

## ЗАВДАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ БІОГАЗОВИМ КОМПЛЕКСОМ

### Георгій Кулінченко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління  
Сумський державний університет, вул. Миколи Сумцова, 2, Суми, Україна, 40000, georgv@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-8501-5636

### Віталій Мандриченко

студент кафедри комп'ютеризованих систем управління  
Сумський державний університет, вул. Миколи Сумцова, 2, Суми, Україна, 40000, mandrik945@gmail.com  
ORCID: 0009-0001-1169-4699

### Роман Васькін

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій  
Сумський державний університет, вул. Миколи Сумцова, 2, Суми, Україна, 40000, r.vaskin@ecolog.sumdu.edu.ua  
ORCID: 0000-0003-4382-0327

### Вадим Ланчинський

аспірант, викладач-стажист кафедри комп'ютеризованих систем управління  
Сумський державний університет, вул. Миколи Сумцова, 2, Суми, Україна, 40000, v.lanchynskyj@ksu.sumdu.edu.ua  
ORCID: 0009-0001-0777-9980

Наукове дослідження спрямовано на покращення показників процесу виробництва біогазу, зокрема, шляхом стабілізації рівня субстрату в біореакторі. Ефективність процесу метаногенезу залежить від досягнення компромісу між показниками життєздатності мікроорганізмів і параметрами, що забезпечують інтенсифікацію генерації біогазу.

Розглядаючи канали керування процесом метаногенезу, на першому етапі досліджень здійснили моделювання процесу керування рівнем заповнюваності реактора, оскільки стабільність цього параметра мінімізує коливання інших параметрів процесу. Основною метою дослідження було оцінювання можливостей реалізації регулятора керування рівнем заповнюваності реактора, щоб визначити варіанти побудови цього регулятора на базі мікропроцесорних засобів автоматизації.

Використання класичного ПД регулятора для досліджуваного об'єкта виявилось нетривіальним завданням, оскільки об'єкт керування відрізняється нелінійним характером опису процесу, великим значенням сталої часу та запізнення. Регулятор лінеаризованого об'єкта керування налаштували інструментом Sisotool MATLAB Simulink, який дає змогу корегувати параметри перехідного процесу та частотну характеристику об'єкта з регулятором за допомогою потрібних коригувальних ланок.

Згадані особливості досліджуваного процесу не дали змоги отримати здатний до фізичної реалізації класичний ПД регулятор. Альтернативою до розглянутого регулятора запропоновано релейний регулятор, який навіть в умовах імітації збурень параметрів моделі забезпечив зменшення впливу збурень витрат потоків процесу на рівень продуктів у просторі біореактора.

У процесі налаштувань релейного регулятора з'ясувалося, що результати налаштувань досліджуваного об'єкта суттєво залежать від значень транспортної затримки. Задовільних результатів у регулюванні рівня субстрату в біореакторі вдається досягти лише за певного співвідношення між витратами вхідного та вихідного потоків продуктів.

**Ключові слова:** регулювання рівня, моделювання, передатна функція, релейний регулятор, стійкість процесу метаногенезу.

**Актуальність роботи.** Наслідки енергетичних викликів, які характерні для сьогодення, змушують шукати додаткові джерела енергії, які не пов'язані з видобуванням корисних копалин. Одним із таких джерел є зелена енергетика, до

якої належить виробництво біогазу. Виробництво біогазу складається з низки технологічних процесів, якими важко керувати узгоджено, оскільки завдання керування недостатньо формалізовані. Такі обставини не покращують умови для розви-

тку систем керування, що, у свою чергу, гальмує підвищення ефективності цієї галузі енергетики. З огляду на те що енергетична ефективність оцінюється не тільки продуктивністю біогазової установки, а й витратами енергії на одиницю виробленої продукції (біогазу), то під час вибору напряму досліджень необхідно оцінювати співвідношення цих параметрів. Вибір стратегії керування полягає у визначенні критерію – максимізації об'єму виробленого газу/мінімізації енерговитрат.

Дослідницькі матеріали в цій галузі зазвичай присвячені дослідженням хімічних реакцій процесу або конструкційним особливостям біогазових установок. Водночас дослідження з підвищення ефективності процесу виробництва біогазу з використанням систем керування висвітлені не достатньо. Тому актуальність цих досліджень полягає у формуванні підходів до побудови систем автоматизації біогазовим комплексом.

Звертаючись до аналізу процесу виробництва біогазу, можемо виділити декілька етапів, які формують цей процес: завантаження сировини, зброджування, відкачування відпрацьованої сировини [1].

Продуктивність технологічного процесу біоконверсії етапу зброджування субстрату визначають такі параметри, як час зброджування сировини, температура та стабільність її утримання, ритмічність завантаження реактора (метантенка) і підтримка оптимального рівня заповнення реактору.

З перерахованих параметрів температура є мало не головним технологічним параметром, від якого залежить продуктивність установки. Але оптимізація режимів газоутворення, критерієм якого є стабільність утримання температури, виявляється проблематичною. Ці проблеми витікають із неоднозначності умов ведення процесу або вибору типу процесу. Так, у роботі [2] показано, що найкращий результат продуктивності біогазу досягається при температурі 55 °С. Разом із тим фахівці з фірми ZORG BIOGAS [3], маючи 15-річний досвід роботи, стверджують, що найкращими умовами процесу газоутворення можуть бути режими з температурою від 30 до 50 °С. Різницю в твердженнях можна пояснити тим, що приведені результати не посилаються на інші параметри ведення процесу. Тому подальші кроки щодо вибору методів оцінювання потребують додаткових уточнень, зокрема, шляхом моделювання досліджуваних аспектів процесу метаногенезу.

**Метою роботи** є оцінювання результатів моделювання каналу керування рівнем заповненості реактора, який створює умови стабільності ведення процесу метаногенезу.

**Матеріал і результати досліджень.** Продуктивність процесу зброджування прямо залежить від активності мікроорганізмів, яка з часом протікання процесу суттєво зменшується. Так, підвищення температури субстрату в реакторі на 4 °С протягом тижня знижує біологічну активність мікроорганізмів, що приводить до зупинки процесу метаногенезу. Тому виникає необхідність утримання балансу між ступенем активності мікроорганізмів і тривалістю часу збереження їх активності. Цей баланс можна досягти завдяки використанню екстремальних регуляторів, що дають змогу вирішити завдання балансування [4] шляхом оптимізації температурних режимів.

Пов'язуючи необхідність утримання температурних режимів з ефективністю процесу, проаналізуємо формулу ефективності:

$$m_{mb} = m_{ob} - \frac{q}{w}, \quad (1)$$

де  $m_{mb}$  – кількість газу після вирахування витрат, м<sup>3</sup>;

$m_{ob}$  – загальна кількість отриманого біогазу, м<sup>3</sup>;

$q$  – витрати енергії на потреби біогазового комплексу, кДж;

$w$  – теплова ефективність біогазу, кДж/м<sup>3</sup>.

З рівняння (1) випливає, що для збільшення ефективності процесу необхідно зменшити енергетичні витрати на газоутворення або підвищити продуктивність процесу шляхом утримання балансу між ступенем активності мікроорганізмів і часом їхньої життєдіяльності.

Співвідношення (1) можна використати для оцінювання різних режимів роботи. Так, безперервний режим роботи [5] дає змогу постійно отримувати біогаз, але вимагає сталої подачі сировини для забезпечення стабільного процесу бродіння. У випадку періодичного процесу [6] енергетичні параметри, що забезпечують метанове бродіння в реакторі, змінюються, тому під час моделювання такого процесу необхідно скористатися низкою припущень і спрощень, щоб коректно оцінити енергетичні витрати.

Інші підходи [7], навпаки, присвячуються питанням споживання біогазу або розробці моделей на базі «чорного», «сірого» та «білого» ящика, які в найближчій перспективі не передбачають реальної реалізації.

У роботі [8] досліджено регулювання подачі субстрату до реактора на базі прогнозних ставнів об'єкта керування (ОК), що дало змогу підвищити вихід метану. При цьому енергетичні затрати описаного процесу до уваги не бралися.

Іншим параметром, що впливає на продуктивність процесу, є рівень заповнюваності реактора. Опосередковано стабільність процесу метаногенезу залежить від стабільності хіміко-фізичних параметрів, яку можна забезпечити за рахунок утримання рівня матеріалів у просторі реактора [9]. Утримання рівня необхідне тому, що в разі зниження рівня заповнюваності реактора знижується маса субстрату, яка продукує біогаз. Навпаки, у разі збільшення рівня заповнюваності реактора порушуються оптимальні умови метаногенезу, зокрема співвідношення волога/повітря/вміст субстрату, що також зменшує продуктивність реактора.

Для забезпечення стабільності теплового режиму й інших параметрів процесу в реакторі першочерговим завданням є створення умов стабільного проходження метаногенезу. Завдання зменшення коливань процесу метаногенезу частково вирішується за рахунок стабілізації рівня заповнення реактору. Опосередковано стабілізація рівня сировини в реакторі зменшує коливання теплової енергії, яка споживається в процесі синтезу, тим самим підвищуючи ефективність усього процесу.

Продуктивність процесу виробництва біогазу прямо визначається життєздатністю мікробів і витратами відпрацьованого субстрату. Тому стабілізація рівня субстрату в біореакторі дає змогу досягти компромісу між часом життєздатності мікробів і швидкістю генерації біогазу.

Модель контуру регулювання рівня суміші базується на рівнянні матеріального балансу. Швидкість зміни рівня завантаження біореактора оцінюють співвідношенням:

$$\frac{dL}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2)$$

де  $L$  – рівень субстрату в реакторі;  $Q_{in}$  – вхідні витрати субстрату, що надходить до реактора;  $Q_{out}$  – витрата відпрацьованого субстрату, що відбирається насосом із реактора.

Результати регулювання рівня субстрату залежать від часу, через який збурювальна величина  $Q_{in}$  зможе повернутися до рівноважного стану.

Оскільки зв'язок рівня субстрату  $L$  у реакторі з витратами субстрату  $Q$  описується нелінійними функціями, то для використання відомих засобів

оцінювання якості регулювання необхідна лінеаризація передатної функції цього ОК. Лінеаризовані рівняння при цьому описуються у відхиленнях змінних від обраної робочої точки режиму.

Якщо номінальному режиму бродіння відповідає значення рівня субстрату  $L_0$  і витрат входів  $Q_{in0}$ ;  $Q_{out0}$ , то відхилення від вибраної робочої точки мають вигляд:

$$L^o = L - L_0; Q_{in}^o = Q_{in} - Q_{in0}; Q_{out}^o = Q_{out} - Q_{out0}. \quad (3)$$

Тоді співвідношення (2) прийме вид:

$$dL^o/dt = [Q_{in}^o + Q_{in0}] - [Q_{out}^o + Q_{out0}]. \quad (4)$$

Похідна  $dL^o/dt$  у рівнянні (4) нелінійно залежить від змінних  $L^o$ ,  $Q_{in}^o$  та  $Q_{out}^o$ .

Функції (2) відповідає лінійне рівняння:

$$dL^o/dt = -L^o/T + K_1 * Q_1^o - K_2 * Q_2^o. \quad (5)$$

Диференціальне рівняння ОК має лінеаризований вигляд:

$$T_L \frac{dL}{dt} + L = K_1 Q_{in} - K_2 Q_{out}. \quad (6)$$

Коефіцієнти рівняння (6) знаходять з умов функціонування об'єкта в номінальному режимі для випадку, коли  $dL^o/dt=0$ .

Операторна передатна функція, що відповідає рівнянню (6), для керівного і збурювального впливів буде виглядати так:

$$W_{KER}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_{in}^o(p)} = \frac{K_1}{T_L p + 1}, \quad (7)$$

$$W_{ZB}(p) = \frac{L^o(p)}{Q_{out}^o(p)} = -\frac{K_2}{T_L p + 1}. \quad (8)$$

Керованість процесу метаногенезу залежить від співвідношення його сталої часу та сталої переміщення субстрату по трубопроводу.

Транспортне запізнення  $\tau$ , яке залежить від часу переміщення субстрату по трубопроводу, ураховується в передатній функції (7) множителем  $\exp(-\tau p)$ :

$$W_{KER}(p) = \frac{K_1}{T_L p + 1} * \exp(-\tau * p). \quad (9)$$

Ураховуючи об'єми реактора, щільність субстрату й потужність відкачувальних насосів, а також скориставшись довідниковими даними значення коефіцієнтів передатної функції та сталих часу, можемо оцінити такими значеннями: стала часу  $T_L=190$  хв.; час запізнення  $\tau = 50$  хв.

Передатна функції каналом керування отримана з перехідної характеристики й має вигляд:

$$W_{ker}(p) = \frac{k_1}{190p + 1} * \exp(-50p). \quad (10)$$

Наведена передатна функція (10) використовується під час побудови моделі керування рівнем субстрату в біореакторі, яка показана на рис. 1. У результаті імітаційного моделювання отримана перехідна характеристика замкненого контуру рівня субстрату в реакторі без урахування транспортного запізнення (без регулятора), яка показана на рис. 2а. Відповідно, на рис. 2б зображено перехідну характеристику ОК з урахуванням транспортного запізнення.

З аналізу осцилограм, поданих на рис. 2, видно, що запізнення реакції ОК стосовно керівного впливу створює умови для виникнення коливальних процесу регулювання. Наявність незгайоючих коливальних свідчить про нестійкість процесу. Складнощі стабілізації рівня субстрату

в реакторі виникають через специфіку ОК, яка пов'язана з нелінійним характером зв'язків і значним часом запізнення. Крім того, складнощі моделювання нелінійних зв'язків зумовлюють нестійкість процесу самого моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Тому нелінійну ланку запізнення доцільно апроксимувати послідовністю лінійних аперіодичних ланок із відповідною сталою часу.

Достатньо прогресивним методом налаштувань регулятора лінеаризованої системи є інструмент *Sisotool MATLAB Simulink*, який за наявної моделі ОК (рис. 1), тобто його передатної функції:

$$W_{ok}(p) = \frac{0.003012}{s^2 + 0.06024 * s + 0.003012}, \quad (11)$$

дає змогу отримати діаграму Бode, що зображена на рис. 3, і підібрати необхідні коригувальні ланки, що зображена на рис. 4.

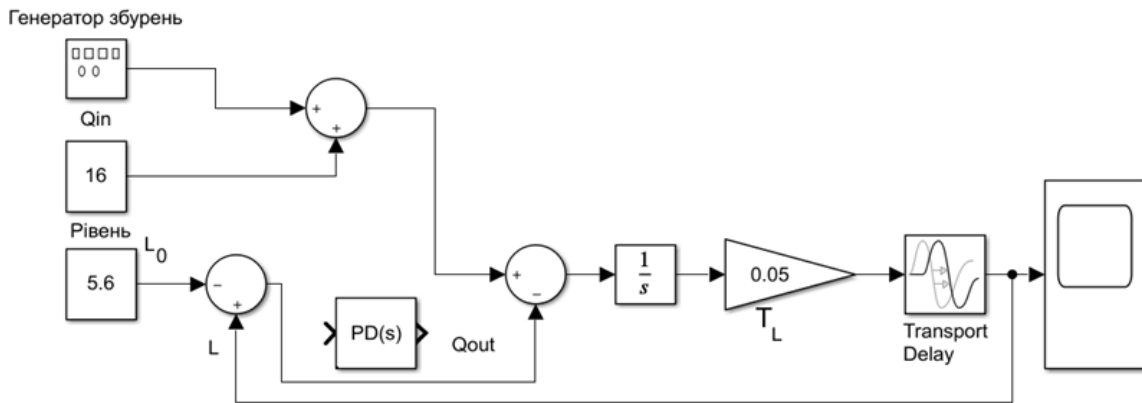


Рис. 1. Схема моделювання регулятора рівня

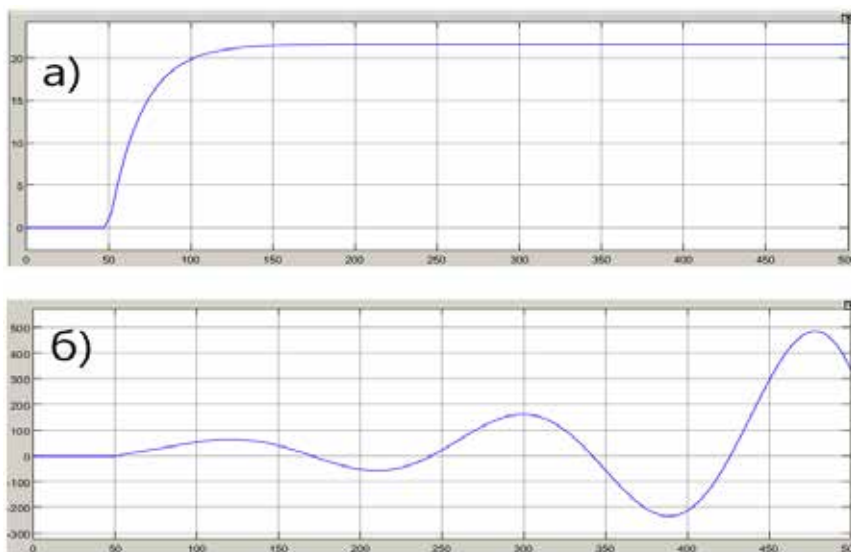


Рис. 2. Перехідна характеристика ОК

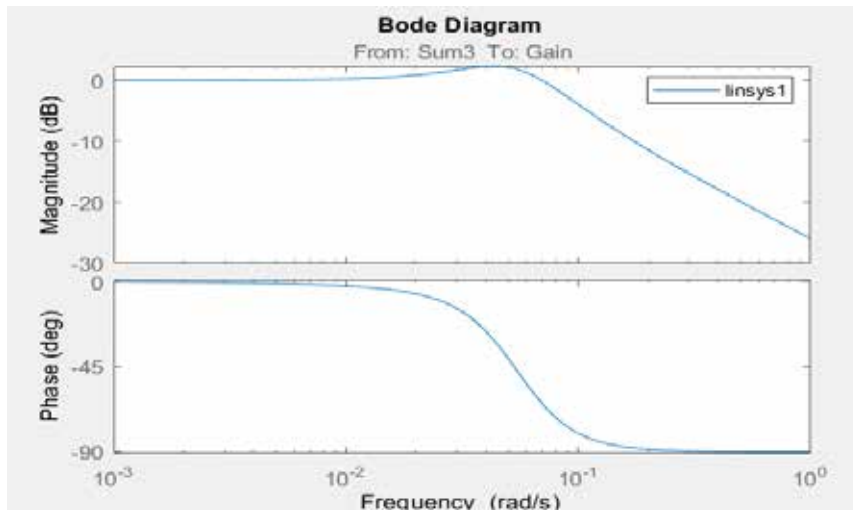


Рис. 3. Діаграма Бодє ОК

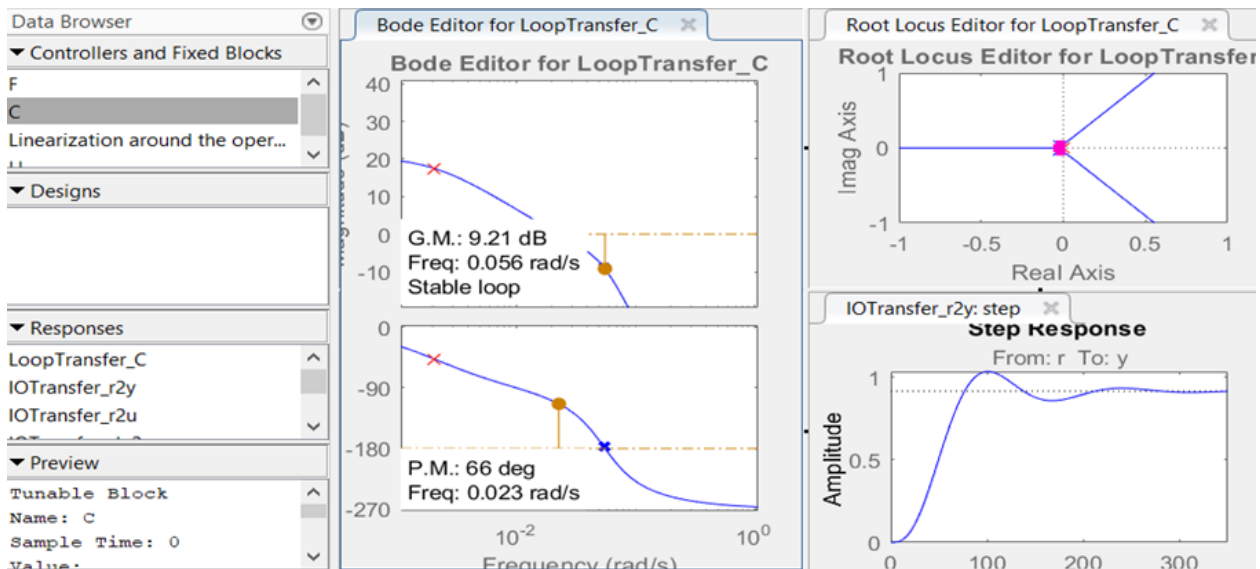


Рис. 4. Скорегована діаграма Бодє та перехідна характеристика ОК

Скорегованій амплітудочастотній характеристиці відповідає коректор-компенсатор С, передатна функція якого має такий вигляд:

$$C = 10.596 \times \frac{1}{(1 + 4.9e+02s)} \quad (12)$$

Наступним кроком синтезу ПІД регулятора є перехід від передатної функції компенсатора до налаштувань ПІД регулятора. Проаналізувавши отримані коефіцієнти налаштувань ПІД регулятора для досліджуваного ОК, доходимо висновку, що засобами MATLAB такий регулятор фізично реалізувати неможливо.

Альтернативним варіантом реалізації регулятора для ОК зі значними сталими часу є роз-

робка релейного регулятора (РР), який у моменти перемикання характеризується практично необмеженим коефіцієнтом підсилення. Схема моделювання РР, що стабілізує рівень субстрату розглянутої моделі, показана на рис. 5.

Дослідження ефективності РР показано на рис. 6 і 7, де відображена перехідна функція ОК за наявності й відсутності можливих збурень процесу регулювання рівня субстрату в реакторі.

Як видно з рис. 6 і 7, використання РР дає змогу покращити динаміку процесу (зменшується час регулювання) та забезпечити мінімізацію впливу збурень. З огляду на велику сталу часу й відгук ОК на керівні впливи, можемо констатувати, що практична реалізація досліджуваного регулятора видається складними процедурами. Проте

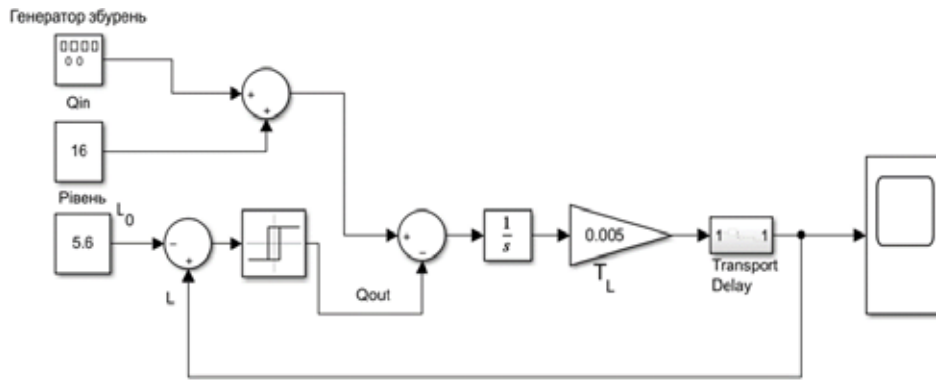


Рис. 5. Схема моделювання релейного регулятора

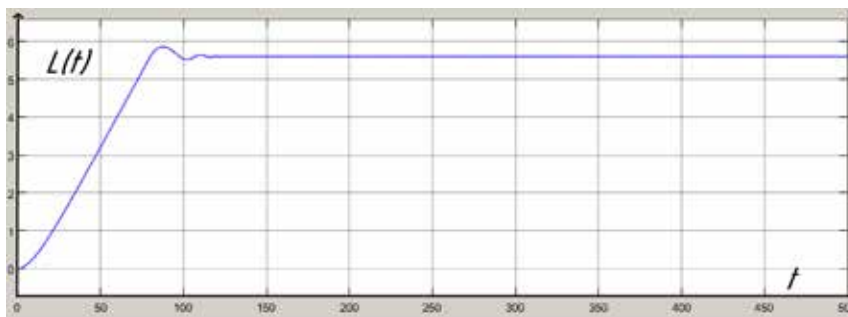


Рис. 6. Перехідна характеристика ОК з РР без збурень

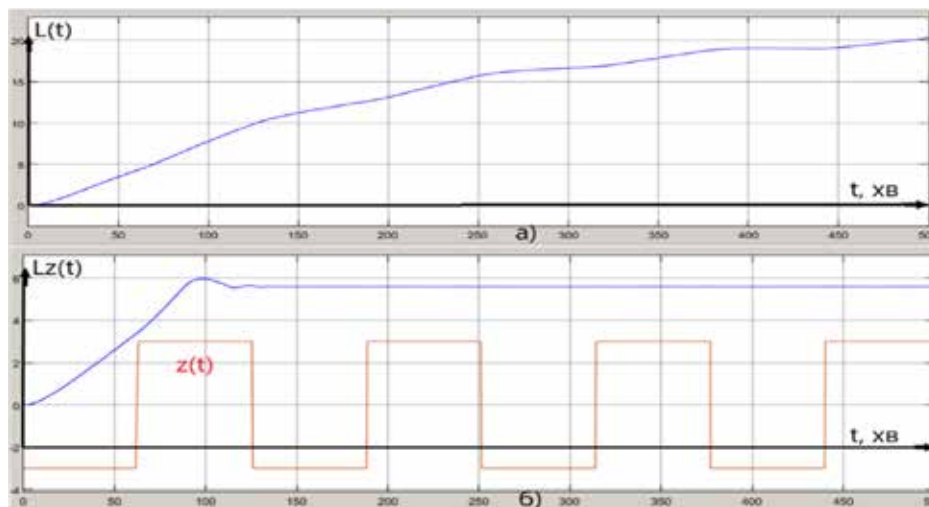


Рис. 7. Перехідна характеристика ОК у разі додаткових збурень: а) без РР; б) за наявності регулятора

подальші роботи передбачається спрямувати на розгляд інших аспектів дослідження, таких як керування тепловими режимами біореактора й пошук більш ефективних каналів керування ОК.

**Висновки.** Виходячи із завдань підвищення ефективності процесів метаногенезу, установили, що внаслідок відсутності загальноприйнятих методів оцінювання ефективності ведення згаданих процесів важко сформулювати першочергові завдання досліджень. Тому з аналізу про-

цесу виділено, на думку авторів, головні контури керування.

У результаті досліджень розробленої моделі процесу регулювання рівня оцінено можливості реалізації цього регулятора. Зважаючи на значення сталих часу процесу метаногенезу, необхідно розглянути можливості ефективного керування процесом газоутворення з використанням інших контурів, які б дали змогу більш ефективно забезпечувати процес газоутворення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Cherevko G., Shuhalo V. Biogas production as an effective method of reducing the eutrophication of reservoirs. *The scientific heritage*. 2020. № 45. P. 53–59.
2. Оцінка виходу біогазу та електроенергії при монозброджуванні гною великої рогатої худоби та при додаванні фузу в якості косубстрату / В.М. Поліщук, Л.Л. Тітова, С.А. Шворов, Ю.О. Гунченко. *Problems of Regional Energetics*. Kishinau; Republic of Moldova, 2019. № 2 (43). P. 117–132.
3. Мезофільні та термофільні режими. <https://zorg-biogas.com/uk/blog/mezofilnye-i-termofilnye-rezimy>.
4. Ужеловський В.О., Ткаченко С.О. Екстремальне керування температурним режимом в умовах автоматизації технологічного процесу виробництва біогазу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2014. № 3. С. 50–57.
5. Dinh Pham Van. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*. 2019. <http://www.eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eeer.2018.334>.
6. Поліщук В.М., Лободко М.М., Сидорчук О.В. Вплив режимів метанового бродіння на ефективність виробництва біогазу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування* : збірник наукових праць. Київ, 2013. № 185. Ч. 3. С. 180–191.
7. Biogas Plants in Renewable Energy Systems. A Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production / M. Heiker, M. Kraume, A. Mertins, T. Wawer, S. Rosenberger. *Appl. Sci*. 2021. № 11. P. 3361. <https://doi.org/10.3390/app1108336>.
8. Optimal Control of Biogas Plants using Nonlinear Model Predictive Control / D. Gaida, A. Luis Sousa Brito, C. Wolf, T. Bäck, M. Bongards, S. McLoone. Trinity College Dublin : ISSC, 2011. June 23–24.
9. Pavan K. Inguva, I, Krystian Ganko, I, Alexis B. Dubs, and Richard D. Braatz. Dynamics and control of oscillatory bioreactors. arXiv:2306.15756v1 [q-bio.QM]. 27 Jun 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.15756>.

## THE TASK OF INCREASING THE EFFICIENCY OF BIOGAS COMPLEX CONTROL

### Heorhii Kulichenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computerized Control Systems

Sumy State University, 2 Mykola Sumtsova str., Sumy, Ukraine, 40000, [georgv@ukr.net](mailto:georgv@ukr.net)

ORCID: 0000-0002-8501-5636

### Vitalii Mandrychenko

Student at the Department of Computerized Control Systems

Sumy State University, 2 Mykola Sumtsova str., Sumy, Ukraine, 40000, [mandrik945@gmail.com](mailto:mandrik945@gmail.com)

ORCID: 0009-0001-1169-4699

### Roman Vaskin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies

Sumy State University, 2 Mykola Sumtsova str., Sumy, Ukraine, 40000, [r.vaskin@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:r.vaskin@ecolog.sumdu.edu.ua)

ORCID: 0000-0003-4382-0327

### Vadym Lanchynskiy

Postgraduate Student, Trainee Teacher at the Department of Computerized Control Systems

Sumy State University, 2 Mykola Sumtsova str., Sumy, Ukraine, 40000, [v.lanchynskiy@ksu.sumdu.edu.ua](mailto:v.lanchynskiy@ksu.sumdu.edu.ua)

ORCID: 0009-0001-0777-9980

**Purpose.** The aim of the work is to evaluate the results of the simulation of the control channel of the bioreactor occupancy level, which creates conditions for the stability of the methanogenesis process.

**Methodology.** Considering the control channels of the methanogenesis process, at the first stage of research, the process of controlling the reactor occupancy level was simulated, since the stability of this parameter minimizes the fluctuations of other process parameters. Adjustment of the regulator of the linearized control object was carried out using the Sisotool MATLAB Simulink tool, which allows you to adjust the parameters of the transient process and the frequency characteristic of the object with the regulator using the necessary correction links. The modeling process in the MATLAB environment was preceded by options for identifying the parameters of the control object. When carrying out the structural-parametric synthesis of the controller, methods of control theory were used for linear and nonlinear objects.

Simulation mathematical modeling made it possible to evaluate the dynamic characteristics of a control object with a controller.

**Originality.** Based on the tasks of increasing the efficiency of biogas production processes, control channels for this process have been identified. It is declared that increasing the efficiency of the methanogenesis process can be achieved not only by increasing the productivity of the installation, but also by reducing the energy costs of auxiliary equipment.

**Results.** The use of a classic PID controller for monitoring the object revealed non-trivial problems, since the object is subject to non-linear nature of the process and transport delays.

Knowing the peculiarities of the process being monitored, it was not possible to remove the classic PID controller from before physical implementation. An alternative to the above-mentioned regulator is a relay regulator, which will imitate the change in the parameters of the model, ensuring a change in the flow of waste streams in the process to the level of products in the bioreactor space.

In the process of adjusting the relay regulator, it was assumed that the results of adjusting the monitored object must be consistent with the value of the traffic delay. Satisfactory results in the regulated level of the substrate in the bioreactor can only be achieved with proper correlation between the input and output flows of the products.

**Practical value.** Control tasks have been identified that will be solved at subsequent stages of building a biogas complex management system. A controller model has been developed that takes into account the features of the description of the control object, which is implemented on the basis of microprocessor automation tools/

**Key words:** level regulation, modeling, transfer function, relay regulator, stability of the methanogenesis process.

## REFERENCES

1. Cherevko G., Shuhalo V. Biogas production as an effective method of reducing the eutrophication of reservoirs. *The scientific heritage*. 2020. № 45.
2. Polishchuk V., Titova L., Shvorov S., Gunchenko Y. (2019). Ocinka vihotu biogazu ta elektro-energiyi pri monozbrodzhuvanni gnoyu velikoyi roगतoyi hudobi ta pri dodavanni fuzu yak kosubstrat [Evaluation of biogas and electricity output during monofermentation of cattle manure and when adding fusus as a cosubstrate]. *Problemi regionalnoyi energetiki – Problems of regional energy*. № 43, 127.
3. Mezofilni ta termofilni rezhimi [Mesophilic and thermophilic regimes] [Electronic resource]. Mode of access to the resource: <https://zorg-biogas.com/uk/blog/mezofilnye-i-termofilnye-rezimy>.
4. Uzhelovskiy V., Tkachenko S., (2014). Ekstremalne keruvannya temperaturnim rezhimom v umovah avtomatizatsiyi tehnologichnogo procesu virobництва biogazu [Extreme control of the temperature regime in the conditions of automation of the technological process of biogas production]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnictva ta arhitekturi – Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture*. № 3. 50–57.
5. Dinh Pham Van. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*. 2019. Resource access mode: <http://www.eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eeer.2018.334>.
6. Polishchuk V., Lobodko M., Sydorchuk O. (2013). Vpliv rezhimiv metanovogo brodinnya na efektyvnist virobництва biogazu [The influence of methane fermentation regimes on the efficiency of biogas production]. *Naukovij visnik Nacionalnogo universitetu bioresursiv i prirodokoristuvannya: Zb. nauk. Prac – Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Nature Management: Collection of science works*. № 185. Part 3, 180–191. Kyiv.
7. Heiker M., Kraume M, Mertins A., Wawer T., Rosenberger S. Biogas Plants in Renewable Energy Systems. A Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production. *Appl. Sci.* 2021, 11, 3361. <https://doi.org/10.3390/app1108336>.
8. Gaida D., Luis Sousa Brito A., Wolf C., Bäck T., Bongards M., McLoone S. Optimal Control of Biogas Plants using Nonlinear Model Predictive Control. *ISSC 2011*, June 23–24 2011, Trinity College Dublin.
9. Pavan K. Inguva,1, Krystian Ganko,1, Alexis B. Dubs, and Richard D. Braatz. Dynamics and control of oscillatory bioreactors. arXiv:2306.15756v1 [q-bio.QM] 27 Jun 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.15756>.

*Стаття надійшла 04.10.2023*