

*В роботі запропонована технологія функціонування біогазової установки, що дозволяє встановлювати температуру теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, при вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника. Використання інтегрованої системи оцінки зміни температури зброджування, здобутої на основі математичного та логічного моделювання у складі когенераційної системи, забезпечує постійний вихід біогазу, своєчасне відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу. Оцінена ефективність розробленої технології*

*Ключові слова: технологія, біогазова установка, температура зброджування, математичне та логічне моделювання, когенераційна система*

*В работе предложена технология функционирования биогазовой установки, которая позволяет устанавливать температуру греющего теплоносителя на входе в теплообменник, встроенный в метантенк, при измерении температуры греющего теплоносителя на выходе из теплообменника. Использование интегрированной системы оценки изменения температуры сбраживания, полученной на основе математического и логического моделирования в составе когенерационной системы обеспечивает постоянный выход биогаза, своевременную выгрузку сброженного суслу и загрузку свежего материала. Оценена эффективность разработанной технологии*

*Ключевые слова: технология, биогазовая установка, температура сбраживания, математическое и логическое моделирование, когенерационная система*

УДК 621. 31

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44252

## РОЗРОБКА ЕНЕРГО-ЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Є. Є. Чайковська

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник, доцент  
Кафедра теоретичної,  
загальної та нетрадиційної енергетики  
Одеський національний  
політехнічний університет  
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044  
E-mail: eechaikovskaya@gmail.com

### 1. Вступ

В умовах енергозбереження когенераційні технології, що виробляють як електричну енергію, так і теплоту від одного джерела енергії мають додатковий імпульс для розвитку щодо використання біогазу як альтернативного джерела енергії [1–4]. Але функціонування біогазових установок супроводжується непостійним виходом біогазу із-за складності визначення точного терміну зміни потоків свіжої та збродженої сировини. В умовах недостовірного використання оцінки зміни температури зброджування при вимірюванні, що обумовлено значною тепловою акумулюючою ємністю суслу, витрати на підтримку процесу зброджування складають до 20–30 % виробленої енергії. Більш того, цілодобове функціонування біогазових установок при непостійному виходу біогазу та відключення когенераційних систем в години найменшого споживання потребує додаткового обладнання для зберігання біогазу та збродженого матеріалу. Цим обґрунтовується актуальність даної роботи.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Статичні методи удосконалення когенераційних технологій, що мають у своєму складі основні скла-

дові: первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління дозволяють, наприклад, на основі економічного аналізу встановити доцільність доповнення теплової схеми за рахунок підігріву повітря після компресора, але без можливості оцінки її ефективності в реальних умовах функціонування когенераційної системи [5]. Не збіг виробництва та споживання електричної енергії та теплоти також не врахований, наприклад, в роботі [6] щодо запропонованої електронної системи подачі біогазу з ціллю зменшення шкідливих викидів. В роботі [7] встановлено зв'язок виробництва біогазу зі змішуванням різних сировинних матеріалів, але без узгодження із споживанням. Інтенсифікація теплообміну в метантенках розглянута, наприклад, в роботах [8, 9] щодо удосконалення конструктивних параметрів біогазової установки та оцінки зміни температури зброджування за часом, без урахування її зміни в об'ємі біореактора, що ускладнює підтримку функціонування метантенка при зміні якості сировини, її температури, т. ін. в узгодженні із споживанням. А в роботі [10] представлено методику визначення теплообміну зовнішньої поверхні метантенка з навколишнім середовищем щодо визначення витрати теплоносія, що гріє та оцінки кількості здобутого біогазу також без узгодження із споживанням.

Запропоновані засоби підтримки функціонування біогазових установок не враховують значну теплову акумулюючу ємність суслу та базуються на вимірюванні температури зброджування щодо зміни витрати суслу для підтримки процесу зброджування, що може порушити обов'язковий баланс потоків свіжої та збродженої сировини для здобуття постійного виходу біогазу. Використання ж зміни витрати теплоносія, що гріє, може негативно вплинути на активність процесу зброджування. У зв'язку із залежністю температури свіжого суслу, що завантажують, від температури навколишнього середовища запропоновані засоби не дають також відповідь на встановлення точного терміну відвантаження збродженого суслу та завантаження еквівалентної витрати свіжого матеріалу, що виконують через 4–6 годин на добу. Тому підтримка функціонування біогазової установки повинна відбутись на основі інтегрованої аналітичної оцінки зміни температури зброджування на рівні прийняття рішень для підтримки головних складових процесу здобуття біогазу: виходу біогазу, відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу [11]. Для своєчасного прийняття рішень необхідно з цією ціллю прогнозувати зміну температури зброджування, вимірюючи температуру теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, зміна якої відбувається раніше, ніж зміна температури зброджування та встановлювати температуру теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник [12–14].

### 3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробити енергозберігаючу технологію функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи.

Поставлена мета може бути досягнена при виконанні таких задач:

- обґрунтувати необхідність розробки інтегрованої аналітичної оцінки зміни температури зброджування на рівні прийняття рішень для підтримки функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи;

- розробити структурну схему комплексного математичного моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк, щодо здобуття еталонної оцінки зміни температури зброджування;

- розробити структурну схему логічного моделювання контролю працездатності біогазової установки для здобуття підсумкової функціональної оцінки зміни температури зброджування;

- розробити структурну схему логічного моделювання прийняття рішень на підтримку функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи;

- розробити структурну схему логічного моделювання ідентифікації стану біогазової установки для підтвердження прийнятих рішень;

- запропонувати інтегровану систему оцінки зміни температури зброджування щодо енергозберігаючої технології функціонування біогазової установки;

- оцінити практичну значущість здобутих результатів.

### 4. Енергозберігаюча технологія функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи

Основою для розробки енергозберігаючої технології функціонування біогазової установки є здобуття як еталонної, так і функціональної інформації щодо прийняття рішень на підтримку процесу зброджування. Розроблена математична модель динаміки біогазової установки для аналітичної оцінки зміни температури зброджування при зміні температури теплоносія, що гріє у зв'язку із недостовірним використанням вимірювання температури зброджування, що обумовлено значною тепловою акумулюючою ємністю суслу. Система нелінійних диференціальних рівнянь включає рівняння стану щодо оцінки фізичної моделі біогазової установки, рівняння енергії теплоносія, що гріє, для підтримки процесу зброджування, рівняння енергії суслу, що зброджується та рівняння теплового балансу для стінки теплообмінника, вбудованого в метантенк. Відмінною рисою математичної моделі є рівняння енергії сприймаючого середовища – суслу, що описує зміну температури зброджування як у часі, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника, що співпадає з напрямком потоку руху середовища. В результаті реалізації математичної моделі динаміки біогазової установки отримана передатна функція за каналом: «температура зброджування – температура теплоносія, що гріє» та виконана математична обробка передатної функції щодо можливості переходу з області частоти до реального часу функціонування біогазової установки [12–14].

У зв'язку зі зміною температури суслу, що завантажують, від зміни температури оточуючого середовища та неможливістю змінювати витрату суслу впродовж процесу зброджування, щоб не порушити баланс потоків збродженого та свіжого матеріалу, необхідно встановити такі рівні функціонування біогазової установки щодо зміни температури теплоносія, що гріє, на вході та на виході із теплообмінника, при яких би цей баланс потоків зберігався. Так, з цією ціллю запропоновано структурну схему (рис. 1) комплексного математичного моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк. Використано, наприклад, вихідні дані конструктивно-режимної реалізації метантенка, що виробляє 352,5 м<sup>3</sup>/добу біогазу. В межах запропонованої циклічної структури при зберіганні постійними витрати потоків сировини та теплоносія, що гріє, встановлено наступні рівні функціонування біогазової установки щодо зміни температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника: перший рівень: 55 °С–44,15 °С; другий рівень: 52,1 °С–43,06 °С; третій рівень: 49,9 °С–42,3 °С; четвертий рівень: 47,5 °С–41,35 °С; п'ятий рівень: 45 °С–40,3 °С, що відповідають зміні температури суслу на вході в біогазову установку: 5 °С, 10 °С, 14 °С, 18 °С, 22 °С в залежності від температури оточуючого середовища, відповідно (рис. 1). Запропонована структурна схема дозволяє, здобувши постійні часу та коефіцієнти математичної моделі динаміки температури зброджування, визначити гранично припустиму зміну температури зброджування для встановлених рівнів функціонування [12–14].

Для розробки енергозберігаючої технології функціонування біогазової установки на основі метода графа причинно-наслідкових зв'язків [11] представлено логічну модель контролю працездатності біогазової установки, що надає можливість отримати від блоку контролю СТ<sub>c</sub> (рис. 2) підсумкову інформацію: (1–4).

При безперервному вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, що порівнюється з еталонним значенням рівня функціонування, з використанням логічної структури в межах циклу запропоновано підтримувати розряд чи заряд біогазової установки, що супроводжується виходом біогазу, на основі здобутої інформаційної оцінки (1), (2), відповідно. Здобуття ж підсумкової інформації (3) при досягненні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника гранично низького рівня – 37,04 °С, потребує прийняття рішення на відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу щодо встановлення температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник, на гранично верхньому рівні – 55 °С [12–14].

Підтвердження правильності прийнятих рішень виконано на основі запропонованої структурної схеми ідентифікації стану біогазової установки у складі когенераційної системи (рис. 4), що розроблена на основі графа причинно-наслідкових зв'язків [11].

На основі запропонованих структурних схем (рис. 1–4), що апробовані для підтримки функціону-

вання біогазової установки для фіксованого інтервалу часу [12–14], розроблено інтегровану систему підтримки функціонування біогазової установки (табл. 1, рис. 5), що надає можливість на основі аналітичної оцінки зміни температури зброджування приймати рішення на зміну температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, при безперервному вимірюванні температури теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника. Запропонована система дозволяє виконувати заряд когенераційної системи впродовж терміну розряду та заряду біогазової установки щодо виходу біогазу та встановлювати точний термін відвантаження збродженого матеріалу та завантаження свіжого суслу щодо забезпечення підтримки розряду когенераційної установки.

Так, наприклад, через 2600 с після завантаження свіжого матеріалу температура теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, зменшилась до 43,6 °С, то для підтримки виходу біогазу необхідно встановити температуру теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник 52,1 °С. А якщо ж температура теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника зменшилась до 37,04 °С, то у зв'язку із неможливістю підтримувати температуру зброджування від 34 °С до 36 °С необхідно виконати відвантаження збродженого суслу та завантажити свіжий матеріал, встановивши температуру теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник 55 °С.

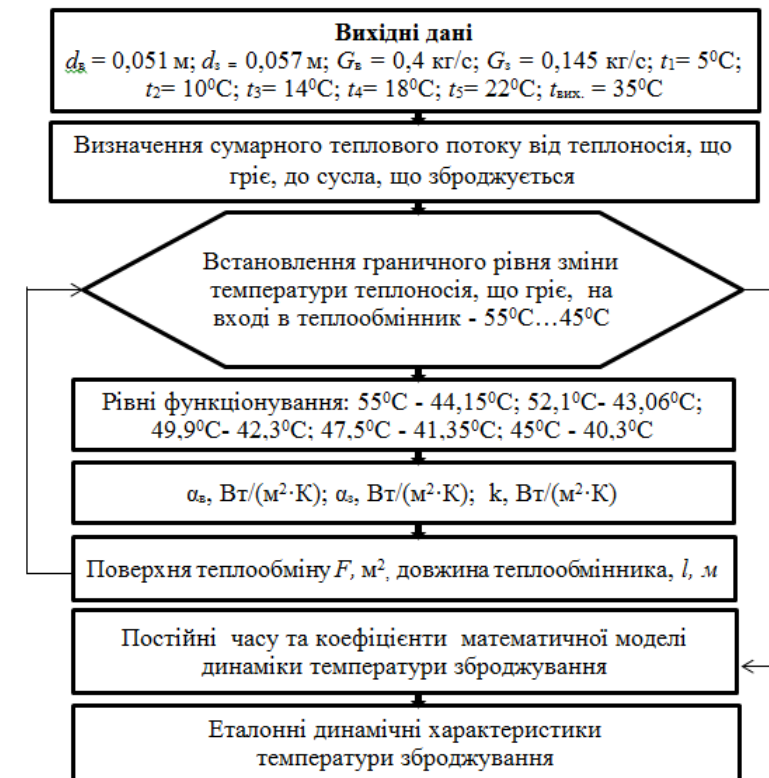


Рис. 1. Структурна схема комплексного математичного моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк:  $d_b, d_z$  – діаметр теплообмінника, внутрішній, зовнішній, м, відповідно;  $G_b, G_z$  – витрата теплоносія, що гріє, суслу, кг/с, відповідно;  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  – температура суслу на вході в біогазову установку в залежності від температури оточуючого середовища, К, відповідно;  $t_{вих.}$  – температура суслу на виході із біогазової установки, К;  $\alpha_b$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія, що гріє, до стінки теплообмінника, вбудованого в метантенк, Вт/(м²·К);  $\alpha_z$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки теплообмінника, вбудованого в метантенк, до суслу, Вт/(м²·К);  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К)

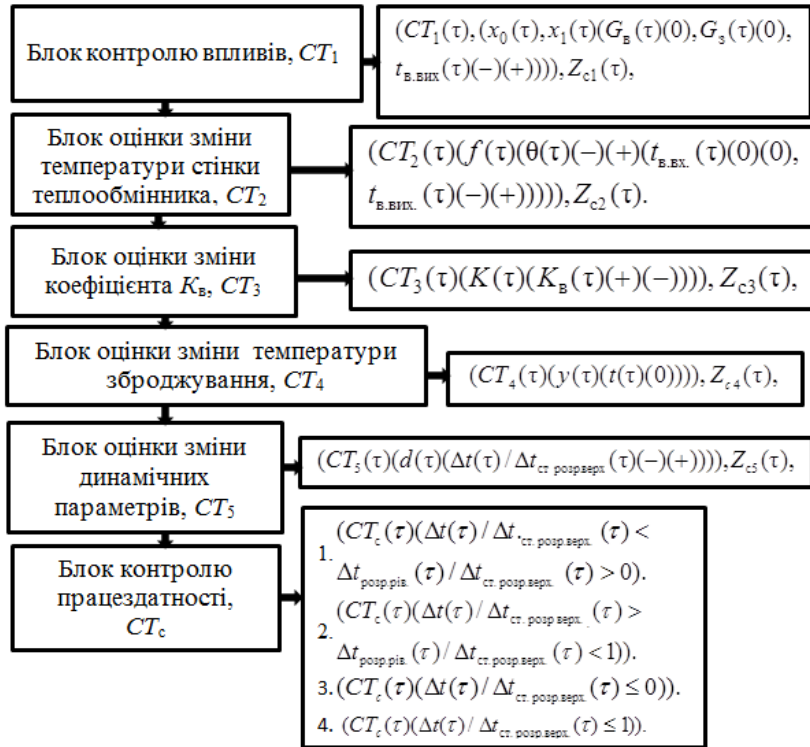


Рис. 2. Структурна схема логічного моделювання контролю працездатності біогазової установки: СТ – контроль події; Z – логічні відносини; d – динамічні параметри; t – температура зброджування, K; t<sub>в</sub> – температура теплоносія, що гріє, K; x – впливи; f – параметри, що діагностуються; y – вихідні параметри; K – коефіцієнти математичного опису;

$$K_v = \frac{m(\theta_0 - t_{v,вих0})}{G_{в0}}$$

– коефіцієнт математичної моделі динаміки біогазової установки, де  $\theta$  – температура стінки теплообмінника, K, відповідно; G – витрата теплоносія, що гріє, кг/с; Індокси: с – контроль працездатності; вх., вих. – вхід і вихід теплоносія, що гріє; верх. – верхній рівень функціонування; в – теплоносій, що гріє; з – сусло; розр., ст. – розрахункове, стале значення параметра; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішні, внутрішні параметри; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри

Таблиця 1  
Інтегрована система підтримки функціонування біогазової установки

Зміна температури зброджування	Час, τ, 100 с				
	13	26	39	52	65
Завантаження; t <sub>з,вх</sub> =55 °С	1	–	–	–	–
Розряд-заряд; t <sub>з,вих</sub> =43,6 °С	–	0,8874	–	–	–
Прийняття рішення; t <sub>з,вх</sub> =52,1 °С	–	–	0,8866	–	–
Розряд-заряд; t <sub>з,вих</sub> =42,6 °С	–	–	–	0,8130	–
Прийняття рішення; t <sub>з,вх</sub> =49,9 °С	–	–	–	–	0,8119
Зміна температури зброджування	Час, τ, 100с				
	78	91	104	117	130
Розряд-заряд; t <sub>з,вих</sub> =41,5 °С	0,6871	–	–	–	–
Прийняття рішення; t <sub>з,вх</sub> =47,5 °С	–	0,6823	–	–	–
Розряд-заряд; t <sub>з,вих</sub> =40 °С	–	–	0,4872	–	–
Прийняття рішення; t <sub>з,вх</sub> =45 °С	–	–	–	0,4870	–
t <sub>з,вих</sub> =37,04 °С. Відвантаження	–	–	–	–	0

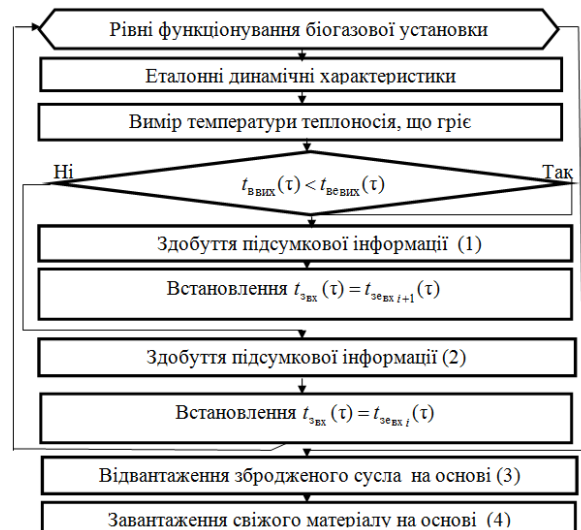


Рис. 3. Структурна схема підтримки процесу здобуття біогазу на рівні прийняття рішень, де СТ – контроль події; t – температура зброджування, K; t<sub>зе</sub> – еталонне значення температури теплоносія, що гріє, K; τ – час, с. Індокси: с – контроль працездатності; і – число рівнів функціонування; верх. – перший рівень функціонування; розр. ст. – розрахункове, стале значення параметра

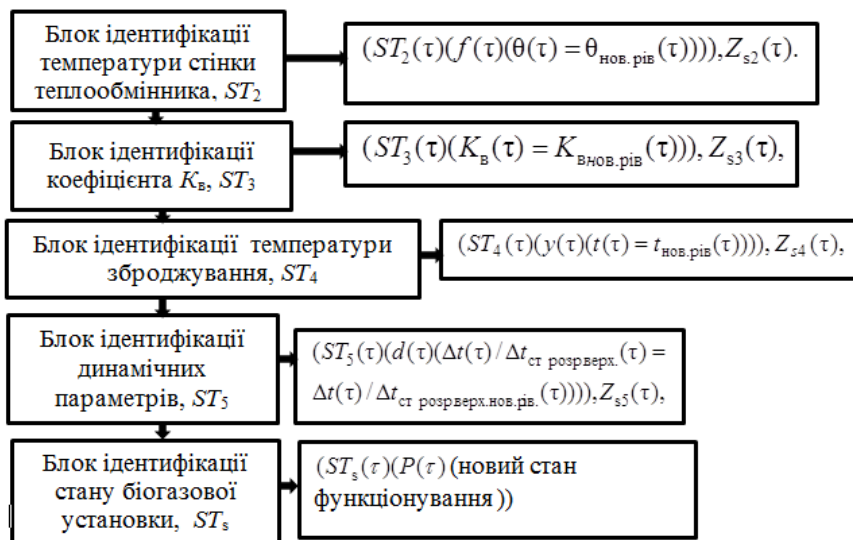


Рис. 4. Структурна схема логічного моделювання ідентифікації стану біогазової установки: ST – ідентифікація стану; P – властивості біогазової установки; Z – логічні відносини; d – динамічні параметри; t – температура зброджування, K; f – параметри, що діагностуються; y – вихідні параметри; K – коефіцієнти математичного опису;  $K_v = \frac{m(\theta_0 - t_{в.вих0})}{G_{в0}}$  – коефіцієнт математичної моделі динаміки біогазової установки,

де  $\theta$  – температура стінки теплообмінника, K, відповідно; G – витрата теплоносія, що гріє, кг/с; Індекси: s – стан; верх. – верхній рівень функціонування; розр., ст. – розрахункове, стале значення параметра; 0, 2 – початковий стаціонарний режим, внутрішні параметри; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри

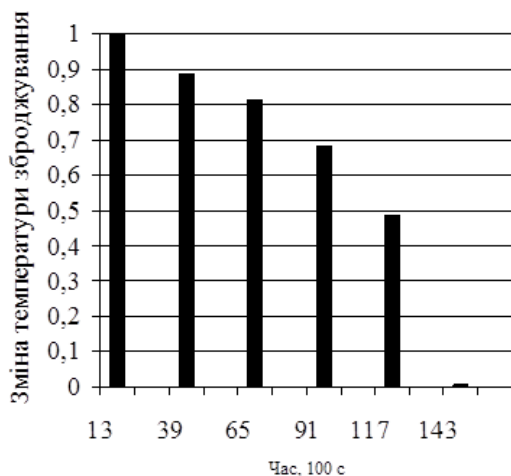


Рис. 5. Інтегрована система підтримки функціонування біогазової установки:  $t_{з,вх}$  – температура теплоносія, що гріє на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, що встановлена на рівні прийняття рішень;  $t_{з,вих}$  – температура теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, що вимірюється при функціонуванні біогазової установки

### 5. Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що:

1. Когенераційні технології з використанням біогазу потребують інтегрованої системи оцінки зміни температури зброджування щодо підтримки головних складових

процесу здобуття біогазу: виходу біогазу, відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу.

2. Запропоновано структурну схему комплексного математичного моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк, що надає можливість визначати гранично припустиму зміну температури зброджування для встановлених рівнів функціонування біогазової установки.

3. Запропоновано структурну схему логічного моделювання контролю працездатності біогазової установки для здобуття підсумкової функціональної оцінки зміни температури зброджування щодо порівняння із гранично припустимою.

4. Запропоновано структурну схему логічного моделювання вибору здобутої підсумкової функціональної інформації щодо підтримки головних складових процесу здобуття біогазу: виходу біогазу, відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу.

5. Запропоновано структурну схему логічного моделювання ідентифікації стану біогазової установки щодо підтвердження правильності прийнятих рішень після входження в нові умови функціонування.

6. Запропонована інтегрована система підтримки функціонування біогазової установки, що на основі інтегрованої аналітичної оцінки зміни температури зброджування дозволяє встановлювати температуру теплоносія, що гріє на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк при вимірюванні температури теплоносія, що гріє на виході із теплообмінника та виконувати своєчасне відвантаження збродженого суслу та завантаження свіжого матеріалу.

7. Запропонована технологія функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи

надає можливість, використовуючи, наприклад, тепловий насос при виробництві 352,5 м<sup>3</sup>/добу біогазу здобути економію біогазу 25,4 тис. м<sup>3</sup>/рік, що при підвищенні товарності біогазової установки на 13,94 % знижує собівартість виробництва електроенергії та

теплоти в межах 20–30 %. Річна економія енергії в одиницях умовного палива складає 19,5 т. у. п., а грошовий еквівалент додатково виробленої енергії – близько 100 тис. грн./рік [10–12].

#### Література

1. Железная, Т. А. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине [Текст] / Т. А. Железная, Е. Н. Олейник, А. И. Гелетуха // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 67–75.
2. Rade, M. C. Techno-Economic Analysis of Biogas Powered Cogeneration [Text] / C. M. Rade, Z. Kuzmanovic // Journal of Automation and Control Engineering. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 89–93. – doi: 10.12720/joace.2.1.89-93
3. Doseva, N. Advanced exergetic analysis of cogeneration system with a biogas engine [Text] / N. Doseva // 14th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies Conference Proceedings, June 19-25. – 2014. – Vol. 1. – P. 11–18. doi: 10.5593/sgem2014/b41/s17.002
4. Moedinger, F. Innovate biogas Multi-Stage Biogas Plant and Novel Analytical System [Text] / F. Moedinger, F. Ragazzi, M. Ast, P. Foladori, E. C. Rada, R. Binnig // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 18. – P. 672-680. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.082
5. Тодорцев, Ю. К. Выбор экономической схемы регенерации тепла когенерационной энергетической установки [Текст] / Ю. К. Тодорцев, О. С. Тарахтий, А. Н. Бундюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 8(74). – С. 17–22. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40401
6. Daingade, P. S. Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine [Text] / P. S. Daingade, S. D. Yadav // 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013. – P. 740–743. doi: 10.1109/iceets.2013.6533476
7. Talukder, N. Technical and economic assessment of biogas based electricity generation plant [Text] / N. Talukder, A. Talukder, D. Barua, Anindya // 2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2014. – P. 1–5. doi: 10.1109/eict.2014.6777854
8. Ратушняк, Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 2. – С. 26–31.
9. Ратушняк, Г. С. Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біогазових реакторах [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 2. – С. 142–145.
10. Остапенко, Д. В. Тепловые процессы в метантенке при сбраживании биомассы [Текст] / Д. В. Остапенко, О. В. Чеботарева, О. В. Сербин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – Т. 6, № 5(30). – С. 18–20.
11. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169–173.
12. Чайковська, Є. Є. Підтримка функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська, Б. І. Молодковець // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2014. – № 60(1102). – С. 31–36.
13. Чайковська, Є. Є. Розробка методу підтримки функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська, Б. І. Молодковець // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 1, № 1 (21). – С. 41–46. doi: 10.15587/2312-8372.2015.37190
14. Чайковська, Є. Є. Комплексне моделювання біогазової установки у складі когенераційної системи [Текст] / Є. Є. Чайковська, Б. І. Молодковець // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2015. – № 17(1126). – С. 135–143.