

**АДАПТИВНА СИСТЕМА З НЕЧІТКИМ КЕРУВАННЯМ
ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ЗБРОДЖУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
КУЛЬТУР У БАГАТОМОДУЛЬНИХ БІОГАЗОВИХ КОМПЛЕКСАХ**

С. А. Шворов, доктор технічних наук, професор

В. М. Поліщук, доктор технічних наук, професор

В.Є. Лукін, кандидат педагогічних наук, доцент

О. О. Опришко, кандидат технічних наук, доцент

Т. С. Давиденко, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sosdok@i.ua

Анотація. Нині одним з найважливіших завдань є розробка та впровадження передових технологій промислового виробництва біометану, який може замінити природний газ. Розв'язання цього завдання можливе на основі створення та використання багатомодульних біогазових комплексів з адаптивними системами керування процесами збродження енергетичних культур. Мета цього дослідження полягає в розробці методичних засад для побудови адаптивної системи керування процесами збродження енергетичних культур у біогазових комплексах. Для досягнення цієї мети проведено аналіз та визначені характеристики керуючого об'єкта, а також розроблена математична модель адаптивної системи з нечітким керуванням температурним режимом у біогазових установках, синтезовано цифрові регулятори, які працюють на базі нечіткої логіки в залежності від температури субстрату, що завантажується.

Ключові слова: біогаз, багатомодульні біогазові комплекси, адаптивна система керування, збродження енергетичних культур, нечітке керування

Актуальність. Нині велика увага приділяється розробці та використанню альтернативних джерел енергії. Одним з таких джерел є біогаз, який утворюється при розкладанні органічних речовин та може бути отриманий шляхом збродження органічних відходів та енергетичних рослин. Біогаз складається з 50-70 % метану та 50-30 % вуглекислого газу та після очищення від домішок може бути використаний для виробництва електроенергії, тепла, як автомобільне паливо та для інших цілей. Окрім того, використання біогазу може зменшити техногенне навантаження на

довкілля, забезпечити альтернативне енергозабезпечення для тваринницьких ферм, сприяти утилізації органічних відходів на території енергонезалежних громад. Тому дослідження та розвиток цього напрямку має велику актуальність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження показують, що незважаючи на значну кількість публікацій, що присвячені створенню та використанню біогазових установок [1-3], адаптивні системи керування температурним режимом зброджування органічних матеріалів в установках для виробництва біогазу ще не розроблені в повній мірі.

Мета дослідження - розробка методичних засад побудови адаптивної системи керування процесами зброджування енергетичних культур у біогазових комплексах.

Основним завданням, яке постає перед конструкторами при створенні системи керування біогазовою установкою, є підтримання постійної температури у всій місткості біореактора. Залежно від температури субстрату метаногенні бактерії бувають: псіхофільні (можуть жити при температурі від +5 °C до +20 °C), мезофільні (живуть при температурі від +30 °C до +42 °C), термофільні (живуть при температурі від +54 °C до +56 °C). Розмножуються метаногенні бактерії дуже повільно і не виносять різких перепадів температури. Будь-які різкі зміни температури впливають негативно на процес бродіння. Для кожного режиму зброджування допустимі коливання температур, наприклад, для мезофільного ± 3 °C, а для термофільного ± 1 °C. Метаболічна активність анаеробних бактерій знаходиться в прямій залежності від температури середовища. Згідно з останніми дослідженнями, зі зростанням температури вихід біогазу і розкладання органіки збільшується. Зі спаданням температури до 15 °C процес бродіння повністю припиняється. Різке зменшення температур у біореакторі спостерігається при завантаженні нового субстрату, особливо в зимовий період року. Виходячи з цього виникає необхідність у створенні адаптивної системи керування температурою в біореакторі залежно від температури субстрату, що завантажується.

Для розробки адаптивної системи керування температурою в біореакторі необхідно вирішити такі завдання:

проаналізувати та визначити характеристики об'єкта управління;

розробити математичну модель адаптивної системи з нечітким регулятором в установках для виробництва біогазу;

синтезувати цифрові регулятори, що працюють на базі нечіткої логіки, для побудови адаптивної системи керування температурним режимом у біогазових комплексах.

Матеріали та методи дослідження. Існує багато технічних варіантів здійснення метаногенезу біомаси – від простих до технологічно складних установок з адаптивними системами керування (АСК) для довготривалої безперервної дії. Стандартна промислова біогазова установка має резервуари для збору і підготовки сировини, камери ферментації з обігрівальними пристроями, резервуари для біогазу та установки з обладнанням для очистки та обліку кількості газу, а також резервуари для зберігання біомаси, яка перебродила. Оптимальна температура для мезофільної ферментації біомаси становить близько 35 °С. Біогазові установки зазвичай оснащуються обігрівальними пристроями, такими як водяні нагрівачі або теплообмінники. Витрати тепла для підтримання процесу ферментації залежать від конструкції резервуару (теплової ізоляції). Для підігрівання води іноді використовують електричну енергію, отриману з мережі або від вітрової електростанції. У цій біогазовій установці використовуються внутрішні обмінники у формі циліндрів або спіралей, розміщених у центральній частині камери ферментаційного резервуару. Незалежно від типу обмінника, температура води, яка протікає в них, не повинна перевищувати 80 °С, щоб зберегти біологічний процес ферментації.

У розглянутому біореакторі температура біомаси регулюється шляхом зміни кількості гарячої води, яка подається в теплообмінник калорифера. Для цього в біореакторі встановлюється кран, який є регулюючим органом температури, а сам біореактор виступає об'єктом регулювання. При постійній температурі гарячої води, яка забезпечується автоматичною системою контролю водогрійного котла, відкриття крана призводить до збільшення кількості гарячої води, яка протікає через калорифер, і збільшення кількості тепла, яке передається до біореактора, і навпаки.

Дію регулювання температури виконує регулятор температури, який змінює положення заслінки крана на кут m .

Основними збурюючими діями на об'єкт управління, які викликають зміну температури біомаси в реакторі при постійному значенні керуючого впливу $m = const$, є зовнішні та внутрішні (F) впливи (температура, вологість, тиск, тощо).

Керованою величиною цього об'єкта є температура біомаси всередині біореактора x .

Для об'єкта управління в АСК біореактором біогазової установки можна використовувати аналоговий або цифровий ПП – регулятор. Дослідження системи з такими регуляторами показує, що перехідні процеси у системі мають велике перерегулювання (до 50 %) і великий час регулювання (до 100 с) [4]. Тому більш доцільно при реалізації мезофільного режиму бродіння використовувати нечіткі регулятори.

Математичний опис динаміки теплових процесів побудовано на основі рівнянь теплового балансу і теплопередачі при таких припущеннях:

температура субстрату і теплоносія змінюється тільки у напрямку їх руху;

коефіцієнт теплообміну і теплопередачі не залежить від температури і в часі не змінюється;

теплофізичні властивості субстрату і теплоносія не залежать від температури і на протязі перехідного процесу є сталими величинами.

Результати досліджень та їх обговорення. Модельованою об'єкт складається із чотирьох ємкостей, здатних акумулювати теплоту (корпус резервуара, біомаса, теплоносій, поверхневий підігрівач) і має бути описаний рівнянням четвертого порядку [5].

Для зниження порядку диференціальних рівнянь приймаємо такі спрощення і припущення:

теплоємність стінки нагрівача можна розподілити порівну між теплоносієм і субстратом (одну половину додати до ємності субстрату, другу – ємності теплоносія);

теплову ємність стінки корпусу також можна віднести до субстрату, враховуючи масу останнього.

Біореактор можна представити як двоємкісний об'єкт і описати його двома диференціальними рівняннями [5]:

$$\begin{cases} Mc \cdot Cc \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + Cc \cdot Gc \cdot H \frac{\partial \theta}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta) - K \cdot F \cdot (\theta - t_3); \\ Mt \cdot Ct \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} + Ct \cdot Gt \cdot H \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha \cdot f \cdot (t - \theta), \end{cases} \quad (1)$$

де θ , t , t_3 – температура субстрату, теплоносія і зовнішнього середовища, $Mc \cdot Cc$, $Mt \cdot Ct$ – теплова ємність субстрату і теплоносія, $Cc \cdot Gc$, $Ct \cdot Gt$ – тепловий еквівалент субстрату і теплоносія, α , K – коефіцієнти тепловіддачі від теплоносія до субстрату і теплопередачі крізь стінку корпусу, f , F – поверхня нагрівача і корпусу.

Оскільки для стабілізації температури теплоносія і субстрату як регулюючі параметри використовують їхні вихідні значення ($t_{вих}$, $\theta_{вих}$), то приймаючи мінімальне значення змінення температури t і θ в напрямку руху, тобто

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cong \frac{\Delta \theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}; \quad \frac{\partial t}{\partial x} \cong \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{t_2 - t_1}{H},$$

систему (1) можна представити у вигляді:

$$\begin{cases} Mc \cdot Cc \cdot \frac{d\theta_2}{d\tau} = Cc \cdot Gc \cdot (\theta_1 - \theta_2) + Kt \cdot Ft \cdot (\bar{t}_r - \bar{\theta}_c) - Kk \cdot Fk \cdot (\bar{\theta} - t_3); \\ Mt \cdot Ct \cdot \frac{dt_2}{d\tau} = Ct \cdot Gt \cdot (t_1 - t_2) - Kt \cdot Ft \cdot (\bar{t}_r - \bar{\theta}_c), \end{cases} \quad (2)$$

де Mc , Gc – маса субстрату і пропускна здатність реактора (відповідно кг, кг/с); Mt , Gt – маса теплоносія в теплообміннику і його витрати (кг, кг/с); Cc , Ct – питома теплоємність субстрату і теплоносія, Kt , Kk – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника і корпусу (Вт/м $^{\circ}$ С); Ft , Fk – поверхня теплообміну теплообмінника і корпусу (m_2 , t_2); θ_2 – температура теплоносія і субстрату на виході ($^{\circ}$ С); t_3 – температура зовнішнього середовища ($^{\circ}$ С); $\bar{t}_r = 0.5 \cdot t_1 + 0.5 \cdot t_2$; $\bar{\theta}_c = 0.5 \cdot \theta_1 + 0.5 \cdot \theta_2$ – середні значення температур ($^{\circ}$ С).

Розв'язавши систему рівнянь (2) відносно t_2 і θ_2 отримаємо:

$$A \frac{d^2 t_2}{d\tau^2} + B \frac{dt_2}{d\tau} + C \cdot t_2 = D_1; \quad (3)$$

$$A \frac{d^2 \theta_2}{d\tau^2} + B \frac{d\theta_2}{d\tau} + C \cdot \theta_2 = D. \quad (4)$$

Розв'язок рівняння (3) і (4) отримаємо у вигляді залежностей $t(\tau)$ і $\theta(\tau)$:

$$t(\tau) = \frac{t_{20} \cdot C - D_1}{C \cdot (r_1 - r_2)} (r_1 \cdot e^{r_2 \tau} - r_2 \cdot e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}; \quad (5)$$

$$A \frac{d^2 \theta_2}{d\tau^2} + B \frac{d\theta_2}{d\tau} + C \cdot \theta_2 = D. \quad (6)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}$ – корені характеристичного рівняння;

$$A = T_1 \cdot T_2; \quad B = a_1 \cdot T_2 + a_2 \cdot T_1; \quad C = (a_1 \cdot a_2 - I);$$

$$T_1 = \frac{Mc \cdot Cc}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft}; \quad T_2 = \frac{Mt \cdot Ct}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft};$$

$$D = (a_1 \cdot b_1 + I)t_1 + (a_1 + b_1) \cdot \theta_1 + Kk \cdot Fk \cdot t_3;$$

$$D_1 = (a_2 + b_2) \cdot t_1 + (a_1 \cdot b_1 + I) \cdot \theta_1 + a_2 \cdot Kk \cdot Fk \cdot t_3;$$

$$a_1 = \frac{Gc \cdot Cc + 0.5(Kt \cdot Ft + Kk \cdot Fk)}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft};$$

$$a_2 = \frac{Gt \cdot Ct + 0.5 \cdot Kt \cdot Ft}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft};$$

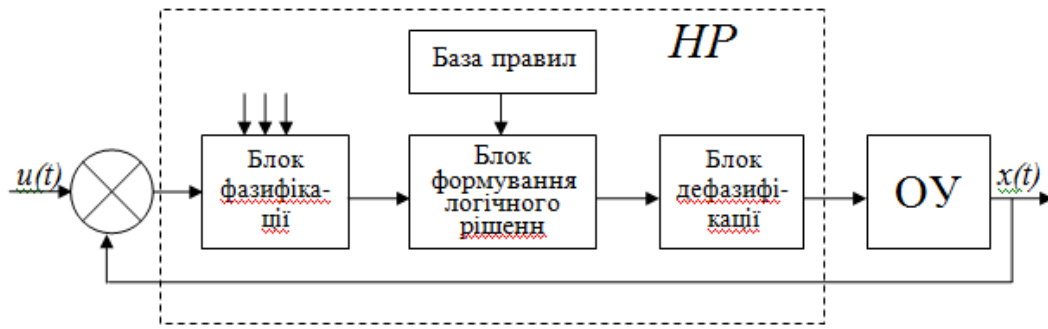
$$b_1 = \frac{Gc \cdot Cc - 0.5(Kt \cdot Ft + Kk \cdot Fk)}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft};$$

$$b_2 = \frac{Gt \cdot Ct - 0.5 \cdot Kt \cdot Ft}{0.5 \cdot Kt \cdot Ft}.$$

Функціональна схема системи адаптивного керування складається з пристрою порівняння, нечіткого регулятора (НР), об'єкта управління (ОУ) і зворотного зв'язку.

Нечіткий регулятор (фаззі-регулятор, fuzzy-controler) складається із трьох основних блоків (рис. 1) – блоку фаззифікації (fuzzyfication), блоку формування логічного рішення (inference) та блоку дефаззифікації (defuzzyfication) [4].

Нечіткий регулятор (НР) працює в дискретному режимі, тому адаптивна система керування з таким регулятором (рис. 1) містить пристрої сполучення мікроконтролера з об'єктом управління – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП).



Функціональна схема системи адаптивного керування

АЦП квантує безперервну помилку $\theta(t) = u(t) - x(t)$ з кроком квантування h . В якості першої і другої похідних від помилки зазвичай вираховують першу і другу відмінність за формулами: $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)] / h$;

$\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)] / h = [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)] / h^2$ – квантована помилка на вході АЦП. ЦАП є, як правило, фіксатор нульового порядку з передатною функцією $H(s) = (1 - e^{-hs}) / s$.

Слід зазначити деякі особливості НР. Нечіткий регулятор працює в дискретному режимі, тому на кожному кроці квантування h він повинен опрацювати всі вхідні змінні, які характеризують процеси в об'єкті керування та забезпечувати адаптивне керування температурним режимом у біогазовому комплексі. Система з НР зазвичай стійка в співвідношенні зміни параметрів об'єкта керування, що пов'язано з нечіткою природою правил функціонування. Традиційні методи описання регуляторів, наприклад, за допомогою передатних функцій, для НР не підходять. Особливістю НР є реалізація процесу керування за допомогою лінгвістичних правил.

Зазвичай нечіткі регулятори реалізуються через програмне забезпечення високого рівня, що забезпечує гнучкість налаштування [4]. Після моделювання та випробувань системи керування з нечітким регулятором в замкнутому контурі можна змінювати кількісні діапазони лінгвістичних змінних, функції належності та систему правил, щоб отримати бажаний результат керування.

Нечіткі регулятори використовуються переважно для керування об'єктами, які або не можуть бути формалізовані, або їх формалізація пов'язана зі значними труднощами. Тому нечіткі регулятори надають більш високу якість автоматичного

керування, що проявляється у менших помилках в перехідних та встановлених режимах.

Висновки і перспективи. У дослідженні було теоретично обґрунтовано, що застосування нечіткого регулятора може покращити систему керування температурою в біореакторі біогазової установки, що в свою чергу підвищить продуктивність біогазових реакторів. Методичні засади для побудови адаптивної системи керування процесами зброджування енергетичних культур у біореакторах були розроблені на основі теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної, а також була створена математична модель керування температурним процесом. Ця модель дозволяє враховувати вплив різних факторів на процес термостабілізації анаеробних процесів. Результати показали, що завдяки впровадженню нечіткого регулятора у біогазову установку, вихід біогазу збільшується на більше ніж 15 %.

Список використаних джерел

1. Marks S., Dach J., Fernandez Morales F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 21, No. 4, pp. 19-25.
2. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Підвищення продуктивності біогазового реактора управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2006. №2. С. 29–32.
3. Сербін В. А. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в системах ТГВ. *Макіївка: ДонДАБА*, 2003. 153 с.
4. Гостьев В. І. Нечеткі регулятори в системах автоматичного управління. К.: «Радиоаматор», 2008. 972 с.
5. Котов Б. І., Лендел Т. І. Моделювання динамічних характеристик біотехнологічних установок як об'єктів автоматичного керування температурними режимами. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2011. Вип. 166, ч. 3. С. 49–52.

References

1. Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F. J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 21 (4), 19-25.
2. Ratushniak, H. S., Dzhedzhula, V. V. (2006). *Pidvyshchennia produktyvnosti biohazovoho reaktora upravlinniam parametramy vilnokonvektyvnykh protsesiv teploobminu* [Increasing the productivity of a biogas reactor by controlling the parameters

of free convective heat exchange processes]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, 2,. 29–32.

3. Serbin, V. A. (2003). Netradytsiini ta ponovliuvalni dzherela enerhii v systemakh THV [Non-traditional and renewable energy sources in DVT systems]. Makiivka: DonDABA, 153.

4. Hostiev, V. I. (2008). Nechetki rehulatory v systemakh avtomatychnoho upravlinnia [Fuzzy regulators in automatic control systems]. Kyiv: «Radyoamator», 972.

5. Kotov, B. I., Lendiel, T .I. (2011). Modeliuvannia dynamichnykh kharakterystyk biotekhnolohichnykh ustanovok yak obiektiv avtomatychnoho keruvannia temperaturnymy rezhymamy [Modeling of dynamic characteristics of biotechnological installations as objects of automatic control of temperature regimes]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy, 166 (3),. 49–52.

ADAPTIVE SYSTEM WITH FUZZY STEERING TEMPERATURE REGIME OF FERMENTATION OF ENERGY CULTURES IN BATATOMODULAR BIOGAS COMPLEXES

S. Shvorov, V. Polishchuk, V. Lukin, O. Opryshko, T. Davidenko

Abstract. *Developing and implementing promising technologies for industrial biomethane production is a critical task today, with the goal of replacing natural gas. To achieve this on a large scale, it's necessary to develop and apply adaptive systems for controlling the fermentation processes of energy crops in multi-module biogas complexes. The aim of this research is to establish methodological foundations for building an adaptive control system that can manage the fermentation processes of energy crops in biogas plants. To achieve this, the control object's characteristics are analyzed and determined, a mathematical model of an adaptive system is developed with fuzzy temperature control in biogas plants, and digital controllers are synthesized that depend on the temperature of the substrate and operate based on fuzzy logic.*

Key words: *biogas, multi-module biogas complexes, adaptive control system, fermentation of energy crops, fuzzy control*