

УДК 681. 513: 620. 925

## ЕКСТРЕМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ В УМОВАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

*В. О. Ужеловський, к. т. н., доц., С. О. Ткаченко, спец.*

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, метантенк, температурний режим, біогаз, екстремальне регулювання

**Постановка проблеми.** Науково-технічний прогрес у галузі розвитку технічних систем передбачає можливості підвищення енергоефективності цих систем за допомогою вироблення енергії з нетрадиційних джерел. У цьому зв'язку значне місце у виробництві енергії посідають технологічні процеси, засновані на біоконверсії, що являють собою анаеробний мікробіологічний процес, в ході якого здійснюється перетворення різних органічних речовин на енергоносії, яким є біогаз, у першу чергу метан. Це особливо важливо для формування енергетичних потоків, що забезпечують функціонування невеликих підприємств і в першу чергу підприємств, віддалених від техногенних регіонів.

Ефективність цих процесів великою мірою визначається рівнем автоматизації та управління технологічним процесом виробництва біогазу, яка дозволяє оптимізувати процес, підвищити його ефективність і можливість адаптації до реальних виробничих умов [7].

**Аналіз літератури.** У працях сучасних фахівців у галузі управління процесами виробництва енергії з нетрадиційних джерел уже склалося стійке та якісне уявлення про керування виробництвом біогазу з біомаси. Зокрема, Ю. Орлова у своїй дисертації стверджує, що в автоматизації технологічного процесу виробництва біогазу вирішальну роль відіграють інформаційні потоки про якість технологічних переходів, що формують системи зворотних зв'язків замкнених автоматизованих пристроїв управління. Саме зворотні зв'язки в сукупності з елементами системи автоматики великою мірою визначають якість технологічних переходів процесу біоконверсії [7].

Особливості та характеристики біогазових технологій широко розглянуті в публікаціях Б. Баадера [1], В. Сербіна [12], Г. Ратушняка [9; 10; 11]. Проте серед них недостатньо інформації про реалізацію автоматичних систем, які б підтримували необхідні умови. Такі відомості можна знайти в дослідженнях суміжних тем А. Єгорова [2], Ж. Ліоне [5].

Згідно з ними, для реалізації технологічного процесу біоконверсії, забезпечення його якості на етапі безпосереднього зброджування субстрату, необхідно сформувавши, принаймні, шість інформаційних потоків: час зброджування сировини, температурний режим, стабільність температурного режиму, концентрація газу, завантаження реактора (метантенка), якість перемішування. Кожен із потоків має частку впливу на результати зброджування, проте найважливіше для оптимального процесу біоконверсії – підтримання температури. Використовуючи відомі експериментальні залежності кількісного виходу біогазу від підтримуваних температур та застосовуючи екстремальне керування, можна виконати оптимізацію системи автоматичного керування технологічним процесом виробництва біогазу в контурі регулювання температури.

Існує два підходи до реалізації завдання управління. Перший – це побудова алгоритму управління на базі емпіричного алгоритму, наприклад, на базі широківідомих ПІД (пропорційно-інтегро-диференційних)-регуляторів.

Простота таких регуляторів, з одного боку, дозволяє досить швидко розробляти системи управління, а, з іншого, обмежує діапазон об'єктів, якими вони можуть задовільно управляти. Проте дивовижна багатосторонність ПІД-керування забезпечує протягом тривалого часу значимість і популярність даного виду регулювання [8]. До того ж, сучасна обчислювальна техніка та прикладні програми дозволяють уже на стадії дослідження і проектування створювати моделі систем екстремального автоматичного керування (ЕСАК), які завдяки своїм характеристикам дозволяють проводити виробництво з оптимальними параметрами.

**Мета дослідження.** Поліпшення показників кількісного виходу біогазу в умовах зброджування субстрату у реакторі (метантенку) шляхом підтримання оптимального температурного режиму.

**Виклад матеріалу.** В даній роботі створено і досліджено імітаційну модель системи екстремального керування температурним режимом під час виробництва біогазу за допомогою

системи біореакторів (метантенків) у пакеті Matlab. Для створення і дослідження системи екстремального керування з метою досягнення і підтримання оптимального температурного режиму, що забезпечить максимально можливий кількісний вихід біогазу, розроблено функціональну схему моделі системи керування, яка враховує взаємозв'язки елементів та відображає процеси, що відбуваються в контурі регулювання температури (рис. 1).

На основі функціональної схеми моделі ЕСАК створена її структурна схема в пакеті Simulink програми Matlab (рис. 2), яка також відображає контур керування температурним режимом.

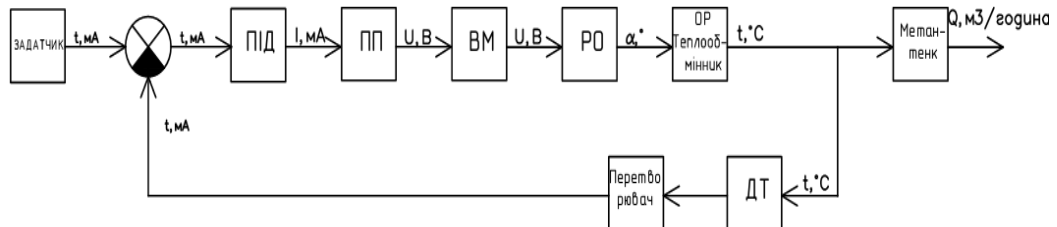


Рис. 1. Функціональна схема моделі САК в контурі температурного режиму роботи метантенка під час збродження субстрату

На рисунку 1: ПІД – ПІД-регулятор; ПП – пусковий пристрій (пускач безконтактний); ВМ – виконавчий механізм; РО – регулювальний орган (клапан, заслінка); ОР – об’єкт регулювання (теплообмінна конструкція); ДТ – датчик температури.

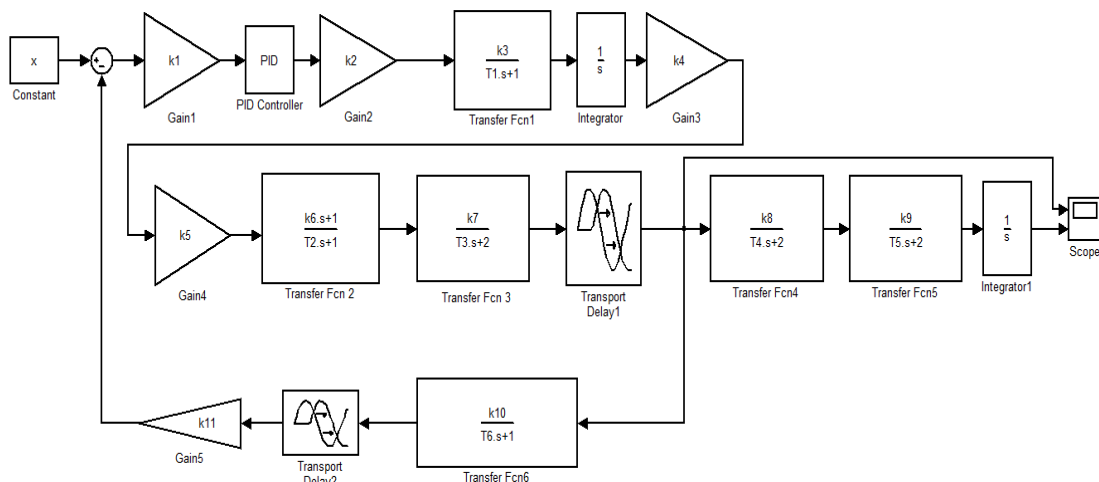


Рис. 2. Структурна схема моделі САК у пакеті Simulink програми Matlab

Контур регулювання температурного режиму включає: блок завдання температури (Constant), ПІД-контролер (PID Controller), пускач безконтактний (Gain2), виконавчий механізм (Transfer fcn1, Integrator1), регулювальний орган (Gain3), об’єкт регулювання (теплообмінник, Gain3, Transfer fcn2, Transfer fcn3, Transport Delay 1), метантенк (Transfer fcn4, Transfer fcn5, Integrator2), датчик температури (термометр опору, Transfer fcn6, Transport Delay 2), нормувальні підсилювачі (Gain1, Gain5).

Для визначення передатних функцій елементів даної ЕСАК та динамічних параметрів використано рекомендації, наведені в літературі [1; 6; 13] та технічні характеристики елементів, наведені в довідниках.

Для досягнення поставленої мети дослідження розроблено імітаційну модель, що в своєму складі має екстремальний регулятор. Досягнення і підтримка оптимального кількісного виходу біогазу залежно від температурного режиму можливе за допомогою застосування екстремального керування, тобто знаходження екстремуму статичної характеристики об’єкта керування (побудованої за експериментальними або статистичними даними), на який діють збурення, що змінюють положення екстремуму в просторі керуючих дій.

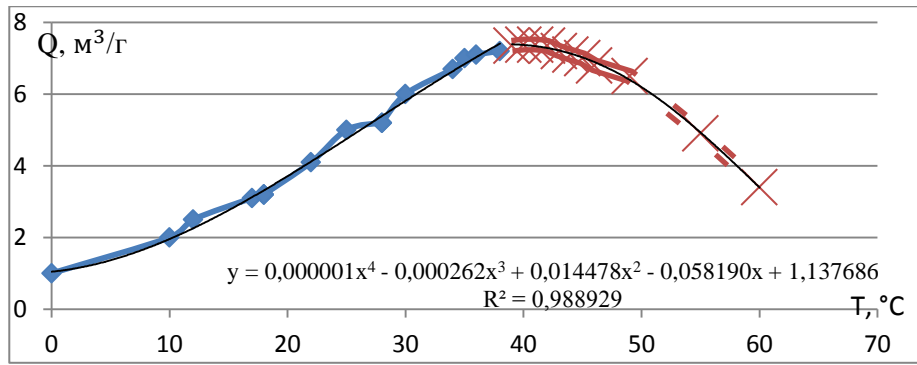


Рис. 3. Лінія тренду кривої залежності виходу біогазу від температури, побудована за експериментальними даними та добудована для використання

Статична характеристика об'єкта керування в загальному вигляді може бути відображена [8; 4]:

$$Q = f(t_1, t_2, \dots, t_m),$$

де  $Q$  – показник екстремуму, тобто кількісного виходу біогазу,  $t_i$  – температура у метантенку.

Указану залежність можна отримати або шляхом аналітичних досліджень поведінки об'єкта, або використовуючи експериментально отримані характеристики, виразивши їх емпіричною залежністю у вигляді багаточлена.

Наведена залежність отримана на основі експериментальних досліджень залежності кількісного виходу біогазу від температури під час зброджування субстрату, наведених у [14] та добудована починаючи з оптимального значення кількісного виходу біогазу за температури 38°C з метою можливості застосування екстремального регулятора.

Із застосуванням засобів програми Microsoft Excel побудовано лінію тренду залежності  $Q = f(t_1, t_2, \dots, t_m)$  та знайдено коефіцієнти апроксимувальної функції, тобто  $y = f(x)$  (рис. 3). Апроксимувальна функція побудована з кореляційним коефіцієнтом  $R^2 = 0,988$ , тому лінія тренду залежності відповідає початковій майже повністю з незначною похибкою, якою можна знехтувати.

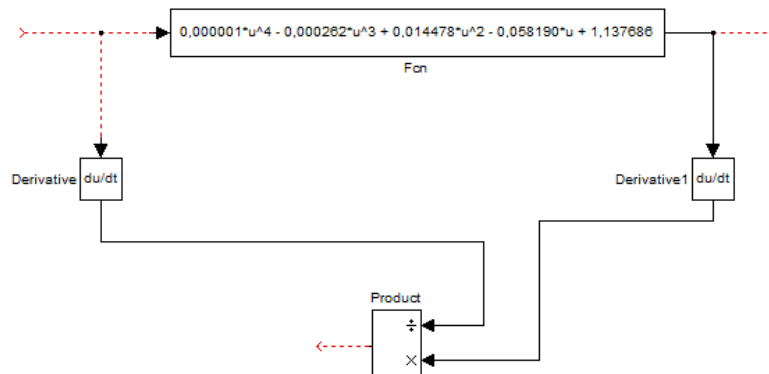


Рис. 4. Модель вузла екстремального регулятора, виконана в пакеті Simulink програми Matlab

Температура в біореакторі (метантенку) регулюється за сигналом датчика температури з наступним впливом на виконавчий механізм подачі теплоносія до конструкції нагрівального елемента. При цьому в екстремальному регуляторі застосовується метод виміру похідної. Екстремальний регулятор за похідною  $\frac{dQ}{dT}$ , що змінює свій знак за час проходження через екстремум, визначає напрямок руху до нього [8]. При рівності похідної нулю досягається екстремум.

Знаходження похідної  $\frac{dQ}{dT}$  здійснюється за допомогою ділення блоком Product похідної  $\frac{dQ}{dt}$  на похідну  $\frac{dT}{dt}$  (блоки Derivative, Derivative1).

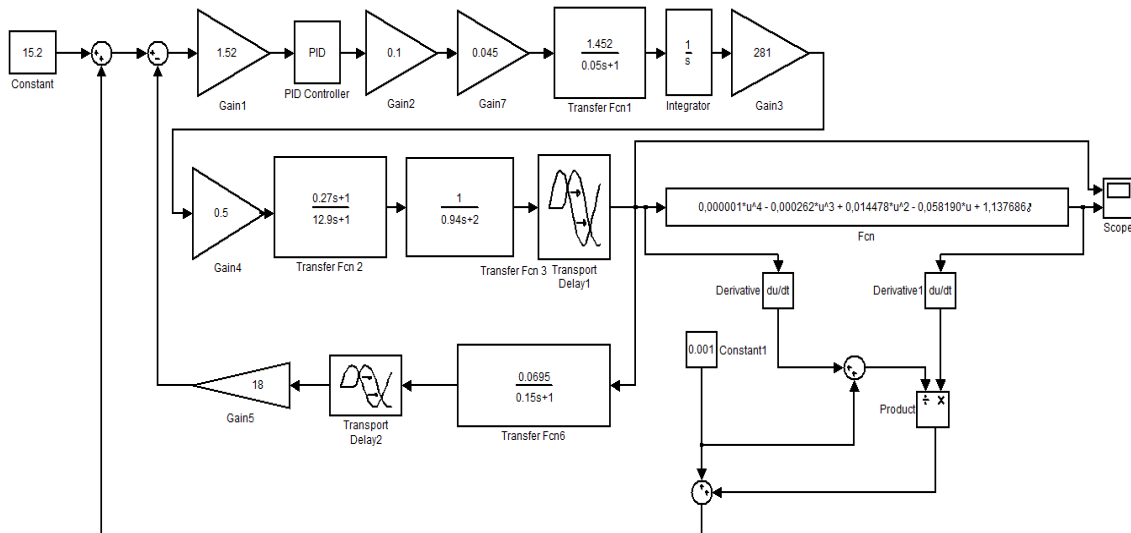


Рис. 5. Структурна схема ЕСАК температурою із включенням вузла екстремального керування у Matlab

Результат розрахунку сумується із завданням похибки (блок Constant1) і подається в контур регулювання температури. Таким чином, виконавчий механізм коректує подачу теплоносія, при цьому підтримуючи оптимальним кількісний вихід біогазу.

Налаштування ПІД-регулятора в даному дослідженні відбувалося за допомогою функції PID Tuner, доступною у версії Matlab R2010b. Налаштування відбувається в автоматичному режимі відповідно до заданих параметрів елементів контуру регулювання (рис. 6, 7).

У підсумку був отриманий аперіодичний перехідний процес з невеликим перерегулюванням та часом регулювання  $\approx 100$  с, наведений на рисунку 9.

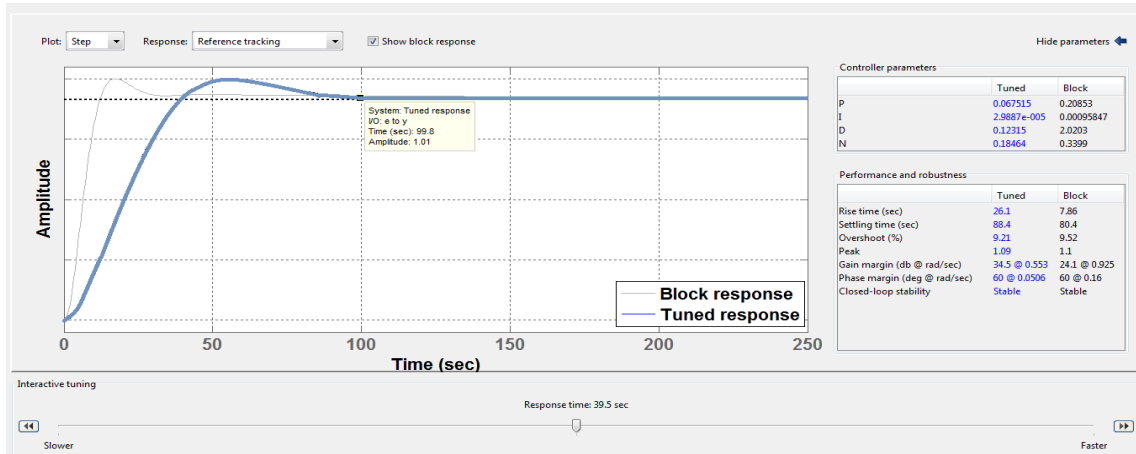


Рис. 6. Налаштування часу регулювання та інших параметрів у вікні PID Tuner

Із графіка перехідної характеристики видно, що модель екстремального регулятора дозволяє підтримувати кількісний вихід біогазу оптимальним відповідно до завдання, яке можна змінювати відповідно до обраного режиму біоконверсії (термофільного 53 – 55°C або мезофільного 35 – 38°C).

Для розглянутого випадку знайдені автоматично програмою коефіцієнти налагодження ПІД-регулятора становлять  $k_p = 0,04626$ ;  $k_i = 1,5775$ ;  $k_d = 0,4977$ .

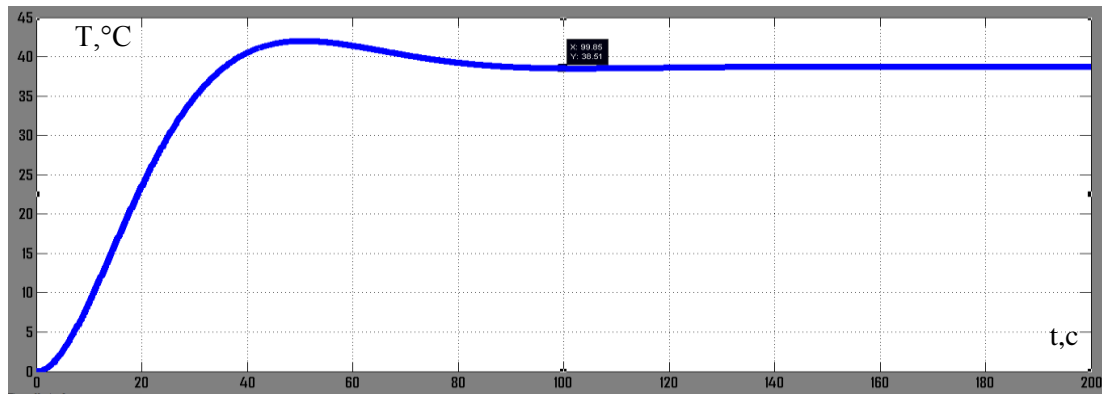


Рис. 7. Осцилограма зміни температури у біореакторі (метантенку) у разі керування за допомогою екстремального регулятора у мезофільному режимі

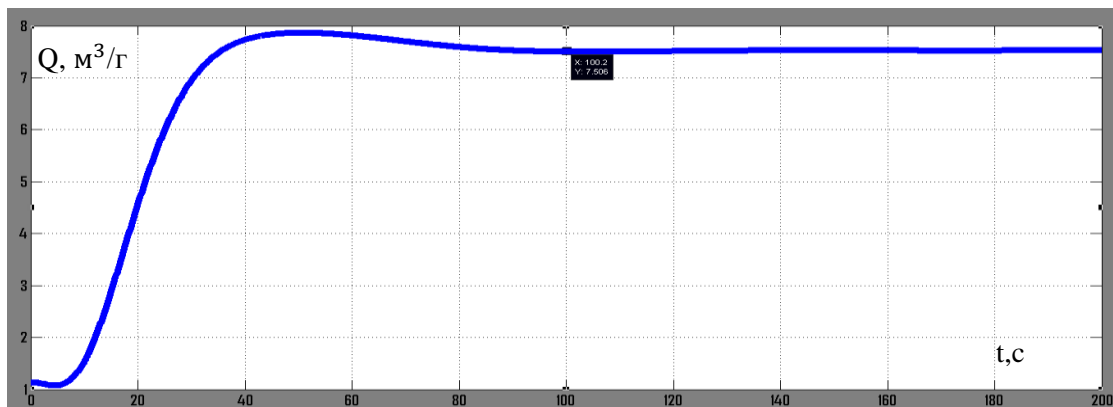


Рис. 8. Перехідна характеристика САК у разі завдання мезофільного температурного режиму 38°C (15,2 мА)

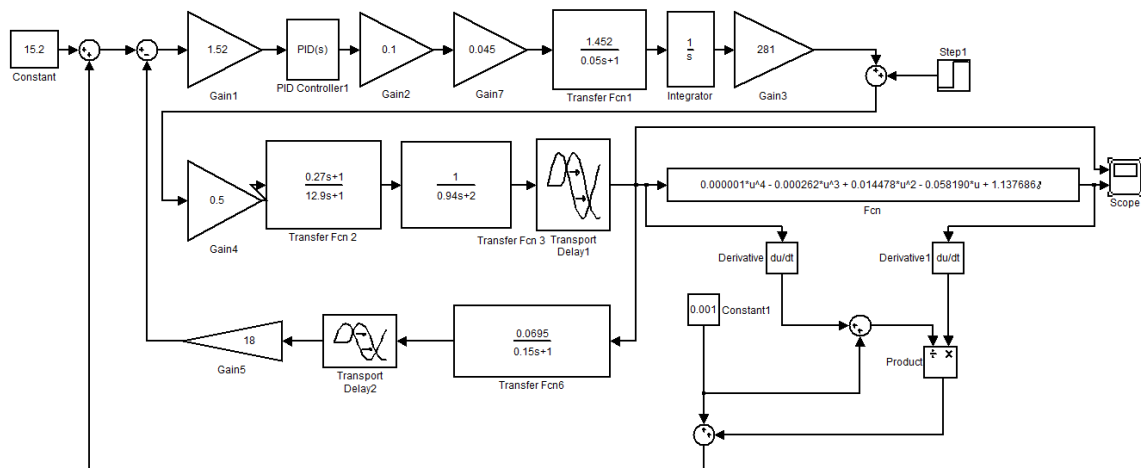


Рис. 9. Структурна схема ЕСАК температурою із включенням вузла зовнішніх збурень у Matlab

Для дослідження й оцінки поведінки ЕСАК у контур температурного режиму були додані елементи (суматор Sum та блоку ступінчастого сигналу Step1), що моделюють вплив зовнішніх збурень на об'єкт керування (рис. 10)

У результаті екстремального ПД-регулювання за впливу ступінчастих збурень у контурі регулювання температури за показниками перехідного процесу можна визначити, що система керується відповідно до заданих параметрів та залежностей (рис. 11).

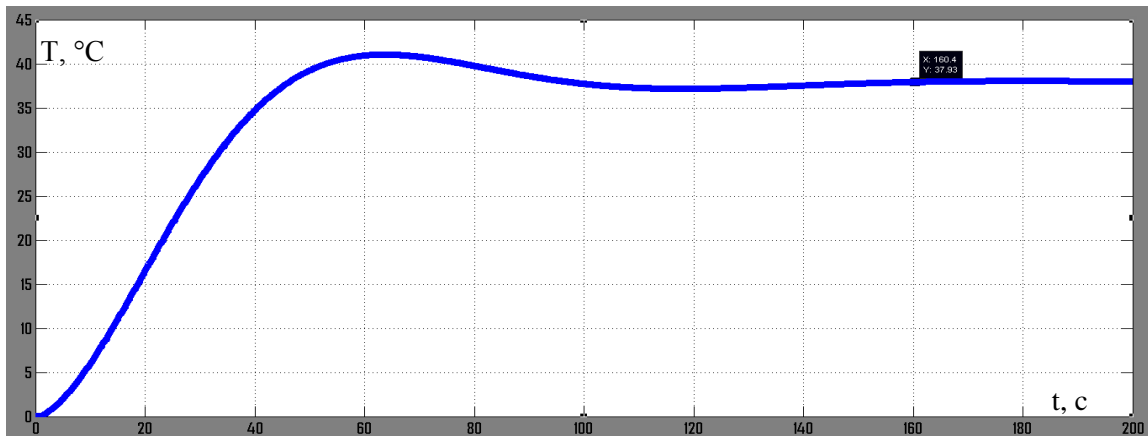


Рис. 10. Осцилограма зміни температури у біореакторі (метантенку) у разі керування за допомогою екстремального регулятора у мезофільному режимі та за впливу зовнішніх збурень

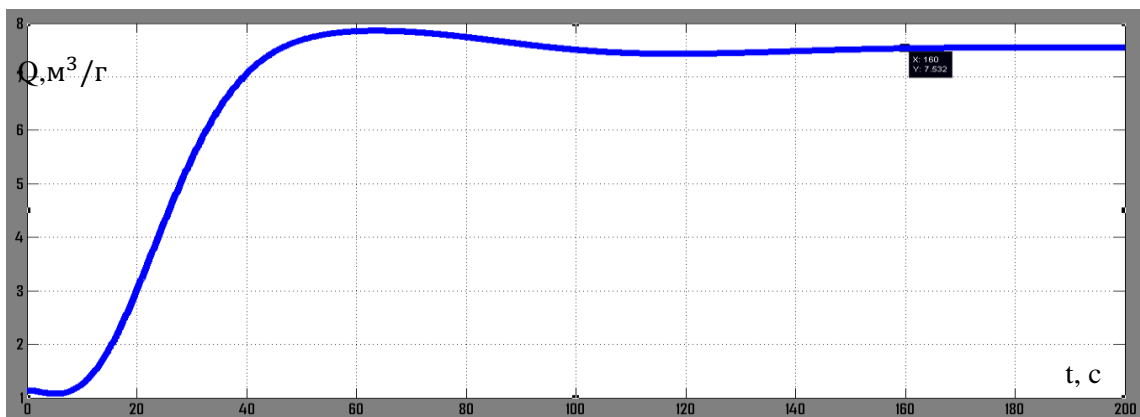


Рис. 11. Перехідна характеристика ЕСАК у разі завдання мезофільного температурного режиму 38°C (15,2 мА) та за впливу зовнішніх збурень

**Висновки.** 1. Розроблена імітаційна модель системи екстремального керування температурного режиму збродження субстрату у метантенку працездатна і забезпечує підвищення надійності дотримання технологічного процесу.

2. Отримана імітаційна модель може бути рекомендована на стадії проектування для попереднього знаходження параметрів налагодження екстремального регулятора з метою отримання бажаного перехідного процесу із заданою точністю.

3. Застосування системи екстремального регулювання виходу біогазу, незалежно від обраного способу його отримання, може підвищити продуктивність метантенка на 10 %.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Баадер Б.** Биогаз: теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; [пер. с нем. М. И. Серебряного]. — М. : Колос, 1982. — 148 с.
2. **Егоров А. И.** Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. — М. : Наука, 1978. — 463 с.
3. **Калмаков А. А.** Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции: учеб. для вузов / А. А. Калмаков, Ю. Я. Кувшинов, С. С. Романова, С. А. Щелкунов // Под ред. В. Н. Богословского. — М. : Стройиздат, 1986. — 479 с.
4. **Клюев А. С.** Проектирование систем автоматизации технологических процессов. — М. : Энергоатомиздат, 1997. — 464 с.
5. **Лионе Ж.-Л.** Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными. — М. : Мир, 1972. — 488 с.
6. **Мясковский И. Г.** Тепловой контроль и автоматизация тепловых процессов [Текст] : учеб. для техникумов / ред. Е. А. Ларина; рец. И.П. Баумштейн.; 2-е изд., перераб. и доп. — М. :

Стройиздат, 1990. — 255 с.

7. **Орлова Ю. А.** Автоматизация и управление биоконверсией с целью повышения качества технологического процесса когенерации: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. — М., 2012. — 21с.

8. **Попович М. Г., Ковальчук О. В.** Теорія автоматичного керування : підруч. — К. : Либідь, 1997. — 544 с.

9. **Ратушняк Г. С.** Энергозбереження в системах біоконверсії / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула. — Вінниця : Універсум-Вінниця, 2006. — 83 с.

10. **Ратушняк Г. С.** Тепловтрати в біогазових установках при різних температурних режимах анаеробного бродіння / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ВПІ. — Вінниця : ВПІ, 2008. — № 4.

11. **Ратушняк Г. С.** Моделювання теплообмінних процесів в біогазових установках / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук.-техн. зб. — Вип. 12. — К. : КНУБА, 2008. — 128 с.

12. **Сербін В. А.** Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії в системах ТГП / В. А. Сербін — Макіївка : ДонДАБА, 2003. — 153 с.

13. **Танатар А. И.** Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства. — К. : Техника, 1975. — 232 с.

14. Электронный научный журнал «Вестник Дона» : (ст. «Применение электротехнологий при метановом сбраживании отходов») [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/896>

## SUMMARY

**Problem statement.** The efficiency of bioconversion processes is largely determined by the level of automation and process control biogas, which allows to optimize the process, enhance its efficiency and the ability to adapt to the real operating conditions.

**Analyzing of the resent research.** In studies of contemporary experts in the field of process management energy production from unconventional sources has had a steady and good understanding of the management of biogas production from biomass. In particular, are interesting publications of Yulia Orlova, B.Baader, V. Serbin, H.Ratushnyak, J. Lione. According to them, for the implementation of the bioconversion process, ensuring its quality at the stage of direct fermentation substrate, it is necessary to form at least six data flows: raw fermentation time, temperature, stability, temperature, gas concentration, load reactor (digesters), the quality of mixing. Using known experimental dependence quantitative yield of biogas supported temperatures, and using extreme control, you can optimize the system for automatic process control biogas in the loop temperature control. There are two approaches to the task of governance

**Research objective.** Improving quantitative yield of biogas by fermentation substrate in the reactor (digesters) by maintaining the optimum temperature.

**Conclusions.** 1. Developed a simulation model of control extreme temperature conditions in the fermentation substrate digesters buildable and provides increased reliability compliance implementation process.

2. Resulting simulation model can be recommended, at the design stage, prior to setting up the parameters of the extreme regulator for the desired transition process with a given accuracy.

3. Application of extreme regulation, can improve the performance of digesters by 10 %.

## REFERENDS

1. Baader B. Byogaz: teoriya y praktyka / B. Baader, E. Done, M. Brennderfer; [per. s nem. M. Y. Serebryanogo]. — М. : Kolos, 1982. — 148 s.

2. Egorov A. Y. Optymalnoe upravlenye teplovymy y dyffuzyonnyy processamy. — М. : Nauka, 1978. — 463 s.

3. Kalmakov A. A. Avtomatyka y avtomatyzacyya system teplogazosnabzhenyya y ventylyacyy: ucheb. dlya vuzov / A. A. Kalmakov, Yu. Ya. Kuvshynov, S. S. Romanova, S. A. Shhelkunov // Pod red. V. N. Bogoslovskogo. — М. : Stroyzdat, 1986. — 479 s.

4. Klyuev A. S. Proektyrovanye system avtomatyzacyya tehnologicheskyyh processov. — М. : Energoatomyzdat, 1997. — 464 s.

5. Lyone Zh.-L. Optymalnoe upravlenye systemamy, opysyvaemymy uravnenyyamy s chastnymy proyzvodnymy. – M. : Myr, 1972. – 488 s.
6. Myaskovskij Y. G. Teplovoj kontrol y avtomatyzacziya teplovyx proczessov [Tekst] : ucheb. dlya tehnykumov / red. E. A. Laryna; recz. Y. P. Baumshtejn.; 2-e yzd., pererab. y dop. – M. : Strojizdat, 1990. – 255 s.
7. Orlova Yu. A. Avtomatyzacziya y upravlenye byokonversyej s czelyu povyshenyya kachestva tehnologicheskogo proczessa kogeneracziy: avtoref. dys. na soysk. uchen. step. kand. texn. nauk. – M., 2012. – 21s.
8. Popovych M. G., Kovalchuk O. V. Teoriya avtomatichnogo keruvannya: pidruch. – K. : Lybid, 1997. – 544 s.
9. Ratushnyak G. S. Energozberezhennya v systemax biokonversii / G. S. Ratushnyak, V. V. Dzhezhdzula. – Vinnyczya : Universum-Vinnyczya, 2006. – 83 s.
10. Ratushnyak G. S. Teplovtraty v biogazovyx ustanovkax pry riznyx temperaturnyx rezhymax anaerobnogo brodinnya / G. S. Ratushnyak, K. V. Anoxina // Visnyk VPI. – V. : VPI, 2008. – № 4.
11. Ratushnyak G. S. Modelyuvannya teploobminnyx proczesiv v biogazovyx ustanovkax / G. S. Ratushnyak, K. V. Anoxina // Ventylyacziya, osvitlennya ta teplogazopostachannya : nauk.-texn. zb. – Vyp. 12. – K. : KNUBA, 2008. – 128 s.
12. Serbin V. A. Netradycijni ta ponovlyuvani dzherela energii v systemah TGP / V. A. Serbin–Makiivka : DonDABA, 2003. – 153 s.
13. Tanatar A. Y. Elementy promyshlennoj avtomatyky y yx dynamicheskye svojstva. – K. : Tehnyka, 1975. – 232 s.
14. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Vestnyk Dona» : (st. «Prymenenye elektrotexnologij pry metanovom sbrazhyvanyy othodov») [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupa: <http://yvdon.ru/magazyne/archyve/n3y2012/896>



УДК 681. 513: 620. 925

**Екстремальне керування температурним режимом в умовах автоматизації технологічного процесу виробництва біогазу / В. О. Ужеловський, С. О. Ткаченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – № 3. – С. 50 – 57. – рис. 11. – Бібліогр.: (14 назв.).**

Наведено результати дослідження розробленої з використанням програмно-технічних можливостей прикладного програмного комплексу Matlab-Simulink моделі екстремального керування температурним режимом в умовах виробництва біогазу у метантенках із забезпеченням оптимального кількісного виходу біогазу. Наведено результати моделювання.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, метантенк, температурний режим, біогаз, екстремальне регулювання.

**Экстремальное регулирование температурного режима при автоматизации технологического процесса производства биогаза в метантенках / В. А. Ужеловский, С. О. Ткаченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – № 3. – С. 50 – 57. – рис. 11. – Библиогр.: (14 назв.).**

Приведены результаты исследования разработанной с использованием програмно-технических возможностей прикладного программного комплекса Matlab-Simulink модели экстремального регулирования температурным режимом при производстве биогаза в метантенках с обеспечением оптимального количественного выхода биогаза. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, метантенк, температурный режим, биогаз, экстремальное регулирование.

**Extreme temperature regulation in the automation process in the production of biogas methane tanks / V. Uzhelovsky, S. Tkachenko // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2014. – № 3. – P. 50 – 57. – pic. 11. – Bibliogr.: (14 names).**

Presents the results of the research model of extreme temperature regulation in the production of biogas digesters in ensuring optimal quantitative yield of biogas using, which was developed with program-technical complex software application possibilities Matlab-Simulink. The results of simulation.

**Key words:** imitation modeling methane tank temperature regime, biogas, extreme regulation.