

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

*С. А. Шворов, доктор технічних наук
Д. С. Комарчук, кандидат технічних наук
П. Г. Охріменко, аспірант*
П. В. Іванов, студент
e-mail: nni.elektrik@gmail.com*

Анотація. Розглянуто модель системи керування електротехнічним комплексом біогазової установки та методи підвищення ефективності метаноутворення при анаеробному зброджуванні біомаси. Проведено дослідження з дозування органічної сировини та її попередньої обробки.

Ключові слова: *інтенсифікація, біогаз, метантенк, біомаса, анаеробне бродіння*

Однією з найважливіших соціальних задач всепланетного масштабу є збереження й поліпшення навколишнього середовища та забезпечення сталого розвитку. Водночас, особливо актуальним на сьогодні є питання енергетичного суверенітету України. Одним із перспективних шляхів вирішення проблеми виходу з енергетичної кризи є залучення до паливно-енергетичного балансу України відновлюваних джерел енергії, зокрема біотрансформації відходів у біогаз [1–4].

Мета досліджень – розробка моделі системи керування електротехнічним комплексом біогазової установки та обґрунтування параметрів інтенсифікації анаеробного бродіння в мінібіореакторах.

Матеріали та методика досліджень. Найбільшими запасами біомаси в Україні є солома, гній, вторинні відходи та деревина. На рис. 1 наведено гістограму енергетичного потенціалу запасів біомаси в Україні. Під теоретичним енергетичним потенціалом розуміється кількість біомаси, яка утворюється на території України, а під технічним потенціалом – біомаса, яку можна використати, враховуючи технічні можливості та економічну доцільність. З рис. 1 видно, що найбільший енергетичний потенціал мають енергетичні рослини, що вирощуються задля отримання енергії. Також, незважаючи на порівняно низькі значення потенціалу відходів сільського господарства, необхідність їх утилізації робить використання даного виду біомаси доцільним.

*Науковий керівник – доктор технічних наук, професор С. А. Шворов

© С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, П. Г. Охріменко, П. В. Іванов, 2016

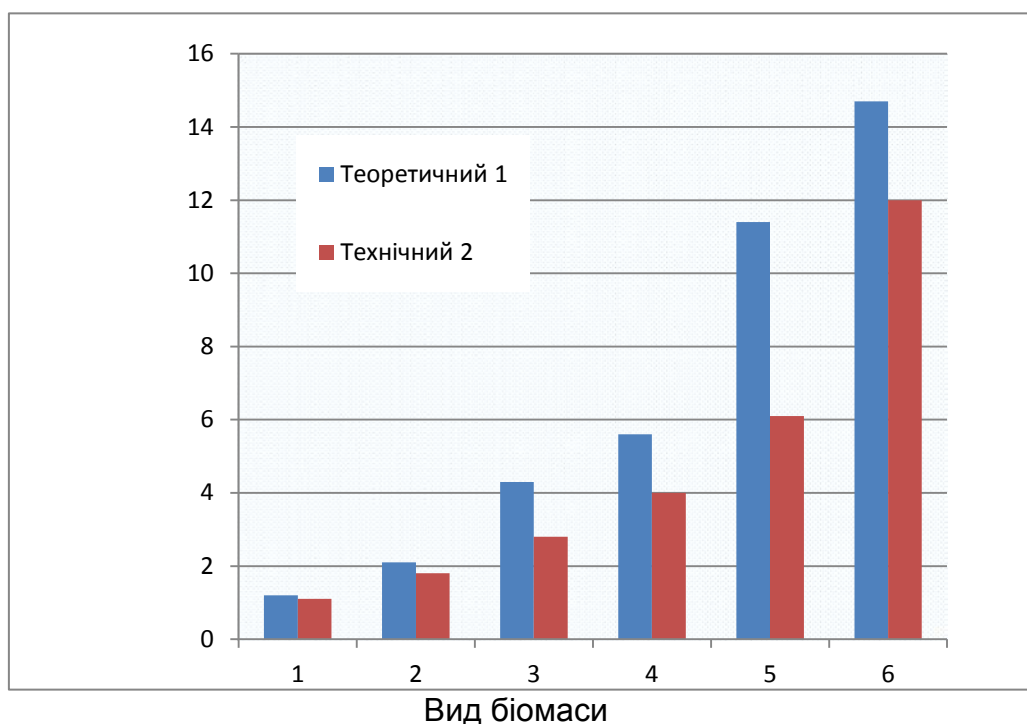


Рис. 1. Потенціальні запаси біомаси в Україні:

1 – первинні відходи сільського господарства; 2 – деревна біомаса; 3 – відходи у виробництв соняшників; 4 – вторинні відходи сільського господарства; 5 – солома; 6 – енергетичні рослини

Перевагами анаеробного методу утилізації відходів є низька енерговитратність, висока продуктивність, одержання метану як енергоносія, утворення незначної кількості зброженого осаду, що може бути використаний в якості добрива, невеликі площі для споруд. Недоліками сучасних технологій біоенергетичної утилізації відходів у метантенках є: неефективний процес біотрансформації відходів у біогаз, недостатньо високий рівень метану в біогазі, значна тривалість бродіння, зниження виходу біогазу при лімітуванні біогенних елементів у субстраті.

У перспективних багатомодульних біогазових установках (БГУ) інтенсифікація процесів зброджування буде здійснюватися оптимальним дозуванням та деструкційною (кавітаційною) обробкою різних видів сировини, оптимальним підігріванням і перемішуванням завантаженого субстрату (рис. 2).

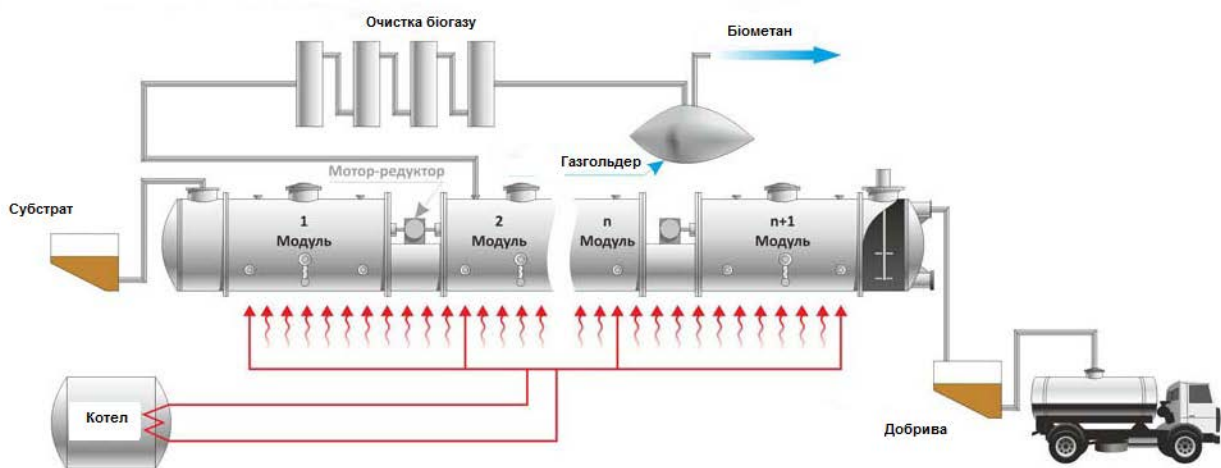


Рис. 2. Багатомодульна БГУ

Перемішування осаду в резервуарах мініметантенків із оптимальною інтенсивністю забезпечує ефективне використання всього об'єму резервуару, виключає утворення «мертвих» зон, розшарування осаду, відкладання мінералізованого осаду та утворення кірки, а також сприяє вирівнюванню температурного поля та поліпшенню газоутворення.

Термофільне бродіння відходів також сприяє інтенсифікації технологічного процесу. При цьому збільшується завантаження метантенка, а, відповідно, й вихід кінцевого продукту (до 2-х разів).

Інтенсифікація біоенергетичної утилізації приводить не лише до збільшення виходу біогазу, але й до значного зменшення площі, що займають ці споруди. Такі процеси потребують продуктивного управління складними системами метанового бродіння та побудови спеціальної системи керування (СК) електротехнічним комплексом (ЕТК) БГУ.

Результати досліджень. У загальному випадку постановка задачі побудови моделі СК зводиться до наступного: необхідно знайти з множини можливих варіантів такий варіант побудови СК, за якого забезпечується отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив при заданій вартості вхідної біомаси та ензимів (C). При цьому передбачається, що керування БГУ являє собою керований N -етапний динамічний процес, який на кожному (n -му) етапі характеризується двома видами параметрів: параметрами керування (ПК) – D_n (об'ємом завантаження кожного виду ензимів та біомаси, ступенем їх кавітації, температурою субстрату в кожному модулі та ін.) і параметрами стану W_n (об'ємом отриманого біогазу та добрив на n -му етапі функціонування БГУ) [4-7]. Як обмеження виступає вартість вхідного субстрату (C). Кінцевою метою керування БГУ – $W_N(D)$ є отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив.

Тоді цільова функція розв'язання задачі адаптивного керування електротехнічним комплексом БГУ може бути подана у вигляді

$$W_N(D) = \max, \quad (1)$$

$$\text{при } C_N \leq C, \quad (2)$$

де C_N – витрати сировини та ензимів протягом всіх етапів функціонування БГУ.

Під час роботи електротехнічного комплексу процес функціонування БГУ може бути розбитий на N часових інтервалів (етапів, кроків), на кожному з яких використовується свій набір параметрів керування (D_n).

Застосування на кожному етапі визначеного набору ПК є керованим впливом на ЕТК як на об'єкт керування, що змінює його параметри стану, тобто показники якості роботи ЕТК $\{U_j\}$. Керування в такому ЕТК має дискретний характер, задається в момент часу $\partial = \frac{(n-1)T}{N}$, $n = \overline{1, N}$ і залишається незмінним у межах кожного етапу (кроку), якщо робота ЕТК проходить згідно з оптимальним планом. Максимальна кількість інтервалів (N) керування ЕТК залежить від мінімального інтервалу управляючих впливів на ЕТК ($\min \Delta t D_{j \min}$) і визначається за формулою

$$N = \frac{T}{\min \Delta t D_{j \min}}. \quad (3)$$

За такого підходу опис усього керованого багатокрокового процесу функціонування ЕТК БГУ може бути поданий у вигляді:

$$\begin{aligned} U(n+1) &= Q(U(n), D(n), n), \\ n &= 0, 1, \dots, N-1; \quad u(0) = u^0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $U(n) = (U_1(n), \dots, U_i(n), \dots, U_r(n))$ – значення показників якості роботи ЕТК, що характеризують об'єм виходу біометану та органічних добрив на момент часу n ;

r – число показників, необхідних для оцінки якості роботи ЕТК;

$D(n) = D_1(n), \dots, D_j(n)$ – послідовність управляючих впливів (ПК) на n -му інтервалі роботи БГУ;

$Q(u, D, n)$ – вектор-функція, тобто $Q = (Q_1, \dots, Q_n)$;

$u(0)$ – значення показників якості ЕТК на початку роботи БГУ.

З урахуванням дискретного опису процесу керування цільова функція (1) може бути подана сумою

$$W_N(D) = \frac{1}{T} \int_0^{T/N} F_1[u_0(t), D_1(t)] dt + \frac{1}{T} \int_{T/N}^{2T/N} F_2[u_1(t), D_2(t)] dt + \dots + \frac{1}{T} \int_{\frac{T(N-1)}{N}}^T F_N[u_{N-1}(t), D_N(t)] dt = \max$$

або

$$W_N(D) = \sum_{n=1}^N G_n[D_n] = \frac{1}{KN} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K F_k[u(n-1), D(n)] = \max, \quad (5)$$

де $G_n[D_n]$ – значення цільової функції на n -ому етапі;

$$F_k = \begin{cases} 1, & \text{при } u_{ik} \in U_T, \\ 0, & \text{при } u_{ik} \notin U_T, \end{cases}$$

u_{ik} – значення i -го показника якості роботи ЕТК на момент часу k ;
 $k = 1, \dots, K$; $K = \frac{n}{h}$;

h – інтервал дискретизації n -го етапу процесу функціонування БГУ;
 U_T – множина нормативних (оптимальних) значень показників якості роботи ЕТК БГУ.

Задача максимізації функціоналу (5) при обмеженні (2) є загальною задачею оптимального керування об'єктом з дискретним часом.

Вибір методу розв'язання задачі оптимізації пов'язаний, насамперед, із особливостями процесу функціонування ЕТК. До таких особливостей, як показує аналіз, належать: процес, який представляє собою функціонування дискретної динамічної керованої системи; змінні U_n і D_n у функціоналі (5) є багатомірними; самі рівняння (4) є векторними; вид функції, що оптимізується – невідомий.

Таким чином, розв'язання даної задачі можна представити як задачу пошуку оптимального режиму функціонування ЕТК БГУ в динамічних дискретних керованих системах.

Специфіка цієї задачі, порівняно із загальною задачею нелінійного програмування, полягає в тому, що існує дві групи невідомих змінних: $U(n)$, $n = 0, 1, \dots, N$, і $D(n)$, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Якщо ввести нові змінні $h = (U(0), \dots, U(N), D(0), \dots, D(N-1))$, то в цих змінних задача перетворюється в загальну задачу нелінійного програмування. У тому випадку, коли $G_n(D_n)$ – опуклі (або увігнуті) функції, її розв'язання можна знайти, наприклад, методом невизначених множників Лагранжа. Якщо ж функції $G_n(D_n)$ не є такими, то відомі методи знаходження розв'язання задач нелінійного програмування не дають змоги визначити глобальний максимум функції (5). Тоді розв'язання задачі (5) можна знайти за допомогою методу динамічного програмування, основною перевагою якого є те, що він не залежить від виду функції

$G_n(D_n)$ і добре пристосований до розв'язання багатоетапних або багатокрокових задач [5].

Для дослідження роботи системи керування ЕТК розроблено функціональну схему лабораторної установки багатомодульної БГУ. В ній передбачено завантаження різних видів ензимів та сировини (після її кавітації), підтримка постійної температури, наявність ємностей для накопичення газу, який виділяється (рис. 3).

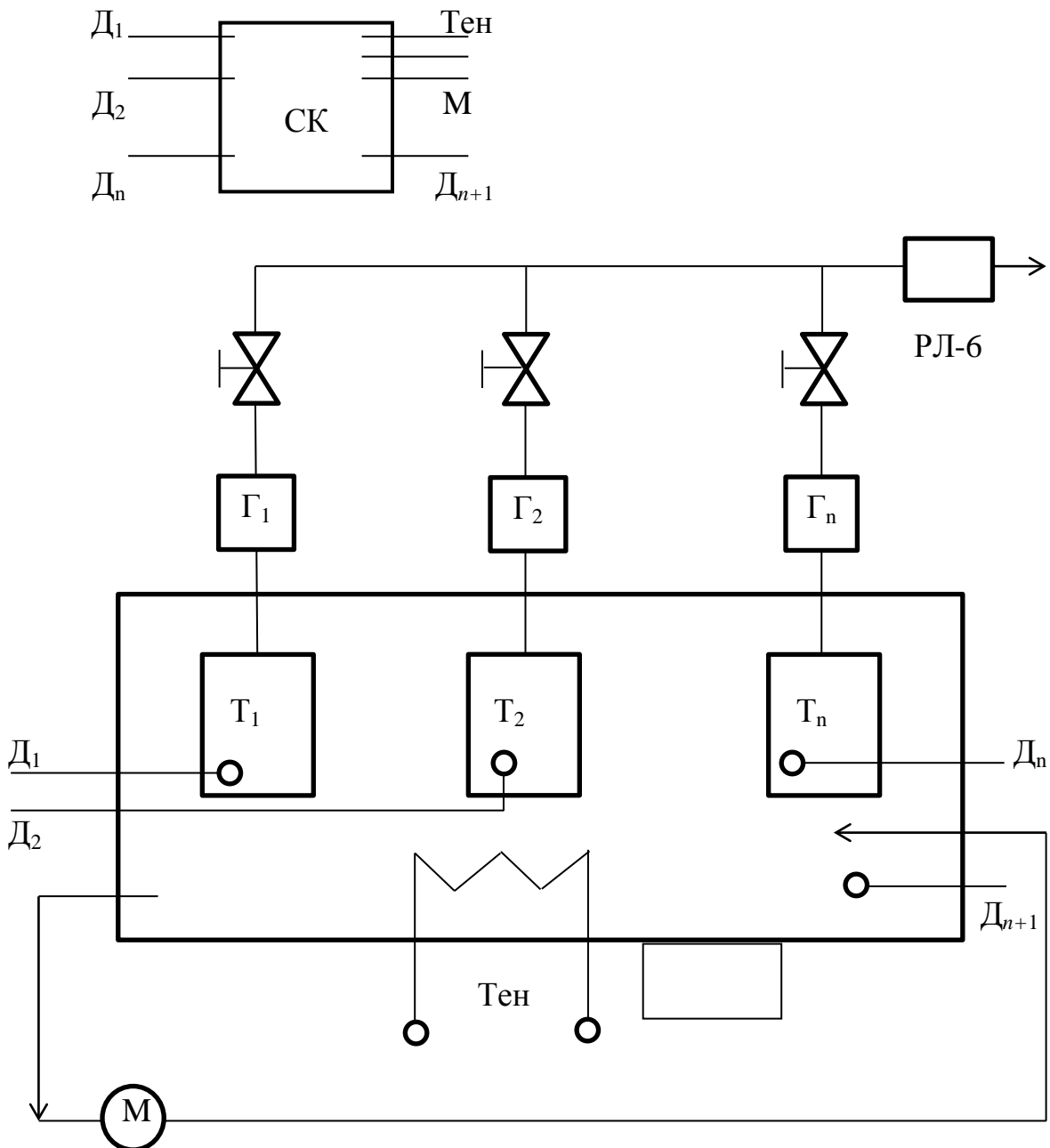


Рис. 3. Функціональна схема дослідження виходу біогазу із субстратів та ензимів різного складу:

$T_1 \dots T_n$ – метантенки; $D_1 \dots D_{n+1}$ – датчики температури (DS18B20); $\Gamma_1 \dots \Gamma_n$ – газгольдери; М – циркуляційний насос нагрівної рідини; РЛ-6 – газовий лічильник; СК – система керування

Дослідження проведені на лабораторній біогазовій установці, яка складається з трьох метантенків об'ємом по 15 дм³. У кожному метантенку розміщений датчик температури субстрату. Динаміка та вихід продукції реєструвалися газовим лічильником РЛ-6. Температурний режим – термофільний (45 °С), підтримувався за допомогою системи автоматичного керування на основі 1-wire шини передачі даних в персональний комп'ютер.

Як керуючий елемент використовувався електронний ключ DS2406 (рис. 4).



Рис. 4. Лабораторна модульна біогазова установка

Як показують результати експериментальних досліджень з точки зору виробництва біогазу, на найбільшу увагу заслуговує оптимальне поєднання рослинної сировини з відходами фермерських господарств. З огляду на це, було проведено дослідження щодо виробництва біогазу шляхом використання певної суміші (в табл. 1).

Експериментально встановлено, що процес зброджування біомаси ефективніше проходив у метантенках БГУ, де сировина складалася із 70% зеленої маси кукурудзи та 30% гною свиней і ВРХ, відповідно. Їх продуктивність була вищою, порівняно з 50% зеленої маси кукурудзи та 50% гною свиней, а також 50% зеленої маси кукурудзи та 50% гною ВРХ.

Основний принцип методики визначення впливу деструкції субстрату на процес метанового бродіння полягав у визначенні динаміки утворення біогазу. Критерієм оцінки процесу є зміна кількості утвореного біогазу порівняно зі стабільним незмінним контролем ПК [6]. В експериментальних дослідженнях анаеробного процесу бродіння обробка сировини відбувалася за такими методами:

- застосування механічного деструктора;
- використання термолізу;
- обробка ультразвуком.

1. Схема дослідю

Тривалість дослідю (дні)	Співвідношення сировини	Маса сировини при завантажуванні, кг	
		Зелена маса кукурудзи	Гній
6	Зелена маса кукурудзи (70%)+ гній свиней (30%)	0,42	0,18
6	Зелена маса кукурудзи (70%)+ гній ВРХ (30%)	0,42	0,18
6	Зелена маса кукурудзи (50%)+ гній свиней (50%)	0,3	0,3
6	Зелена маса кукурудзи (50%)+ гній ВРХ (50%)	0,3	0,3

При механічній деструкції біомасу обробляли у центрифугі, після чого подавали в реактор. Центрифугування біомаси тривало впродовж 1 хв після набирання нею максимальної кількості обертів. Термоліз субстрату проводили за температурою +90 °С. Нагрівання зброженого субстрату до 90 °С тривало 10 хв, після чого впродовж 1 хв біомасу підтримували за сталої температури. Результати досліджень наведено в табл. 2. При ультразвуковій обробці використовувався ультразвуковий кавітатор потужністю 8 Вт/см². Обробка проводилася протягом 5 хвилин.

2. Інтенсивність виділення біогазу під час попередньої обробки сировини

Час (доба)	Вихід біогазу залежно від способу деструкції, дм ³			
	Без деструкції	Термічний	Механічний	Ультразвук
1	0,43	0,45	0,73	0,55
2	0,48	0,65	1,42	0,64
3	0,53	0,58	1,4	0,68
4	0,34	0,33	1,13	0,45
5	0,32	0,31	0,78	0,4
6	0,3	0,21	0,57	0,38
Σ	2,4	2,53	6,03	3,1

На основі даних таблиці побудовано діаграму, зображену на рис. 5. Під час експериментів було виявлено, що найбільше виділення біогазу відбувалося на 2-гу та 3-тю добу експерименту. Максимальну кількість біогазу було отримано при використанні механічної та ультразвукової обробки субстрату.

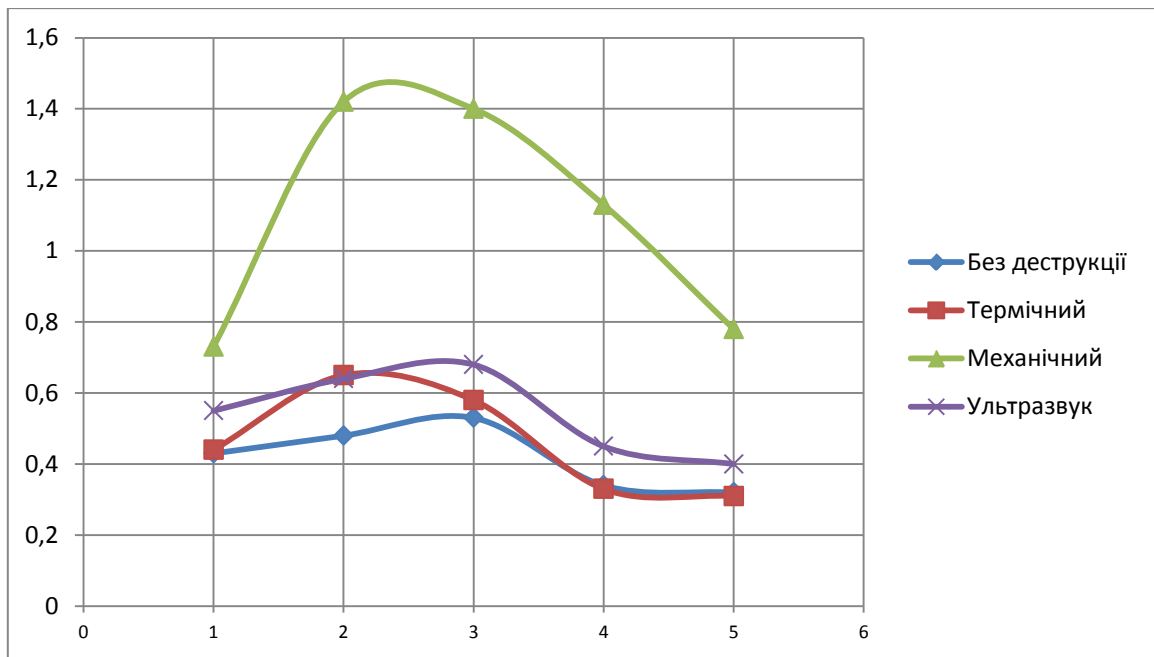


Рис. 5. Інтенсивність виділення біогазу залежно від способів попередньої обробки сировини

Висновки

Розроблено модель системи керування електротехнічним комплексом БГУ та встановлено залежності значення утворення біогазу в анаеробних умовах при застосуванні різних видів сировини та деструктивних методів, що дає змогу прогнозувати вихід біогазу від періоду збродження. Використання рослинної сировини і гною в різних співвідношеннях може бути ефективним чинником збільшення виходу біогазу та зростання корисної дії біогазоенергетичних установок. Найбільшою ефективністю під час виробництва біогазу відзначається сировина, що складається із 70% зеленої маси кукурудзи та 30% гною свиней і великої рогатої худоби, відповідно.

Як показують результати теоретичних та експериментальних досліджень, підвищення ефективності метанового бродіння біомаси забезпечується при застосуванні системи керування електротехнічним комплексом БГУ на основі оптимізації таких параметрів: об'ємів завантаження кожного виду біомаси, ступенем їх деструкції (кавітації), температури, вологості, рН та якості перемішування субстрату в кожному модулі БГУ. Серед методів підвищення ефективності метаноутворення перспективними є механічна та ультразвукова обробка біомаси.

Список літератури

1. Оценка энергетического потенциала биомассы в Украине. Ч. 2. Энергетические культуры, жидкие биотоплива, биогаз / Гелетуха Г. Г., Железная Т. А., Жовмир Н. М., Матвеев Ю. Б. [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 1. – С. 57–64.

2. Павліський В. М. Техніко-економічне обґрунтування вибору технологій та сільськогосподарських культур для виробництва біотоплив [Електронний

ресурс] / В. М. Павліський, Ю. П. Нагірний, О. В. Павліська. – Режим доступу : <http://elibrary.nubip.edu.ua/5684/1/10nup.pdf>

3. Ратушняк Г. С. Интенсификация биоконверсии коливальным перемешиванием субстрату : монографія / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – С. 17.

4. Рябов Г. А. Использование биомассы и отходов производства для решения проблем энергосбережения / Г. А. Рябов // Электрические станции. – 2005. – № 7. – С. 33–38.

5. Шворов С. А. Система керування процесом завантаження біомаси та спеціальних домішок в біореактор для отримання максимальних об'ємів біогазу та органічних добрив / С. А. Шворов, П. Г. Охріменко, Д. В. Чирченко // Енергетика і автоматика. – 2014. – № 3. – С. 155–161.

6. Шишкин Н. Д. Анализ эффективности биоэнергетических установок / Н. Д. Шишкин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – № 4. – С. 31–32.

7. Энзимы для биогаза [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.zorg-biogas.com>

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

С. А. Шворов, Д. С. Комарчук, П. Г. Охрименко, П. В. Иванов

Аннотация. *Рассмотрена модель системы управления электротехническим комплексом биогазовой установки и методы повышения эффективности метанообразования при анаэробном сбраживании биомассы. Проведено исследование по дозировке органического сырья и его предварительной обработки.*

Ключевые слова: *интенсификация, биогаз, метантенк, биомасса, анаэробное брожение*

ELECTRIC MODEL OF MANAGEMENT AND HARDWARE BIOGAS PLANT

S. Shvorov, D. Komarchuk, P. Okhrimenko, P. Ivanov

Annotation. *The model of complex electrical control systems and methods to improve the efficiency of methane during anaerobic fermentation of biomass. A study on dosage organic material and its pretreatment.*

Key words: *intensification, biogas digesters, biomass, anaerobic fermentation*