагальнюючих показників пропонуємо використовувати коефіцієнт використання технічного біоенергетичного потенціалу (7):

$$K_a = E^{usc} / E^{tech} \times 100 \% \quad (7)$$

де:

E^{usc} – фактично отриманий і корисно використаний обсяг біоенергії;

E^{tech} – розрахований технічний потенціал.

Зазначений показник характеризує розрив між ресурсними можливостями підприємства та фактичним рівнем їх реалізації. Низьке значення може бути наслідком недостатньої потужності енергетичного обладнання, неритмічного завантаження установки, втрат

біомаси, низької якості сировини, відсутності накопичувальних потужностей або недостатньої потреби підприємства в енергії у відповідні часові періоди.

Не менш важливим є коефіцієнт енергетичної автономії, що визначається за формулою (8):

$$K_{\text{aut}} = E_{\text{bio}} / E_{\text{tot}} \times 100 \quad (8)$$

де:

E_{bio} – обсяг енергії, отриманої з власних біоенергетичних ресурсів;

E_{tot} – загальне кінцеве енергоспоживання підприємства.

Зазначимо, що його динаміка дозволяє оцінити, наскільки використання власної біомаси знижує залежність підприємства від зовнішнього постачання природного газу, електричної та теплової енергії. В умовах енергетичних ризиків для України цей показник має не

лише економічне, але й стратегічне значення [1; 8; 10; 11; 13].

Для оцінювання реалізації принципів циркулярної економіки пропонується розраховувати коефіцієнт енергетичної утилізації біогенних відходів (9):

$$K^{\text{cir}} = BR^{\text{en}} / BR^{\text{tot}} \times 100 \% \quad (9)$$

де:

BR^{en} – маса біогенних відходів і побічної продукції, спрямованих на енергетичну переробку;

BR^{tot} – загальна маса утворених біогенних відходів і побічної продукції.

Зауважимо, що його доцільно інтерпретувати з урахуванням каскадного принципу використання ресурсів. Максимізація енергетичної утилізації не завжди є оптимальною, якщо певний матеріал може використовуватися для виробництва продукції з вищою доданою вартістю. Сучасні підходи до циркулярної біоекономіки передбачають оцінювання альтернативних

сценаріїв валоризації та вибір того напрямку, який забезпечує найкраще співвідношення економічних, ресурсних і екологічних результатів [15–18].

До екологічного блоку моніторингу доцільно включати оцінювання уникнутих викидів парникових газів. У спрощеному вигляді відповідний ефект може визначатися за формулою (10):

$$\Delta GHG = E_{\text{bio}} \times (EF^f - EF_{\beta}) \quad (10)$$

де:

ΔGHG – обсяг уникнутих викидів CO_2 -екв.;

EF^f – питомий фактор викидів традиційного енергоносія, який заміщується;

EF_{β} – питомі життєвоциклолі викиди відповідного біоенергетичного ланцюга.

Для практичних розрахунків необхідно використовувати актуальні нормативні або верифіковані галузеві коефіцієнти та враховувати технологічний ланцюг виробництва біоенергії. Це дозволяє уникнути методичної помилки, за якої використання біомаси автоматично прирівнюється до нульових викидів без урахування її підготовки, транспортування, перетворення та допоміжного енергоспоживання. Сучасні дослідження сталості біоенергетичних ланцюгів акцентують необхідність комплексного врахування економічних, екологічних і циркулярних характеристик [17; 18; 20].

Результатом дослідження також є розроблення алгоритму моніторингу біоенергетичних ресурсів переробного підприємства, який забезпечуватиме перехід від епізодичного оцінювання до постійної інформаційно-аналітичної системи підтримки управлінських рішень.

Етап 1. Визначення меж системи моніторингу. На початковому етапі встановлюються виробничі підрозділи, технологічні лінії та види ресурсів, що підлягають спостереженню. Формується перелік усіх потоків органічної побічної продукції та відходів із зазначенням джерела їхнього утворення, можливих напрямів використання та відповідальних структурних підрозділів. Важливим є уникнення подвійного обліку певного ресурсу на різних стадіях технологічного процесу.

Етап 2. Формування паспорта біоенергетичного ресурсу. Для кожного виду ресурсу створюється електронний паспорт, який містить його найменування, джерело виникнення, середньодобовий, місячний та

річний обсяг, сезонність, вологість, вміст сухої й органічної сухої речовини, зольність, теплотворну здатність або потенційний вихід біогазу, особливості зберігання, строки допустимого накопичення, альтернативні напрями використання та орієнтовну вартість. Така паспортизація створює інформаційну основу для картування ресурсних потоків підприємства [17].

Етап 3. Організація первинного збору даних. Інформація повинна надходити максимально близько до місця утворення ресурсу. Основними джерелами є вагове обладнання, лічильники, технологічні журнали, лабораторні аналізи, системи автоматизованого управління технологічним процесом, ERP-системи, дані складського обліку, датчики температури, вологості, витрати та складу газу. Для зовнішньої ресурсної бази можуть додатково використовуватися геоінформаційні системи, дистанційне зондування та супутниковий моніторинг [9; 12].

Етап 4. Верифікація та очищення даних. Перед розрахунком показників інформація проходить автоматизовану або експертну перевірку на повноту, логічну узгодженість і наявність аномальних значень. Наприклад, обсяг відходів має бути співставлений із фактичним обсягом переробленої сировини та нормативним діапазоном їхнього утворення. Значні відхилення повинні не механічно виключатися з масиву, а ідентифікуватися як потенційний сигнал технологічної зміни, аварійного режиму, облікової помилки або зміни характеристик сировини.

Етап 5. Автоматизований розрахунок системи

показників. На основі верифікованих даних визначаються ресурсний, доступний і технічний потенціал, вихід енергії, ККД конверсії, собівартість, частка заміщення традиційного палива, рівень енергетичної автономії, частка утилізації відходів та екологічний ефект. Розрахунки доцільно здійснювати автоматично з формуванням часових рядів за добу, тиждень, місяць, квартал і рік.

Етап 6. Порівняння фактичних показників із базовими та цільовими значеннями. Для кожного KPI

$$D_{jt} = (X_{jt} - X_j^b) / X_j^b \times 100 \% \quad (11)$$

де:

X_{jt} – фактичне значення j -го показника у період t ;

X_j^b – базове або цільове значення.

Етап 7. Сигналізація про відхилення та визначення їх причин. Для оперативного використання результатів доцільно застосовувати «світлофорну» модель: зелена зона – показник перебуває в установленому допустимому діапазоні; жовта – наближається до критичного рівня та потребує аналізу; червона – перевищує допустиму межу та потребує управлінського втручання. Межі зон мають встановлюватися індивідуально для кожного показника. Така система дозволяє перетворити моніторинг із функції накопичення даних на інструмент раннього попередження.

Етап 8. Вибір та реалізація коригувальних управлінських заходів. Залежно від характеру відхилення можуть застосовуватися зміна структури субстратів, коригування режимів роботи енергетичного обладнання, сушіння або попередня підготовка біомаси, зміна строків її зберігання, перерозподіл ресурсів між альтернативними технологіями, залучення додаткової зовнішньої сировини, зміна графіка роботи установки або перегляд економічної моделі використання ресурсу.

Етап 9. Оцінювання результативності прийнятого рішення. Після здійснення коригувальних заходів порівнюється стан показників «до» і «після» втручання. Це дає можливість накопичувати власну базу управлінських рішень та встановлювати фактичний вплив окремих заходів на енерговіддачу, собівартість і стабільність технологічного процесу.

Етап 10. Періодичне оновлення параметрів системи, яке доцільно здійснювати не рідше одного разу на рік, а за умов суттєвої зміни технології – частіше,

встановлюються планове значення, допустимий інтервал та критичний рівень відхилення. Порогові значення повинні формуватися на основі технічних характеристик обладнання, фактичної історичної варіабельності показника та управлінських цілей конкретного підприємства, а не використовуватися як універсальні нормативи для всіх підприємств.

Відносно відхилення показника пропонуємо визначати за формулою (11):

доцільно переглядати коефіцієнти утворення ресурсів, їхні теплотворні характеристики, нормативи втрат, коефіцієнти технологічної придатності, економічні параметри та цільові значення KPI. У результаті система моніторингу набуває адаптивного характеру.

Перспективним напрямом практичної реалізації запропонованого алгоритму є цифровізація моніторингу. Сучасні технології дозволяють поєднувати дані виробничого обліку з інформацією датчиків, лабораторних систем та енергетичних лічильників.

При цьому цифровізація не повинна обмежуватися встановленням датчиків. Важливішим є створення єдиного інформаційного контуру, у якому фізичний рух біоенергетичних ресурсів пов'язаний із їхньою енергетичною та економічною оцінкою. Наприклад, автоматично зафіксоване зниження вологості біомаси має відображатися не лише у технологічному журналі, а й спричиняти перерахунок її фактичного енергетичного потенціалу, прогнозованої генерації та собівартості одиниці енергії. Така інтеграція дозволяє переходити від моніторингу окремих параметрів до управління біоенергетичним потенціалом підприємства.

Автором запропоновано здійснювати оцінювання стабільності ресурсного забезпечення, оскільки середньорічний обсяг біомаси може формувати хибне уявлення про здатність підприємства безперервно забезпечувати біоенергетичну установку сировиною. Для цього доцільно розраховувати коефіцієнт варіації щомісячних обсягів (12):

$$CV = \sigma_{BR} / \bar{BR} \times 100 \% \quad (12)$$

де:

σ_{BR} – стандартне відхилення обсягу ресурсу;

$\bar{BR}$ – середнє значення за аналізований період.

Зазначимо, що чим вищою є варіабельність, тим більші вимоги до накопичувальних потужностей, диверсифікації сировини або формування зовнішнього ланцюга постачання. Відтак оцінка біоенергетичного ресурсу повинна охоплювати не тільки його середній річний обсяг, а й календар утворення та прогноз балансу «надходження – запас – споживання». Такий підхід особливо актуальний для підприємств, діяльність яких

залежить від сезонності сільськогосподарської сировини [12; 18].

Сформований методичний підхід дозволяє також диференціювати систему моніторингу за часовими горизонтами. Оперативний моніторинг здійснюється протягом зміни або доби та охоплює масу ресурсів, їхню вологість, параметри технологічного процесу та обсяги генерації. Тактичний моніторинг проводиться

щомісячно і включає оцінювання собівартості, використання потенціалу, рівня автономії, запасів та відхилень від плану. Стратегічний моніторинг здійснюється щоквартально або щорічно і спрямований на оцінку економічної ефективності інвестицій, екологічних результатів, доцільності розширення потужностей та зміни структури біоенергетичних технологій.

Таким чином, науково-методичний результат дослідження полягає у формуванні багаторівневої системи оцінювання та моніторингу, яка, на відміну від підходу, що заснований лише на визначенні фізичного обсягу біомаси, передбачає послідовну трансформацію ресурсних показників у показники доступного, технічного та економічно доцільного енергетичного потенціалу. Її практичне застосування дозволяє встановити, яка кількість біоенергетичних ресурсів реально утворюється на підприємстві; яка їхня частина є доступною для енергетичної переробки; скільки корисної енергії можна отримано; наскільки економічно доцільним є її виробництво; яку частину енергоспоживання підприємства вона здатна замінити; та який екологічний і циркулярний ефект забезпечується.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості інтегрувати його в систему управлінського обліку та енергетичного менеджменту переробного підприємства. Регулярне оновлення показників створює інформаційну основу для прогнозування потреби в традиційних енергоносіях, планування завантаження біоенергетичного обладнання, оцінювання доцільності інвестицій у додаткові потужності, оптимізації структури відходів і побічної продукції та підвищення рівня енергетичної автономії. У ширшому вимірі це сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, декарбонізації виробництва та підвищенню стійкості переробних підприємств до зовнішніх енергетичних ризиків.

Висновки. У результаті дослідження обґрунтовано комплексний методичний підхід до оцінювання та моніторингу біоенергетичних ресурсів переробних підприємств. Запропонована система показників поєднує ресурсні, енергетичні, технологічні, економічні, управлінські, циркулярні, екологічні та ризикові параметри та забезпечує комплексне оцінювання ефективності залучення відходів і побічної продукції до енергетичного обороту, рівня енергетичної автономії підприємства та екологічного ефекту. Розроблений алгоритм моніторингу, заснований на паспортизації ресурсів, систематичному зборі й верифікації даних, автоматизованому розрахунку показників, виявленні відхилень та реалізації коригувальних управлінських рішень, формує інформаційно-аналітичну основу для переходу від епізодичного контролю до безперервного управління біоенергетичним потенціалом. Інтеграція запропонованого підходу сприятиме ефективнішому використанню біомаси й енергії, скороченню відходів і залежності від традиційних енергоносіїв та посиленню ресурсної й екологічної стійкості підприємств відповідно до принципів декарбонізації й циркулярної економіки.

Декларація про використання ІІІ. Під час підготовки статті було використано окремі інструменти штучного інтелекту та цифрові сервіси допоміжного характеру. Grammarly застосовувався для перевірки правопису, граматики та стилістичного редагування окремих фрагментів тексту, Gemini 3.6 Flash (2026) використовувався для технічної допомоги під час оформлення списку джерел відповідно до бібліографічних стандартів. Проте жоден зі згенерованих текстів не використовувався без критичного опрацювання автором. Автор несе повну відповідальність за науковість, достовірність даних, коректність бібліографічного опису, результати дослідження та сформульовані висновки.

Список використаних джерел:

1. Купчук І. М., Гонтарук Я. В., Присяжнюк Ю. С. Перспективи підвищення рівня енергетичної автономії переробних підприємств АПК України за рахунок виробництва біогазу. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 3(118). С. 59–73. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-8>
2. Зеленчук Н. В. Методичні підходи до визначення еколого-економічної ефективності виробництва біогазу на переробних підприємствах АПК України. Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». 2023. № 27. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.27.2023.297212>
3. Гелетука Г. Г., Железна Т. А., Кучерук П. П., Драгнєв С. В. Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. Теплофізика та теплоенергетика. 2023. Т. 45, № 2. С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
4. Фурман І. В. Перспективи виробництва біогазу та біоетанолу на спиртових заводах. Економіка та суспільство. 2022. Вип. 36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-36-42>
5. Фурман І. В., Ксенчин Д. О. Управління виробництвом біогазу з відходів підприємств АПК та домогосподарств. Економіка та суспільство. 2024. Вип. 59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-44>
6. Inna Honcharuk, Dina Tokarchuk, Yaroslav Gontaruk, Tetiana Kolomiets. Production and Use of Biogas and Biomethane from Waste for Climate Neutrality and Development of Green Economy. Journal of Ecological Engineering. 2024. Vol. 25, No. 2. Pp.20–32. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/175876>
7. Фурман І. В., Дмитрик О. В., Лисогор І. О. Стратегічні напрями розвитку біоенергетичного потенціалу Іллінецької територіальної громади. Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка. 2023. Вип. 15. С. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.15.16>
8. Шабала О. П., Матійчук Л. П. Біоенергетичний потенціал України: тенденції розвитку в умовах воєнного стану. Економічний простір. 2023. № 183. С. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/183-5>
9. Присяжнюк О. І., Маляренко О. А., Лаздінш А., Костина Т. П. Моніторинг стану біоенергетичних

культур з використанням супутникових знімків Sentinel-2 та БПЛА. Новітні агротехнології. 2023. Т. 11, № 3. DOI: <https://doi.org/10.47414/na.11.3.2023.288681>

10. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. Законодавство України / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80> (дата звернення: 01.06.2026).

11. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 № 761-р. Законодавство України / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80> (дата звернення: 01.06.2026).

12. Цюпа С. В. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку біоенергетики в аграрному виробництві: моніторинг ресурсного базису та обсягів виробництва біопалива. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2025. № 4. С. 354–357. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-72>

13. Кільницька О., Яремова М., Соколова А. Біоресурси у трансформації енергетичної системи України. Scientia fructuosa. 2025. Т. 163, № 5. С. 93–110. DOI: [https://doi.org/10.31617/1.2025\(163\)06](https://doi.org/10.31617/1.2025(163)06)

14. Білокінна І., Токарчук Д. Біоенергетичний потенціал енергетичних культур для виробництва різних видів біопалив для подолання дефіциту енергетичних ресурсів в АПК. Modeling the Development of the Economic Systems. 2024. № 4. С. 320–327. DOI: <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-14-42>

15. Garg A., Basu S., Shetti N. P., Bhattu M., Alodhayb A. N., Pandiaraj S. Biowaste to bioenergy nexus: Fostering sustainability and circular economy. Environmental Research. 2024. Vol. 250. Art. 118503. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118503>

16. Wagh M. S., Sowjanya S., Nath P. C., Chakraborty A., Amrit R., Mishra B., Mishra A. K., Mohanta Y. K. Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. Process Safety and Environmental Protection. 2024. Vol. 183. Pp. 708–725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055>

17. Sujanto R. Y., Martínez Herrera S. G., Negash Y. T. Enhancing environmental sustainability in a Circular Waste Bioeconomy: A hierarchical framework driven by operational efficiency and agro-energy management. Cleaner and Circular Bioeconomy. 2024. Vol. 9. Art. 100115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100115>

18. Nguyen T. Q., Luu L. Q., Martínez-Ramón N., Longo S., Cellura M., Dufour J. Sustainability and circularity assessment of biomass-based energy supply chain. Heliyon. 2024. Vol. 10, No. 19. Art. e38557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38557>

19. Semella S., Zeng T., Mühlenberg J., Camelo A., Pollex A. Online characterization of solid biofuels via pocket sized and low-cost near-infrared devices during small-scale boiler operation: Model development, evaluation and application tests. Biomass and Bioenergy. 2024. Vol. 180. Art. 106978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106978>

20. Martínez-Hernández E., Castillo-Landero A., Dominguillo-Ramírez D., Amezcua-Allieri M. A., Morse S., Murphy R., Aburto J., Sadhukhan J. Priorities and relevance of bioenergy sustainability indicators: A participatory selection framework applied to community-based forestry in Mexico. Energy Research & Social Science. 2024. Vol. 109. Art. 103425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103425>

References:

1. Kupchuk, I. M., Hontaruk, Ya. V., & Prysiazniuk, Yu. S. (2022). Perspektyvy pidvyshchennia rivnia enerhetychnoi avtonomii pererobnykh pidpriemstv APK Ukrainy za rakhunok vyrobnytstva biohazu [Prospects for increasing the level of energy autonomy of processing enterprises of Ukraine's agro-industrial complex through biogas production]. Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK, 3(118), 59–73. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-8> [in Ukrainian].

2. Zelenchuk, N. V. (2023). Metodichni pidkhody do vyznachennia ekoloho-ekonomichnoi efektyvnosti vyrobnytstva biohazu na pererobnykh pidpriemstvakh APK Ukrainy [Methodological approaches to determining the ecological and economic efficiency of biogas production at processing enterprises of Ukraine's agro-industrial complex]. Ekonomichni Visnyk NTUU «Kyivskiy Politekhnicnyi Instytut», (27). <https://doi.org/10.20535/2307-5651.27.2023.297212> [in Ukrainian].

3. Heletukha, H. H., Zheliezna, T. A., Kucheruk, P. P., & Drahniev, S. V. (2023). Analiz perspektyvnykh napriamkiv vykorystannia enerhetychnoho potentsialu biomasy Ukrainy [Analysis of promising directions for using the energy potential of biomass in Ukraine]. Teplofizyka ta Teploenerhetyka, 45(2), 77–86. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9> [in Ukrainian].

4. Furman, I. V. (2022). Perspektyvy vyrobnytstva biohazu ta bioetanolu na spyrtovykh zavodakh [Prospects for biogas and bioethanol production at distilleries]. Ekonomika ta Suspilstvo, (36). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-36-42> [in Ukrainian].

5. Furman, I. V., & Ksenchyn, D. O. (2024). Upravlinnia vyrobnytstvom biohazu z vidkhodiv pidpriemstv APK ta domohospodarstv [Management of biogas production from waste of agro-industrial enterprises and households]. Ekonomika ta Suspilstvo, (59). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-44> [in Ukrainian].

6. Honcharuk, I., Tokarchuk, D., Gontaruk, Y., & Kolomiiets, T. (2024). Production and use of biogas and

biomethane from waste for climate neutrality and development of green economy. *Journal of Ecological Engineering*, 25(2), 20–32. <https://doi.org/10.12911/22998993/175876>

7. Furman, I. V., Dmytryk, O. V., & Lysohor, I. O. (2023). Stratehichni napriamy rozvytku bioenerhetychnoho potentsialu Illinetskoj terytorialnoi hromady [Strategic directions for the development of the bioenergy potential of the Illintsi territorial community]. *Tavriyskyi Naukovyi Visnyk. Serii: Ekonomika*, (15), 134–143. <https://doi.org/10.32782/2708-0366/2023.15.16> [in Ukrainian].

8. Shabala, O. P., & Matiichuk, L. P. (2023). Bioenerhetychnyi potentsial Ukrainy: Tendentsii rozvytku v umovakh voiennoho stanu [Bioenergy potential of Ukraine: Development trends under martial law]. *Ekonomichniy Prostir*, (183), 31–36. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/183-5> [in Ukrainian].

9. Prysiazniuk, O. I., Maliarenko, O. A., Lazdinsh, A., & Kostyna, T. P. (2023). Monitorynh stanu bioenerhetychnykh kultur z vykorystanniam sputnykovykh znimkiv Sentinel-2 ta BPLA [Monitoring the condition of bioenergy crops using Sentinel-2 satellite imagery and UAVs]. *Novitni Ahrotekhnolohii*, 11(3). <https://doi.org/10.47414/na.11.3.2023.288681> [in Ukrainian].

10. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023, April 21). Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2050] (Order No. 373-r). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80>

11. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, August 13). Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku ta planu zakhodiv z yoho vykonannia [On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period until 2030 and the action plan for its implementation] (Order No. 761-r). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80>

12. Tsiupa, S. V. (2025). Analiz suchasnoho stanu ta tendentsii rozvytku bioenerhetyky v ahrarynomu vyrobnytstvi: Monitorynh resursnoho bazysu ta obsiahiv vyrobnytstva biopalyva [Analysis of the current state and development trends of bioenergy in agricultural production: Monitoring the resource base and biofuel production volumes]. *Ukrainskyi Zhurnal Prykladnoi Ekonomiky ta Tekhnyky*, (4), 354–357. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-72> [in Ukrainian].

13. Kilnitska, O., Yareмова, M., & Sokolova, A. (2025). Bioresursy u transformatsii enerhetychnoi systemy Ukrainy [Bioresources in the transformation of Ukraine's energy system]. *Scientia fructuosa*, 163(5), 93–110. [https://doi.org/10.31617/1.2025\(163\)06](https://doi.org/10.31617/1.2025(163)06) [in Ukrainian].

14. Bilokinna, I., & Tokarchuk, D. (2024). Bioenerhetychnyi potentsial enerhetychnykh kultur dlia vyrobnytstva riznykh vydiv biopalyv dlia podolannia defitsytu enerhetychnykh resursiv v APK [Bioenergy potential of energy crops for producing various types of biofuels to overcome the shortage of energy resources in the agro-industrial complex]. *Modeling the Development of the Economic Systems*, (4), 320–327. <https://doi.org/10.31891/mdes/2024-14-42> [in Ukrainian].

15. Garg, A., Basu, S., Shetti, N. P., Bhattu, M., Alodhayb, A. N., & Pandiaraj, S. (2024). Biowaste to bioenergy nexus: Fostering sustainability and circular economy. *Environmental Research*, 250, 118503. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118503>

16. Wagh, M. S., Sowjanya, S., Nath, P. C., Chakraborty, A., Amrit, R., Mishra, B., Mishra, A. K., & Mohanta, Y. K. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 708–725. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055>

17. Sujanto, R. Y., Martínez Herrera, S. G., & Negash, Y. T. (2024). Enhancing environmental sustainability in a circular waste bioeconomy: A hierarchical framework driven by operational efficiency and agro-energy management. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100115>

18. Nguyen, T. Q., Luu, L. Q., Martínez-Ramón, N., Longo, S., Cellura, M., & Dufour, J. (2024). Sustainability and circularity assessment of biomass-based energy supply chain. *Heliyon*, 10(19), e38557. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38557>

19. Semella, S., Zeng, T., Mühlenberg, J., Camelo, A., & Pollex, A. (2024). Online characterization of solid biofuels via pocket sized and low-cost near-infrared devices during small-scale boiler operation: Model development, evaluation and application tests. *Biomass and Bioenergy*, 180, 106978. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106978>

20. Martínez-Hernández, E., Castillo-Landero, A., Dominguillo-Ramírez, D., Amezcua-Allieri, M. A., Morse, S., Murphy, R., Aburto, J., & Sadhukhan, J. (2024). Priorities and relevance of bioenergy sustainability indicators: A participatory selection framework applied to community-based forestry in Mexico. *Energy Research & Social Science*, 109, 103425. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103425>

Дата надходження статті: 14.08.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.