

АНОТАЦІЯ

Забчук В. В. Математичне та програмне забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2024.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота присвячена розв'язуванню актуального науково-технічного завдання забезпечення допустимих значень кислотності багатокомпонентного субстрату за рахунок розробки математичного та програмного забезпечення для моделювання динаміки кислотності субстрату у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних.

Виробництво біогазу у спосіб переробки органічних відходів життєдіяльності людини та відходів тваринництва і агропромислового комплексу є одним із пріоритетних напрямків розвитку альтернативної (зеленої) енергетики. Разом з тим, підвищення ефективності функціонування цього виробництва вимагає розробки нових підходів управління процесами в біогазових установках на основі застосування інформаційних технологій та методів математичного моделювання. Проблематика досліджень, наведених у праці, стосується застосування методів математичного моделювання з метою відображення взаємозв'язку між основною характеристикою процесу та чинниками, які на неї впливають, так і динаміки основної характеристики процесу, яка визначається кислотністю субстрату у біореакторі.

Для побудови математичних моделей обох видів запропоновано використати методи параметричної та структурної ідентифікації моделей статичних об'єктів та дискретних моделей динаміки об'єктів на основі аналізу інтервальних даних. Перший тип моделей необхідний для опису взаємозв'язків між характеристикою процесу та чинниками, які на неї впливають, а другий – для відображення динаміки характеристики за допомогою різницевих та диференціальних рівнянь. Такі математичні моделі, хоча і характеризуються «гарантованими» прогностичними властивостями, проте вимагають застосування для їх ідентифікації складних оптимізаційних процедур з багатоекстремальними функціями мети та часто ці функції представлені в дискретному вигляді. Тому для розв'язування цих задач запропоновано використати цілісний універсальний підхід (однаковий для обох типів математичних моделей), який ґрунтується на метаевристичних алгоритмах оптимізації, які, своєю чергою, використовують механізми самоорганізації та самоадаптації в процесі пошуку оптимального чи квазіоптимального розв'язку. Серед метаевристичних алгоритмів обрано алгоритм, який симулює ройовий алгоритм штучної бджолоїної колонії.

Тому у дисертаційній роботі запропоновано математичне та програмне забезпечення для моделювання динаміки кислотності субстрату у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних з метою забезпечення допустимих значень кислотності багатокомпонентного субстрату.

У першому розділі розглядаються підходи до моделювання процесів у біогазових установках з точки зору функціонування енергетичної системи, а також з точки зору їх оптимізації. Відомі моделі, які описують процес виробництва біогазу, демонструють

різний рівень деталізації. Моделювання процесів у біогазових установках може надати динамічну інформацію про процес анаеробного зброджування, наприклад, для прогнозування виходу біогазу або оптимізації процесу анаеробного зброджування.

Обґрунтовано використання сучасних інформаційних технологій як ефективних інструментів управління процесами у біогазових установках. Розглядаються сильні та слабкі сторони інтеграції детальних і глибоко досліджених моделей анаеробного процесу. Запропоновано використання математичного моделювання для відображення зв'язку між головною характеристикою процесу та факторами, що на неї впливають, а також динамікою цієї характеристики, яка залежить від кислотності субстрату у біореакторі. Для створення таких математичних моделей запропоновано та обґрунтовано використання методів параметричної ідентифікації моделей статичних об'єктів та дискретних моделей динаміки об'єктів на основі аналізу інтервальних даних.

У завершальній частині розділу здійснено постановку задачі дослідження та деталізовано основні завдання.

У другому розділі дисертаційного дослідження розроблено математичне забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках, розглянуто ідентифікацію математичних моделей для відображення функціонування біогазових установок при виробництві біогазу.

Для відображення взаємозв'язку між основною характеристикою процесу (показником кислотності субстрату) та чинниками, які на неї впливають, запропоновано використати нелінійне алгебричне рівняння, а для відображення динаміки основної характеристики процесу, яка визначається кислотністю субстрату у біореакторі, – запропоновано використати різницеве рівняння. Також це різницеве рівняння перетворене до диференціального рівняння.

Для розробки обох математичних моделей запропоновано та обґрунтовано використати методи аналізу інтервальних даних та метод параметричної ідентифікації цих моделей. Такі математичні моделі хоча і характеризуються «гарантованими» прогностичними властивостями, проте вимагають застосування для їх ідентифікації складних оптимізаційних процедур з багатоекстремальними функціями мети та часто ці функції представлені в дискретному вигляді. Тому, для розв'язування цих задач запропоновано використати цілісний універсальний підхід (однаковий для обох типів математичних моделей), який ґрунтується на метаевристичних алгоритмах оптимізації, які, своєю чергою, використовують механізми самоорганізації та самоадаптації в процесі пошуку оптимального чи квазіоптимального розв'язку. Серед метаевристичних алгоритмів запропоновано та обґрунтовано алгоритм, який симулює ройовий алгоритм штучної бджолиної колонії.

Для пошуку структури моделі динаміки кислотності субстрату у біореакторі запропоновано двоетапний алгоритм. Спочатку, за допомогою більш простішої задачі ідентифікації моделі взаємозв'язку між основною характеристикою процесу та чинниками, які на неї впливають, отримано нелінійне алгебричне рівняння. Потім, на основі його аналізу, обрано необхідні структурні елементи для моделі динаміки кислотності субстрату у біореакторі.

Також для інтерпретації фізичних властивостей динаміки кислотності субстрату у біореакторі, запропоновано та обґрунтовано, на підставі отриманого різницевого рівняння, здійснити перехід до диференціального, в якому коефіцієнти мають фізичну інтерпретацію, на відміну від різницевого рівняння. В основі запропонованого методу

використано формули розкладу значень шуканої функції у вузлах різницевої сітки в ряд Тейлора в околі базового вузла, а також різницевого представлення похідних в цьому ж околі. Також при цьому переході враховано представлення управляючих функцій.

У третьому розділі дисертаційної роботи розроблено відкриту, сервісно-орієнтовану архітектуру програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках, яка, на відміну від існуючих, інтегрує програмні компоненти: інтерпретації інтервальних дискретних моделей; ідентифікації цих моделей; розв'язування диференціальних рівнянь, що у сукупності уможлиблює розробку програмних систем та комп'ютерних середовищ для управління процесами в біогазових установках.

Наведено основні аспекти реалізації програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках, особливістю якого є програмна інтерпретація інтервальних дискретних моделей та відкрита сервісно-орієнтована архітектура, що забезпечує їх інтеграцію в існуючі системи управління біогазовими установками та дозволяє в реальному часі управляти біохімічними процесами і тим самим підвищити ефективність функціонування біогазових установок. Приведено ряд діаграм, які ілюструють особливості програмної реалізації середовища для моделювання процесів у біогазових установках. У кінці розділу описано особливості реалізації підсистеми зберігання та аналізу інформації.

У четвертому розділі дисертаційної роботи наведено вигляд графічного інтерфейсу. Описано особливості програмної реалізації системи, зокрема з використанням парадигми об'єктно-орієнтованого програмування на базі відкритої сервісно-орієнтованої архітектури з використанням технології Spring Framework на мові програмування Java, а також інтерпретатора Python. В якості Python інтерпретатора було обрано Jython, а в якості СУБД використовується MySQL.

Описано процеси інтеграційного тестування та тестування продуктивності середовища для моделювання процесів у біогазових установках. Здійснено опис тестування продуктивності системи та, відповідно, підтверджено ефективність використання середовища при моделюванні процесів у біогазових установках. Показано можливість подальшого розвитку проекту та його імплементації в діючі біогазові установки.

У кінці розділу здійснено опис графічного інтерфейсу програмного середовища для моделювання процесів у біогазових установках. Описано функціонування основних підсистем з точки зору взаємодії між собою, різними типами користувачів, а також можливість зовнішньої інтеграції в діючі біогазові установки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні програмного середовища для моделювання процесів у біогазових установках.

Ключові слова: програмне середовище, архітектура програмного забезпечення, математичне моделювання, методи аналізу інтервальних даних, інтервальні моделі, параметрична ідентифікація, алгоритм штучної бджолоїної колонії, біоенергетика, біогазова установка, анаеробне зброджування.

ANNOTATION

Zabchuk V. V. Methods and software tools for modeling processes in biogas plants based on interval data analysis. – Scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 121 "Software Engineering" - West Ukrainian National University, Ternopil, 2024.

The research was carried out at the Department of Computer Science of the West

Ukrainian National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The thesis is devoted to solving of the actual scientific and technical task of ensuring the tolerance values of acidity in a multicomponent substrate by developing mathematical tools and software for modeling the dynamics of substrate acidity in biogas plants based on the analysis of interval data.

Biogas production by way of processing of organic waste of human life and animal husbandry and agro-industrial complex is one of the priority areas of development of alternative (green) energy. At the same time, increasing the efficiency of the operation of this production requires the development of new approaches to process management in biogas plants based on the application of information technologies and mathematical modeling methods. The problems of the research presented in the thesis, relate to the application of mathematical modeling methods in order to reflect the relationship between the main characteristic of the process and the factors that affect it, as well as the dynamics of the main characteristic of the process, which is determined by the acidity of the substrate in the bioreactor.

To build mathematical models of both types, it is proposed to use the methods of parametric and structural identification of models of static objects and discrete models of dynamic objects based on the interval data analysis. The first type of models is needed to describe the relationships between the characteristics of the process and the factors affecting it, and the second is to show the dynamics of the characteristics using difference and differential equations. Although such mathematical models are characterized by "guaranteed" prognostic properties, they require the use of complex optimization procedures with multi-extremal objective functions for their identification, and often these functions are presented in a discrete form. Therefore, to solve these problems, it is proposed to use an universal approach (the same for both types of mathematical models), which is based on metaheuristic optimization algorithms, which, in turn, use self-organization and self-adaptation mechanisms in the process of searching for an optimal or quasi-optimal solution. Among the metaheuristic algorithms, an algorithm that simulates the swarm algorithm of an artificial bee colony was chosen.

Therefore, the mathematical tools and software for modeling the dynamics of the acidity of the substrate in biogas plants based on the analysis of interval data in order to ensure the acceptable values of the acidity of the multicomponent substrate are proposed in this thesis.

In the first chapter, approaches to modeling are considered from the point of view of the energy system functioning, as well as from the point of view the processes optimization in biogas plants. Known models that describe the biogas production process show different levels of detail. Modeling processes in biogas plants can provide dynamic information about the anaerobic digestion process, for example, to predict biogas output or optimize the anaerobic digestion process.

The use of modern information technologies as effective process management tools in biogas plants is substantiated. The strengths and weaknesses of the integration of detailed and deeply researched models of the anaerobic process are considered, the use of mathematical modeling is proposed to describe the relationship between the main characteristic of the process and the factors affecting it, as well as the dynamics of this characteristic, which depends on the acidity of the substrate in the bioreactor. To create such mathematical models, the use of methods of parametric identification of models of static objects and discrete models of dynamic objects based on the analysis of interval data is proposed and substantiated.

In the final part of the chapter, the research problem is stated and the main tasks are detailed.

In the second chapter of the thesis the mathematical tools for modeling processes in biogas plants was developed, the identification of mathematical models for displaying the functioning of biogas plants during biogas production was considered.

To display the relationship between the main characteristic of the process (substrate acidity indicator) and the factors affecting it, it is proposed to use a nonlinear algebraic equation, and to display the dynamics of the main characteristic of the process, which is determined by the acidity of the substrate in the bioreactor, it is proposed to use a difference equation. Also, this difference equation is transformed into a differential equation.

For the development of both mathematical models, it is proposed and substantiated to use the methods of interval data analysis and the method of parametric identification of these models. Although such mathematical models are characterized by "guaranteed" prognostic properties, they require the use of complex optimization procedures with multi-extremal objective functions for their identification, and often these functions are presented in a discrete form. Therefore, to solve these problems, it is proposed to use an universal approach (the same for both types of mathematical models), which is based on metaheuristic optimization algorithms, which, in turn, use self-organization and self-adaptation mechanisms in the process of finding an optimal or quasi-optimal solution. Among metaheuristic algorithms, an algorithm that simulates the swarm algorithm of an artificial bee colony is proposed and substantiated.

A two-stage algorithm is proposed to find the structure of the substrate acidity dynamics model in the bioreactor. First, with the help of a simpler problem of identifying the model of the relationship between the main characteristic of the process and the factors affecting it, a nonlinear algebraic equation was obtained. Then, based on its analysis, the necessary structural elements were selected for the model of the dynamics of substrate acidity in the bioreactor.

Also, in order to interpret the physical properties of the dynamics of the substrate acidity in the bioreactor, it is proposed and substantiated on the basis of the obtained difference equation to make a transition to the differential equation, in which the coefficients have a physical interpretation, unlike the difference equation. The proposed method is based on formulas for the distribution of the values of the searching function at the nodes of the difference grid into a Taylor series in the neighborhood of the base node, as well as the difference representation of the derivatives in the same neighborhood. Also, during this transition, the presentation of control functions is taken into account.

In the third chapter of the thesis an open service-oriented software architecture for modeling processes in biogas plants is developed, which, unlike the existing ones, integrates software components: interpretation of interval discrete models; identification of these models; solving differential equations, which collectively enables the development of software systems and computer environments for managing the processes in biogas plants.

The main aspects of implementation the software for modeling processes in biogas plants are presented, the feature of which is the software interpretation of interval discrete models and an open service-oriented architecture, which ensures their integration into existing control systems of biogas plants and allows to control biochemical processes in real time and thereby increase efficiency of functioning of biogas plants. A number of diagrams illustrating the features of the software implementation of the environment for modeling processes in biogas plants are presented. At the end of the chapter, the features of the implementation of the information storage and analysis subsystem are described.

The fourth chapter of the dissertation gives an user interface. The features of the software implementation of the system are described, in particular, using the paradigm of

object-oriented programming based on an open service-oriented architecture using the Spring Framework technology in the Java programming language, as well as the Python interpreter. Jython was chosen as the Python interpreter, and MySQL was used as the DBMS.

The processes of integration testing and environmental performance testing for modeling processes in biogas plants are described. The system performance testing was described and, accordingly, the efficiency of the environment using in the simulation of processes in biogas plants was confirmed. The possibility of further development of the project and its implementation in operating biogas plants is shown.

At the end of the chapter, the graphical interface of the software environment for modeling processes in biogas plants was tested. The functioning of the main subsystems is described from the point of view of interaction between themselves, different types of users, as well as the possibility of external integration into operating biogas plants.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a software environment for modeling processes in biogas plants.

Keywords: software environment, software architecture, mathematical modeling, interval data analysis methods, interval models, parametric identification, artificial bee colony algorithm, bioenergy, biogas plant, anaerobic digestion.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Дивак М., Забчук В. Моделювання характеристик процесів у біогазових установках на основі аналізу інтервальних даних. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* 2024. Том 331. № 1. С.180-190. (1,1 д.а. / 0,8 д.а.; особистий внесок: здобувачем запропоновано та обґрунтовано двоетапний метод ідентифікації математичної моделі динаміки показника кислотності субстрату у біореакторі на основі аналізу інтервальних даних).

DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-28>

2. Дивак Т., Забчук В. Огляд і аналіз методів та засобів моделювання процесів у біогазових установках. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка".* 2024. №1 (38). С.57-70. (1,3 д.а. / 0,5 д.а.; особистий внесок: здобувачем здійснено порівняльний аналіз методів та засобів моделювання процесів у біогазових установках, виділено їх основні переваги та недоліки).

DOI: <https://doi.org/10.31474/1996-1588-2024-1-38-57-70>

3. Манжула В. І., Забчук В.В. Архітектура програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету.* 2024. Вип. 1. С. 1-10. (0,8 д.а. / 0,3 д.а.; особистий внесок: здобувачем реалізовано архітектуру програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках).

DOI: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-1-19-28>.

4. Manzhula V., Dyvak M. and Zabchuk V. The Improved Method for Identifying Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems. *International Journal of Computing.* 2024. 23 (1). P. 19-25. (0,7 д.а. / 0,2 д.а.; особистий внесок: здобувачем отримано математичну модель динаміки показника кислотності субстрату у біореакторі у вигляді диференціального рівняння).

DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.23.1.3431>. (Scopus, Q4)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Забчук В. В. Аналіз методів побудови системи доповненої реальності для тестування практичних навиків. *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2019 (м. Тернопіль, 29 листопада 2019 р.). Тернопіль: ТНЕУ, 2019. С. 9. (0,1 д.а.)

6. Красносельська А.О., Веселов О.В., Забчук В.В. Інтелектуалізована система для оптимізації процесу формування документації програмного забезпечення *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2023. (Тернопіль, 30 листоп. 2023 р.). Тернопіль: ЗУНУ, 2023. С. 100-101. (0,1 д.а. / 0,03 д.а.; особистий внесок: здобувачем запропоновано компонентну структуру інтелектуалізованої системи для створення документації програмного забезпечення).

7. Dyvak M., Pukas A., Manzhula V., Kasatkina N., Komar M. and Zabchuk V. The Task of Parametric Identification the Interval Models with Nonlinear Parameters. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. (Spisska Kapitula, Slovakia, 26-28 Sept. 2022). P. 106-111. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: здобувачем вдосконалено метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей з нелінійними параметрами).

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913166> (Scopus).

8. Pukas A., Simak A., Goncharuk-Cholach T., Konoplitska O., Zabchuk V. Intelligent Analyzing Module in the Academic Staff Performance Appraisal System. *CEUR-WS*. 2023. Vol. 3624. P. 423-429. (0,6 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: здобувачем запропоновано алгоритм інтеграції програмних модулів для реалізації методів інтелектуального аналізу).

https://ceur-ws.org/Vol-3624/Short_2.pdf (Scopus).

9. Pukas A., Smal V., Zabchuk V. Software based on blockchain technology for consolidation the medical data about the patients examination. *CEUR-WS*. 2018. Vol. 2300. P. 170-174. (0,4 д.а. / 0,1 д.а.; особистий внесок: здобувачем описано процедуру використання технології блокчейн для консолідації даних).

<https://ceur-ws.org/Vol-2300/Paper41.pdf> (Scopus).

