

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Гураль Ірина Володимирівна**

УДК 66.011, 519.855

ДИСЕРТАЦІЯ

**Інтервальне моделювання процесів у біогазових установках в умовах  
структурної та параметричної невизначеності**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи  
05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ І.В. Гураль

Науковий керівник:  
**Дивак Микола Петрович,**  
доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч науки і техніки  
України

*Ідентичність всіх примірників дисертації*  
**ЗАСВІДЧУЮ**  
*Вчений секретар спеціалізованої вченої ради*  
**/Р. А. Бунь/**

Львів – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Гураль І.В.* Інтервальне моделювання процесів у біогазових установках в умовах структурної та параметричної невизначеності.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

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

Спеціалізована вчена рада Д35.052.05 при Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального наукового завдання – створення комплексу дискретних динамічних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які враховують технологічні відхилення процесу на різних його стадіях унаслідок розробки та застосування методів параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолоїної колонії.

У першому розділі проведено аналіз біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках. З'ясовано, що процеси анаеробного мікробіологічного бродіння носять недетерміністичний характер, тому одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у біогазових установках є використання математичних моделей у вигляді дискретних динамічних моделей, побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок вимірювань у результатах спостережень необхідно застосовувати методи інтервального аналізу.

Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу. Застосування індуктивних методів забезпечує зниження часових затрат на синтез математичних моделей. Проаналізовано існуючі методи ідентифікації як структури так і оцінок параметрів інтервальних дискретних динамічних моделей. До основних стохастичних методів розв'язування задач параметричної ідентифікації відносять: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності та методи випадкового пошуку. Проте, для розв'язання задач ідентифікації параметрів на основі аналізу інтервальних даних слід використовувати методи випадкового пошуку, оскільки інші методи не враховують тих невизначеностей, що зустрічаються при ідентифікації. Унаслідок аналізу методів параметричної ідентифікації на основі процедур випадкового пошуку зазначено ряд їх основних переваг і недоліків. Зокрема, недоліком методу випадкового пошуку із лінійною тактикою є те, що він не володіє великим спектром можливих напрямків спуску; застосування методу випадкового пошуку по найкращій спробі дає можливість потрапляння в таку зону, коли робочий крок робиться в бік збільшення функції мети; метод випадкового пошуку із адаптацією розподілення випадкового кроку володіє підвищеною швидкістю, але це не завжди покращує процес пошуку, оскільки процес оптимізації дуже швидко змінюється; при використанні методу випадкового пошуку на основі напрямного конуса можна отримати адаптивні процедури глобального пошуку змінюючи величину кута, водночас зазначений метод характеризується низькою обчислювальною складністю. Однак, усі ці методи не дають можливості отримати інтервальні оцінки параметрів, вони орієнтовані лише на точкові значення параметрів, а це також, не дає можливості знаходження єдиної моделі із інтервальним представленням параметрів, що дасть змогу врахувати розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень. До методів структурної

ідентифікації відносять: метод редукції структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; методи на основі генетичних алгоритмів; методи на основі ройового інтелекту, до яких належать мурашиний алгоритм, алгоритм рою часток, алгоритм зозулі, алгоритм бджолоїної колонії тощо. Проведений аналіз їх особливостей показав, що основним недоліком усіх методів є висока обчислювальна складність. Проте, на відміну від інших, у методі на основі ройового інтелекту основною перевагою є менша кількість параметрів алгоритму. Також унаслідок аналізу цього методу з'ясовано, що алгоритм бджолоїної колонії, на відміну від інших ройових алгоритмів, містить ефективний механізм для уникнення локальних екстремумів функції мети, а також дозволяє легко встановити основні аналогії між особливостями харчової поведінки бджолоїної колонії та основними поняттями задачі структурної ідентифікації. На основі проведеного огляду та аналізу методів структурної та параметричної ідентифікації встановлено, що доцільним є створення комплексу інтервальних дискретних динамічних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях, а для розв'язування цієї задачі необхідно розробити нові методи параметричної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів та удосконалити метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі алгоритмів бджолоїної колонії із зменшенням часової складності його реалізації.

У другому розділі розглянуто множину розв'язків задачі параметричної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей. Для розв'язування цієї задачі проаналізовано два способи отримання інтервальних оцінок параметрів моделей: гарантованих та допускових. У процесі досліджень встановлено, що гарантовані інтервальні оцінки є достатньо неточними, оскільки отриманій області параметрів у такому випадку належать оцінки параметрів із застосуванням яких, не можливо побудувати

дискретні динамічні моделі, які адекватно відображають процеси в біогазових установках. Також проблемою обчислення гарантованих інтервальних оцінок є отримання інтервальних, а не звичайних алгебричних, рівнянь у процесі обчислення часткових похідних функції Лагранжа, що призводить до наявності багатьох розв'язків при пошуку меж інтервалів параметрів інтервальної дискретної динамічної моделі. На основі проведених обґрунтувань запропоновано метод та обчислювальну процедуру параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних моделей із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень. Також розглянуто метод параметричної ідентифікації моделей динамічних систем із заданою точністю, за результатами спостережень за вихідною змінною з обмеженими за амплітудою похибками спостережень і при цьому отримано вирази та побудовано алгоритми для знаходження інтервальних оцінок змінних стану дискретних динамічних моделей на основі спостережень за вихідними змінними з обмеженими за амплітудою похибками, що уможливило побудову методу параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей.

У третьому розділі розглянуто задачу оцінювання якості структури дискретної динамічної моделі та проведено обґрунтування методу її розв'язування. Поєднання компонентів поведінкової моделі бджолоїної колонії, методу аналізу інтервальних даних та методу параметричної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей у вигляді інтервальних оцінок параметрів створює можливість сформулювати теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму функції мети в задачі структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей. Удосконалено метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії.

У запропонованому методі обґрунтовано використання нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у вигляді квадратичної залежності між кількістю «структур-нащадків» згенерованих «навколо» поточної «структури-предка» та значенням функції мети для цієї «структури-предка». Такий підхід дозволив підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і таким чином знизити обчислювальну складність його реалізації. Проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності існуючого та запропонованого методу структурної ідентифікації на тестових прикладах та показано зниження обчислювальної складності для запропонованого методу. Розроблено блок-схему алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Запропоновано та обґрунтовано функціональну модель програмного комплексу для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях. На основі цієї моделі побудовано програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями внаслідок уведення в існуючий комплекс програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів та процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у програмному модулі структурної ідентифікації.

У четвертому розділі отримано комплекс адекватних математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях процесу анаеробного бродіння, а саме: ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Отримані інтервальні дискретні динамічні моделі ураховують розкид технологічних параметрів, кислотності середовища та температури, а також похибки в результатах спостережень, що забезпечують можливість коригування протікання процесу після кожної стадії процесу в біогазових установках. Зазначені інтервальні дискретні динамічні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння забезпечують гарантовані

прогностичні властивості для різних умов анаеробного мікробіологічного бродіння та якісно адекватно описують динаміку відповідних процесів, навіть у випадку незначної зміни початкових умов за межами інтервалів, які використано як початкові умови для ідентифікації цих моделей. Проведено дослідження впливу вибору початкових умов на зміну характеру модельованих процесів на стадії метагенезу. Унаслідок проведених досліджень встановлено, що розширення інтервалів для вибору початкових умов збільшує часову складність реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації. Крім того, при достатньо широких інтервалах для початкових умов втрачається стійкість поточної структури моделі, а бо її взагалі не можливо встановити. Заразом суттєве звуження інтервалів для початкових умов не дасть можливості при використанні моделі урахувати реальні можливі розкиди технологічних параметрів процесу, а при відхиленні від цих інтервалів суттєвим чином змінюється характер прогнозованого процесу. Підтверджено, що застосування удосконаленого методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей дозволяє знизити обчислювальну складність методу. Водночас ефективність застосування такого підходу буде збільшуватися пропорційно розмірності задачі.

*Ключові слова:* інтервальне моделювання, параметрична ідентифікація, структурна ідентифікація, алгоритм бджолиної колонії, математична модель, інтервальна дискретна динамічна модель, тверді побутові органічні відходи, анаеробне мікробіологічне бродіння, біогазова установка.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації*

1. Гураль І.В. Модель неавтономної системи виробництва біогазу та метод її ідентифікації / Гураль І.В., Дивак М.П., Піговський Ю.Р. // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С.129-136.
2. Порплиця Н.П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії / Н.П. Порплиця, І.В. Гураль, М.П. Дивак // Науковий вісник НЛТУ України, 2017, т. 27, № 1 – С.215-221.
3. Гураль І.В. Макромоделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових відходів на стадіях ацидогенезу та метаногенезу / І.В. Гураль, М.П. Дивак, Н.П. Порплиця // Індуктивне моделювання складних систем. – 2017. – Вип. 9. – С. 50-68.
4. Hural I. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage/ I. Hural, M. Dyvak, P. Stakhiv // Journal of Applied Computer Science, 2016. – P. 17-36.
5. Гураль І.В. Макромоделювання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових установках // Вісник національного технічного університету «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці і технологіях» – 2016. – С.23-30.
6. Гураль І.В. Програмний комплекс для моделювання процесів бродіння в біогазових установках / І.В. Гураль, Н.П. Порплиця // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2016. – С.152-158.
7. Гураль І.В. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромоделювання процесів виробництва



біогазу / І.В. Гураль, М.П. Дивак // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2014 – С.152-158.

8. Дивак М.П. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках / Дивак М.П., Гураль І.В. // Індуктивне моделювання складних систем. – 2014. – Вип. 6. – С. 55-68.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

9. Dyvak M. Modeling the processes of dynamics at biogas plants on the acetogenesis stage / M. Dyvak, I. Hural, P. Lipinski // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Conference (CPEE' 2016). – Sandomierz, Poland, 2016. – P. 101-104.

10. Гураль І.В. Моделювання динаміки процесів у біогазових установках на стадії метаногенезу // VI Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2016): матеріали. - Тернопіль, 2016.-С.35-36.

11. Гураль І.В. Неавтономна модель динаміки об'єму залишкової маси бананових відходів та ідентифікація її параметрів / Гураль І.В., Піговський Ю.Р. // V Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2015): матеріали. - Тернопіль, 2015.-С.16-18.

12. Hural I. Autonomous systems modification of mono`s differential equations to non-autonomous systems in the tasks of modeling processes problems at biogas plants / I. Hural, M. Dyvak, Yu. Pigovsky, V. Spilchuk // 13-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 24-27 February 2015. – P. 93-96.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

13. Гураль І.В. Аналіз інтервальних даних в задачі оцінювання щодобового виходу метану під час анаеробного мікробіологічного бродіння // IV Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2014): матеріали. - Тернопіль, 2014.-С.16-18.

14. Hural I. Analysis of biochemical processes as a basis for building macro models of dynamic processes at biogas plants / I. Hural, I. Voytyuk, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science” Lviv-Slavske, UKRAINE February 25 - March 1, 2014. – P. 750-751.

15. Dekhtiar I. Features of biogas production process and methods of its modeling / I. Dekhtiar, T. Dyvak, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 19-23 February 2013. – P.66-68.

16. Дехтяр І.В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках // III Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2013): матеріали. - Тернопіль, 2013.-С.21-22.

## ABSTRACT

Hural I.V. Interval modeling of processes at biogas plants in terms of structure and parametric uncertainty.

Thesis for a Ph.D degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

Preparation was carried out at the Department of Computer Science of Ternopil National Economic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Specialized Academic Council D 35.052.05 at the Lviv Polytechnic National University.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical task creation of a complex of discrete dynamic models of processes of anaerobic microbiological fermentation, taking into account technological deviations of the process at its various stages as a result of the development and application of methods of parametric identification of discrete dynamic models of processes with an interval representation of their parameters and structural identification these models based on the algorithms of the bee colony.

The first section analyzes the biochemical processes of anaerobic microbiological fermentation in biogas plants. It is revealed that processes of anaerobic microbiological fermentation are non-deterministic, therefore one of the alternative approaches to biogas plant simulation is the use of mathematical models in the form of discrete dynamic models constructed on the basis of observations of input variables and process characteristics. Given the spread of technological process parameters and measurement errors in the results of observations, it is necessary to apply methods of interval analysis.

The peculiarity of these methods is to present the process characteristics on the results of the experiment at numerical intervals, followed by the structural and parametric identification of the mathematical models of this process. The use of

inductive methods provides a reduction in the time costs for the synthesis of mathematical models and their simplification through the automation of the synthesis process. The existing methods of identification of both the structure and the estimates of parameters of interval discrete dynamic models are analyzed. The main stochastic methods for solving parametric identification tasks include: the least squares method, the maximum likelihood method, and random search methods. However, to solve the parameter identification tasks based on the analysis of interval data, random search methods should be used, since other methods do not take into account those uncertainties that occur during identification. As a result of the analysis of parametric identification methods based on random search procedures, a number of their main advantages and disadvantages are indicated. In particular, the disadvantage of the method of random search with linear tactics is that it does not have a large range of possible descent directions; the application of the random search method for the best attempt gives the opportunity to fall into such a zone, when the work step is taken toward the increase of the purpose function; The random search method with the adaptation of the random step distribution has high performance, but this does not always improve the search process, as the process of optimization changes very quickly; Using the random search method on the basis of the guide cone, you can obtain adaptive global search procedures by changing the magnitude of the angle. At the same time, this method is characterized by low computational complexity. However, all these methods make it impossible to obtain interval estimates of parameters, they are oriented only on the point values of the parameters, which, in turn, does not make it possible to find a single model with an interval representation of parameters that will allow for the possibility of taking into account the spread. technological process parameters and errors in the results of observations. The methods of structural identification include: the method of reducing the structure of the mathematical model; method of group account of arguments; methods based on genetic algorithms; based methods, which include ant algorithm, particle swarm algorithm, cuckoo algorithm, bee colony algorithm,

etc. The analysis of their peculiarities has shown that the main disadvantage of all methods is high computational complexity. However, unlike the other, in the method based on the root intelligence the main advantage is a smaller number of parameters of the algorithm. Also, as a result of the analysis of this method, it was found that the algorithm of the bee colony, in contrast to other poetic algorithms, contains an effective mechanism for avoiding local extremes of the function of the target, and also makes it easy to establish the main analogies between the peculiarities of the beekeeping colony's eating behavior and the basic notions of the structural identification problem. On the basis of the conducted review and analysis of the methods of structural and parametric identification, it was found that it is expedient to create a complex of interval discrete dynamic models of processes of anaerobic microbiological fermentation, which ensure taking into account technological deviations of the process variables at its various stages, and to solve this problem, it is necessary to develop new Methods of parametric identification of interval discrete dynamic process models with an interval representation of their parameters and improve met on the structural identification of discrete dynamic models based on the algorithms of the bee colony with a decrease in the time complexity of its implementation. In the second section we consider the set of solutions of the problem of parametric identification of the interval of a discrete dynamic model. To solve this problem, we consider two methods for obtaining interval estimates for parameters of interval discrete dynamic models: guaranteed and admissible. In the course of the research it was established that the guaranteed interval estimates are rather inaccurate, since the obtained region of parameters in this case includes the estimation of parameters, with the use of which it is impossible to construct discrete dynamic models that adequately reflect the processes in biogas plants. Also, the problem of calculating guaranteed interval estimates is to obtain interval intervals rather than ordinary algebraic equations in the process of calculating partial derivatives of the Lagrange function, which leads to the presence of many solutions in finding intervals of intervals of the parameters of the IDDM. On the basis of the substantiation, a

method and a computational procedure for the parametric identification of discrete dynamic process models with an interval representation of their parameters are proposed, which, unlike the existing ones, provides the obtaining of a plurality of adequate models taking into account the spread of technological process parameters and errors in the results of observations. The method of parametric identification of models of dynamical systems with given accuracy, based on the results of observations on the output variable with bounded amplitudes by the errors of observations is considered, and the expressions are obtained and algorithms for finding interval estimates of the state variables of discrete dynamic models based on observations on output variables with amplitudes limited errors that made it possible to construct a method of parametric identification of discrete dynamic models.

In the third section the problem of evaluating the quality of the structure of a discrete dynamic model is considered and the method of its solution is substantiated. The combination of components of the behavioral model of the bee colony, the method of analysis of interval data and the method of parametric identification of interval discrete dynamic models in the form of interval parameter estimates creates the possibility to formulate the theoretical basis for constructing procedures for finding the global minimum of the function of purpose in the task of structural identification of interval discrete dynamic models. The method of structural identification of discrete dynamic models is improved on the basis of analysis of interval data and using behavioral models of the bee colony. In the proposed method, the use of the nonlinear operator "nectar sources search intensity" is substantiated in the form of a quadratic dependence between the number of "offspring structures" generated "around" the current "ancestry structure" and the value function of the purpose for this "ancestry structure". Such an approach has allowed to increase the degree of heterogeneity of coverage of the area of solutions of the task of structural identification and thus reduce the computational complexity of its implementation. A comparative analysis of the computational complexity of the existing and proposed method of structural

identification on test cases was carried out and reduction of the computational complexity for the proposed method is shown. A block diagram of the implementation algorithm for the advanced method of structural identification of interval discrete dynamic models based on beekeeping colony behavioral models was developed. The functional model of the software complex for modeling the process of anaerobic microbiological fermentation at all its stages is proposed and substantiated. On the basis of this model, a program complex with expanded functional capabilities was built as a result of introducing into the existing complex of a software module for the implementation of algorithms for parametric identification of discrete dynamic process models with an interval representation of their parameters and procedures for the implementation of a nonlinear operator of the "intensity of search for nectar sources" in the program module of structural identification.

In the fourth section a complex of adequate mathematical models of processes of anaerobic microbiological fermentation at the stages of the process of anaerobic fermentation, namely: acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis, has been obtained. The obtained interval discrete dynamic models take into account the spread of technological parameters, the acidity of the medium and temperature, as well as errors in the results of observations, which provides the opportunity to adjust the process flow after each stage of the process in biogas plants. The indicated interval discrete dynamic models of anaerobic microbiological fermentation processes provide guaranteed prognostic properties for different conditions of anaerobic microbiological fermentation and adequately describe the dynamics of the corresponding processes, even in the case of a slight change in the initial conditions outside the intervals used as initial conditions for the identification of these models. The influence of the choice of initial conditions on the change of the character of the simulated processes at the stage of metagenesis is carried out. As a result of the research, it was found that the expansion of intervals for the selection of initial conditions increases the temporal complexity of the implementation of methods of structural and parametric

identification. In addition, at sufficiently wide intervals for the initial conditions, the stability of the current structure of the model is lost, but it is impossible to establish at all. At the same time, a significant narrowing of the intervals for the initial conditions will not enable the model to take into account actual possible spreads of technological parameters of the process, and when deviating from these intervals, the character of the predicted process substantially changes. It is confirmed that the application of the advanced method of structural identification of interval discrete dynamic models reduces the computational complexity of the method. At the same time, the effectiveness of such an approach will increase in proportion to the dimension of the task.

*Key words:* interval modeling, parametric identification, structural identification, bee colony algorithm, interval discrete dynamic model, municipal solid organic waste, anaerobic microbiological fermentation, biogas plant.



## PUBLICATION LIST BY THE DISSERTATION SUBJECT

*Publications, in which the main scientific results of the dissertation are published*

1. I. Hural, Non-autonomous model of biogas production and method of its identification / I. Hural, M. Dyvak, Yu. Pigovsky // Scientific journal "Journal of Kremenchuk University". – Kremenchug, 2015. – Vol. 3/2015 (92). – P.129-136. – (in Ukrainian).
2. Porplytsya N.P. Structure identification method of fermentation process models at biogas plants using the bee colony algorithm / N.P. Porplytsya, I.V Hural, M.P. Dyvak // Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine, 2017. – Vol 27, No 1. – P.215-221. – (in Ukrainian).
3. Hural I.V. Macromodels of anaerobic microbiological fermentation process of municipal solid waste at acidogenesis and methanogenesis stages / I.V. Hural, M.P. Dyvak, N.P. Porplytsya, // Inductive modeling of complex systems, 2017 – Vol. 9. – P. 50-68. – (in Ukrainian).
4. Hural I. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage/ I. Hural, M. Dyvak, P. Stakhiv // Journal of Applied Computer Science, 2016. – P. 17-36. – (in English).
5. Hural I.V. Methanogenesis stage macromodeling of municipal solid organic waste fermentation at biogas plants // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "Mathematical modeling in technology and technologies" - 2016. - P.23-30. – (in Ukrainian).
6. Hural I.V. Program complex for the fermentation processes simulation at biogas plants / I.V. Hural, N.P. Porplytsya // International scientific and technical journal "Measuring and computing engineering in technological processes". – Khmelnytsky, 2016. – P.152–158. – (in Ukrainian).
7. Hural I.V. Biochemical analysis of processes at biogas plants and their application in the macromodeling problem of biogas production processes /

I.V. Hural, M.P. Dyvak // International scientific and technical journal "Measuring and computing engineering in technological processes". – Khmelnytsky, 2014 – P.152-158. – (in Ukrainian).

8. Dyvak M.P. The interval representation of the dynamics of anaerobic microbial fermentation at biogas plants [electronic resource] / M.P. Dyvak, I.V. Hural // Inductive modeling of complex systems, 2014 – Vol. 6. – P. 55-68. – (in Ukrainian).

*Publications certifying the approbation of the dissertation materials*

9. Dyvak M. Modeling the processes of dynamics at biogas plants on the acetogenesis stage / M. Dyvak, I. Hural, P. Lipinski // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Conference (CPEE' 2016). – Sandomierz, Poland, 2016. – P. 101-104. – (in English).

10. Hural I.V. Dynamic process simulation at biogas plants at the methanogenesis stage // VI All-Ukrainian School-Seminar for Young Scientists and Students "Modern Computer Information Technologies" (MCIT'2016): Materials. – Ternopil, 2016. – P.35-36. – (in Ukrainian).

11. Hural I.V. Dynamics non-autonomous model of banana waste residual mass and identification of its parameters / Hural I.V., Pigovsky Yu. // V All-Ukrainian School-Seminar for Young Scientists and Students "Modern Computer Information Technologies" (MCIT'2016): Materials. – Ternopil, 2015. – P.16-18. – (in Ukrainian).

12. Hural I. Autonomous systems modification of mono`s differential equations to non-autonomous systems in the tasks of modeling processes problems at biogas plants / I. Hural, M. Dyvak, Yu. Pigovsky, V. Spilchuk // 13-th International Conference "The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics" Polyana Svalyava (Zakarpattia) UKRAINE 24-27 February 2015. – P. 93-96. – (in English).

*Publications, which additionally reflect the scientific results of the dissertation*

13. Hural I.V. Interval data analysis in the estimating daily output task of methane during anaerobic microbiological fermentation // IV All-Ukrainian School-Seminar for Young Scientists and Students "Modern Computer Information Technologies" (MCIT'2014): Materials. – Ternopil, 2014. – P.16-18. – (in Ukrainian).

14. Hural I. Analysis of biochemical processes as a basis for building macro models of dynamic processes at biogas plants / I. Hural, I. Voytyuk, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science” Lviv-Slavske, UKRAINE February 25 - March 1, 2014. – P. 750-751. – (in English).

15. Dekhtiar I. Features of biogas production process and methods of its modeling / I. Dekhtiar, T. Dyvak, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 19-23 February 2013. – P.66-68. – (in English).

16. Dekhtiar I.V. Anaerobic microbiological fermentation process management at biogas plants analysis // III All-Ukrainian School-Seminar for Young Scientists and Students "Modern Computer Information Technologies" (MCIT'2013): Materials. – Ternopil, 2013. – P.21-22. – (in Ukrainian).

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ .....	20
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ БІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ ТА МЕТОДІВ ЇХ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	31
1.1. Аналіз процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках та їх моделей.....	32
1.2. Аналіз методів в задачі параметричної ідентифікації на основі інтервальних даних.....	43
1.3. Аналіз методів в задачі структурної ідентифікації на основі інтервальних даних.....	48
1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження.....	55
Висновки до розділу 1.....	59
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНОЇ ДИНАМІНОЇ МОДЕЛІ В ІНТЕРВАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ.....	61
2.1. Множина розв'язків задачі параметричної ідентифікації інтервальної дискретної динамічної моделі .....	61
2.2. Метод обчислення гарантованих інтервальних оцінок параметрів ІДДМ .....	70
2.3. Метод та алгоритм обчислення допускових інтервальних оцінок параметрів ІДДМ .....	76
Висновки до розділу 2.....	85
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІ- КАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АЛГОРИТМУ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ.....	87

	21
3.1. Математична задача оцінювання якості структури дискретної динамічної моделі та її обґрунтування .....	87
3.2. Удосконалений метод структурної ідентифікації з нелінійним оператором показника кількості «структур-нащадків».....	94
3.3. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації з нелінійним оператором показника кількості «структур-нащадків» ....	100
3.4. Програмний комплекс реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей.....	104
Висновки до розділу 3.....	112
РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ АНАЕРОБНОГО МІКРОБІОЛОГІЧНОГО БРОДІННЯ .....	114
4.1. Інтервальна дискретна динамічна модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових органічних відходів у біогазових установках на стадії ацидогенезу .....	115
4.2. Інтервальна дискретна динамічна модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових органічних відходів у біогазових установках на стадії ацетогенезу .....	123
4.3. Інтервальна дискретна динамічна модель динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у біогазових установках.....	126
4.4. Порівняльний аналіз ефективності методів структурної ідентифікації з модифікованими операторами .....	135
Висновки до розділу 4.....	138
ВИСНОВКИ	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ПРАЦЬ.....	143
ДОДАТОК А. Акти про використання результатів дисертаційного дослідження .....	161
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	166

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ТПОВ тверді побутові органічні відходи

БГУ біогазова установка

МСО маленька субодинаця

ДДМ дискретна динамічна модель

ІДДМ інтервальна дискретна динамічна модель

ІСНАР інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Однією з актуальних проблем людства є утилізація твердих побутових органічних відходів (ТПОВ). Для її вирішення часто використовують біогазові установки (БГУ). Такий спосіб утилізації, крім розв'язування екологічної проблеми, дає змогу отримати високоефективні органічні добрива та біогаз із високим вмістом метану.

У БГУ проходять складні тепло- та масообмінні процеси на різних стадіях метанового бродіння. Для ефективного управління зазначеними процесами необхідно створити математичні моделі, які б описували стадії ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу. Існуючі моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які описано в працях J. Monod, H. Moser, E.O. Powell, Y. Chen, A.G. Hashimoto, F. Bergter, R. Mitsdörffer, ґрунтуються на біохімічних перетвореннях та є детермінованими. Процеси анаеробного мікробіологічного бродіння є недетермінованими. Одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ є використання математичних моделей у вигляді дискретних динамічних моделей (ДДМ), побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. У працях Matt E. Griffin, Katherine D. McMahon, Roderick I. Mackie, Lutgarde Raskin, Н.Б. Голуб, О.А. Козловця описано такі математичні моделі, що враховують стохастичність процесів бродіння. Однак не враховують можливості зміни протікання процесу на будь-якій його стадії, а також технологічних відхилень змінних процесу, через неоднорідність та різну структуру біосировини, температуру та кислотність середовища. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки, наприклад вимірювань, у результатах спостережень призводить до необхідності застосування методів інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

Серед методів структурної ідентифікації ДДМ слід виділити такі: метод редукції структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; методи на основі генетичних алгоритмів; методи на основі моделей ройового інтелекту та методи випадкового пошуку. Вказані методи описано у працях Akaike H., Ljung L., Haber R., Гропа Д., Дивака М.П., Ейкхоффа П., Івахненка О.Г., Карабутова М.М, Личака М.М., Степашка В.С., Растригіна Л.А., Ципкіна Я.З. Частина з цих методів не придатна для використання у випадку інтервального представлення результатів експерименту. Решта має високу обчислювальну складність, що робить методи непридатними для задач моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння. Проте, для розв'язування задач структурної ідентифікації ДДМ на основі інтервальних даних набули широкого застосування методи з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії. Однак і вони мають високу обчислювальну складність і зорієнтовані на знаходження однієї моделі, тобто без урахування множинності оцінок параметрів завдяки невизначеності. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень також призводять до множини таких моделей унаслідок множини оцінок параметрів.

У теорії інтервального аналізу найчастіше використовують інтервальні оцінки значень параметрів для моделей. Такий підхід відзначається простотою обчислень і особливо є актуальним при побудові ДДМ.

Зважаючи на викладене вище, актуальним є наукове завдання створення комплексу ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях шляхом розробки та застосування методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолоїної колонії.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематичним планом науково-



дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету протягом 2013 – 2018 років. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання таких науково-дослідних робіт: «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0114U000569), у якій автором побудовано інтервальні дискретні динамічні моделі, які описують процеси анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу; «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (державний реєстраційний номер 0111U010356), зокрема у розділі «Макромодельовання стаціонарних та нестаціонарних різницевих операторів в умовах структурної невизначеності» автором розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення процесів імітаційного моделювання з метою вибору оптимальних параметрів технологічного процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на усіх його стадіях; держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507), зокрема у розділі «Метод структурної ідентифікації динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту у вигляді інтервальних різницевих операторів» автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі алгоритму бджолиної колонії.

Усі вищезгадані роботи виконувалися за безпосередньої участі автора, котрий був виконавцем.

**Мета та завдання дослідження.** Метою дослідження є побудова та дослідження математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із урахуванням технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях на основі розробки та застосування методу параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням

їх параметрів та методу структурної ідентифікації цих моделей із застосуванням алгоритмів бджолиної колонії для зменшення його часової реалізації. Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено наступні завдання:

- провести аналіз моделей процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння та відомих методів структурної і параметричної ідентифікації цих моделей;

- розробити метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх характеристик;

- удосконалити метод структурної ідентифікації ДДМ із застосуванням інтервальних даних та алгоритмів бджолиної колонії;

- розробити математичні моделі кожної стадії анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках з урахуванням технологічних відхилень змінних такого процесу;

- розширити можливості програмного продукту для ідентифікації інтервальних дискретних моделей процесів та провести його апробацію в практичних застосуваннях.

*Об'єкт дослідження* – процеси анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

*Предмет дослідження* - математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння та методи їх структурної і параметричної ідентифікації на основі аналізу інтервальних даних.

**Методи дослідження.** При розробці методу параметричної ідентифікації ДДМ з інтервальним представленням їх параметрів було використано методи аналізу інтервальних даних та методи стохастичного програмування. Для удосконалення методу структурної ідентифікації ДДМ на основі інтервальних даних було застосовано методи аналізу інтервальних даних, методи стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем, зокрема поведінкові моделі бджолиної колонії. При побудові математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках

було використано індуктивний підхід, методи аналізу інтервальних даних, методи теорії ідентифікації ДДМ, зокрема розроблено методи структурної та параметричної ідентифікації. Для дослідження збіжності та обчислювальної складності удосконалених методів структурної та параметричної ідентифікації використано комп'ютерне моделювання. Для проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації використано об'єктно-орієнтований підхід, а для його створення застосовано технологію .NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У межах дисертаційної роботи здійснено постановку та вирішення актуального наукового завдання моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння та методів їх структурної і параметричної ідентифікації, зокрема:

*уперше:*

- запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних моделей із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень;

- отримано адекватні математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на різних стадіях, які, на відміну від існуючих, ураховують інтервальну невизначеність, що забезпечує можливість коригування протікання процесу після кожної стадії в біогазових установках та належність результатів спостереження заданим інтервалам;

*удосконалено:*

- метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолої колонії, у якому, на відміну від існуючого, запропоновано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило

підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і знизити обчислювальну складність його реалізації.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні нових алгоритмів та розширенні функціональних можливостей програмного продукту для ідентифікації інтервальних дискретних моделей процесів та проведенні його апробації для побудови математичних моделей процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння.

Розроблені математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу із гарантованими прогностичними властивостями, які ураховують розкид технологічних параметрів та похибки у результатах спостережень, використано на діючій біогазовій установці лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту та на базі комунального підприємства «Тернопільміськтеплокомуненерго» для оцінювання потенційних можливостей ресурсів при плануванні створення біогазової установки в м. Тернополі. Розроблені моделі дають можливість коригувати протікання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння після кожної стадії в біогазових установках.

Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень упроваджено в навчальному процесі Тернопільського національного економічного університету за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» (при викладанні дисциплін «Інтелектуальний аналіз даних» та «Інтервальні обчислення»).

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором [72] – запропоновано метод побудови ідентифікації параметрів математичної моделі, який забезпечує знаходження її інтервальних оцінок; [132] – удосконалено спосіб реалізації деяких

операторів методу структурної ідентифікації, який ґрунтується на аналогіях із поведінковими моделями бджолоїної колонії, [73] – уперше отримано математичну модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на стадії ацидогенезу та метаногенезу на основі інтервальної динамічної дискретної моделі; [20] – отримано математичну модель процесу бродіння на стадії ацидогенезу на основі інтервальної динамічної дискретної моделі; [77] – розроблено програмний комплекс для моделювання на кожній стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках; [18, 71] – проведено біохімічний аналіз процесів анаеробного мікробіологічного бродіння; [70, 86] – запропоновано спосіб отримання вихідних даних на основі біохімічного аналізу процесів у біогазових установках із використанням модифікованої до інтервального вигляду формули Чена та Хашимото; [19, 76] – побудовано неавтономну модель динаміки об'єму залишкової маси зброджуваного субстрату; [10] – проаналізовано методи моделювання процесу бродіння; [78] – проаналізовано основні фактори впливу на процес бродіння.

**Апробація результатів дисертації.** . Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах: XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці» CADSM (Львів – Поляна, 2013, 2015); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET (Львів – Славсько, 2014); 17-й Міжнародній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» СРЕЕ (Польща – Сандомеж, 2016); III, IV, V та VI Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» АСІТ (Тернопіль, 2013, 2014, 2015, 2016); Міжнародних школах-семінарах для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування» (с. Жукін Київської обл., 2014, 2016); наукових семінарах кафедри

комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2013-2018).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 16 наукових праць із загальним обсягом 102 сторінки, з них 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави та 7 статей у наукових фахових виданнях України, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus та 8 публікацій у матеріалах конференцій, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 160 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 168 сторінок друкарського тексту, з них 120 сторінок основного тексту. Робота містить 29 рисунків і 11 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ БІОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ ТА МЕТОДІВ ЇХ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У сучасних умовах енергетичного розвитку України актуальною є проблема нагромадження твердих побутових органічних відходів (ТПОВ). Якщо не проводити їх утилізацію, а зберігати всі відходи на сміттєзвалищах, утворюються супутні екологічні проблеми, а саме: вимивання поживних речовин і забруднення внутрішніх вод; утворення метану, що призводить до парникового ефекту; просідання ґрунту тощо [54]. Тому, потрібно утилізувати ТПОВ за допомогою біогазових установок (БГУ), які дають змогу разом із розв'язанням екологічної проблеми отримувати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді біогазу [57].

Розглянуті в цьому розділі основні процеси на різних стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння у БГУ показали, що важливим питанням є можливість керувати процесами та необхідність надійно витримувати сталими основні параметри процесу бродіння для забезпечення високої ефективності таких установок.

Математичні моделі на всіх стадіях процесу анаеробного мікробіологічного бродіння ТПОВ, які дають можливість прогнозувати процес бродіння при деяких умовах, є невід'ємною складовою частиною системи контролю за процесом. Незважаючи на те, що існують вже розроблені та визнані моделі процесу, задача моделювання анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках залишається актуальною і на сьогоднішній день [85, 94]. Зокрема більшість математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках описують автономну систему [46]. Водночас реальний процес вимагає урахування основних факторів впливу, а саме: температури та кислотності середовища. Особливо це є актуальним при переході від однієї стадії до іншої.

Тому для управління і контролю анаеробного мікробіологічного бродіння потрібно побудувати математичні моделі на різних стадіях процесу.

У цьому розділі розглянуто різні типи моделей, їх переваги та недоліки. Проаналізовано методи побудови цих моделей. У завершальній частині розділу здійснено постановку задач дисертаційного дослідження.

Матеріали, які обґрунтовують постановку задач дисертаційного дослідження, опубліковано автором у працях [18-21, 70-78, 86].

### **1.1. Аналіз процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках та їх моделей**

Теоретичною та експериментальною основами для побудови математичних моделей для виробництва біогазу є дослідження та встановлення закономірностей в процесах біохімічних перетворень.

Існують різні технологічні схеми БГУ, які відрізняються складом обладнання, топологією, режимами роботи тощо. В основних елементах БГУ проходять складні тепло- та масообмінні процеси анаеробного мікробіологічного бродіння [67]. Необхідними умовами для перероблення органічних відходів усередині реактора біогазової установки є: створення безкисневого режиму; доступність поживних речовин для бактерій; вибір оптимального часу бродіння та своєчасне завантаження і вивантаження сировини; дотримання співвідношення вмісту вуглецю і азоту; правильна пропорція твердих частин в сировині та перемішування; відсутність інгібіторів процесу [1, 49]. Для забезпечення високої ефективності таких установок необхідно надійно витримувати сталими такі параметри як: температуру субстрату в реакторі, концентрацію, тиск у біогазовій установці; кислотність середовища, швидкість подачі субстрату в реактор, збалансованість потоків субстрату тощо.

Процес утворення біогазу називають метановим бродінням. Його суть полягає в анаеробному бродінні, яке відбувається унаслідок життєдіяльності



мікроорганізмів і супроводжується рядом біохімічних реакцій [8]. Кілька видів мікроорганізмів беруть участь у загальних реакціях, які включають в себе такі стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез [22]. Анаеробне бродіння вимагає збалансовану діяльність мікробних об'єднань для окислення субстратів та видалення інгібуючих кислот і водню для утворення метану. Загальна схема метанового бродіння показана на рис. 1.1.

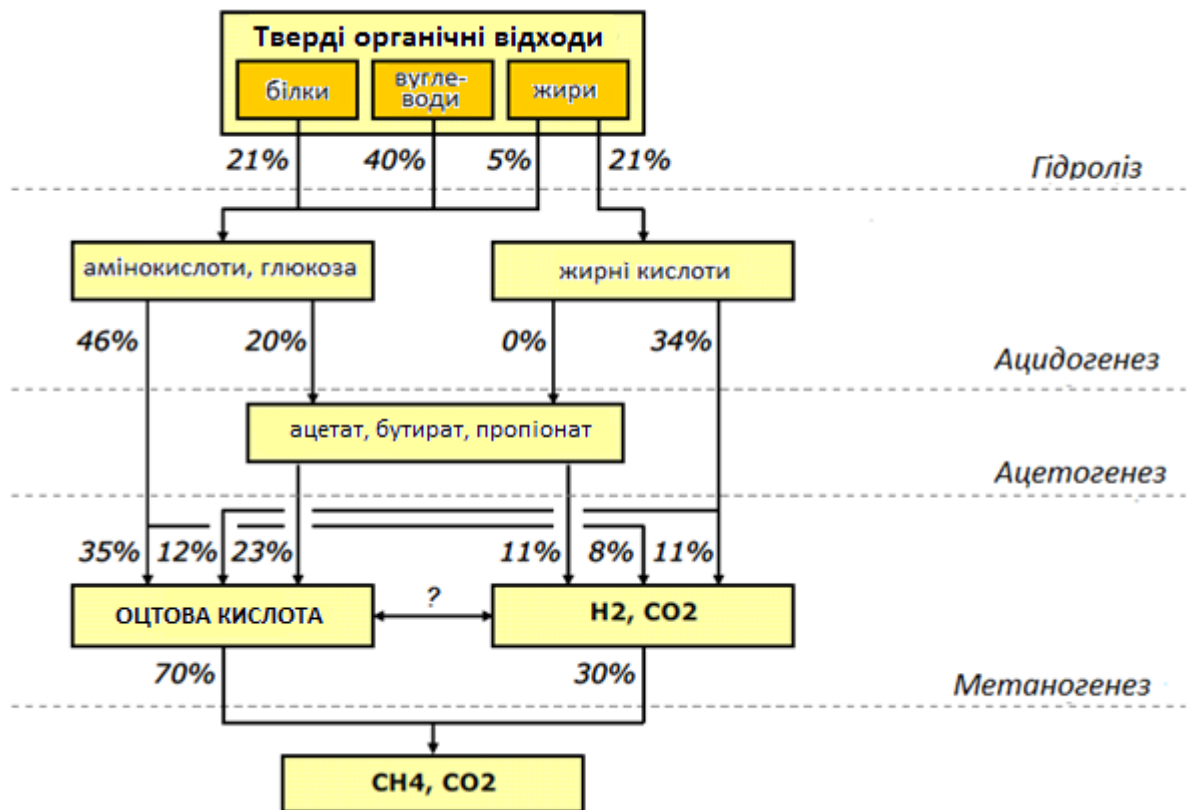
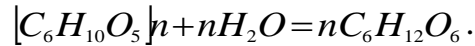


Рисунок 1.1 – Схема анаеробного мікробіологічного бродіння ТПОВ

На етапі гідролізу відбувається розкладання високомолекулярних сполук (вуглеводів, жирів та білків) на низькомолекулярні органічні сполуки. Їх анаеробна здатність до біологічного розкладання залежить від відносної кількості кожного компонента. Майже всі вуглеводи легко розкладаються, а білки, жири і целюлоза потребують більш тривалого часу гідролізу [22].

До гідролізу вуглеводів відносять розпад крохмальних полісахаридів з приєднанням води. Кінцевими продуктами гідролізу крохмалю у біогазових установках є глюкоза і фруктоза [20-22].

Крохмаль при швидкому нагріванні розщеплюється до декстринів формули  $[C_6H_{10}O_5]_n$ , де  $n$  – число глюкозних залишків [139]. У цьому випадку хімічне рівняння має такий вигляд:



Тваринні і рослинні жири або масла є найбільш поширеними жирами у відходах, що викликають проблеми засмічення в анаеробному бродінні.

В процесі гідролізу жири розщеплюють до гліцерину і вільних вищих жирних кислот. Інгібуючу дію жирів зазвичай приписується вищим жирним кислотам. Вони залишаються на поверхні між жирами і водою і, отже, впливають на активність ліпаз, ферментів, які каталізують гідроліз нерозчинних субстратів, допомагаючи розщеплювати жири та можуть призвести до пошкодження транспортних каналів бактеріальних клітин. Під дією ферменту ліпази жири розщеплюються на гліцерин і карбонові кислоти [22].

Білки є основними азотистими відходами в твердих побутових відходах, гною і каналізаційних шламах. Ці молекули мають відносно велику площу поверхні, не розчиняються у воді і не осідають. В анаеробних реакторах, білки служать в якості джерела вуглецю та енергії для росту бактерій і як джерело азоту з аміаку, що виділяється при гідролізі.

Білки гідролізуються до амінокислот різними позаклітинними протеазами, ферментами, які розщеплюють пептидний зв'язок між амінокислотами в білках. Гідроліз білків залежить від розчинності білка і рН.

При бродінні цукрів, вищих жирних кислот та амінокислот на стадії ацидогенезу ацетат є важливим проміжним елементом, з якого за участю кислотоутворюючих бактерій на стадії ацетогенезу відбувається подальше розкладання з утворенням органічних кислот і їх солей, а також спиртів та альдегідів [74]. Ці кислоти окислюються і утворюється оцтова кислота.

На цій стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння залучаються види кислотоутворюючих бактерій, а саме *Acetobacter aceti* та штучно виведені *Clostridium thermoaceticum*. Для підживлення цих бактерій використовують глюкозу, яка утворюється на етапі гідролізу, хімічне рівняння якого має такий вигляд:



На останньому етапі – метаногенезі за допомогою метаноутворюючих бактерій відбувається метанове бродіння, що є кінцевим бактеріальним перетворенням органічних речовин з утворенням метану й води. Метаноутворюючі бактерії більш чутливі до умов середовища, а ніж кислотоутворюючі; вони потребують повної відсутності кисню.

З біохімічної точки зору метанове бродіння – це процес, в результаті якого електрони від органічних речовин переносяться до вуглекислого газу, який потім відновлюється до метану [49]. Окрім різних органічних субстратів (таких, як оцтова кислота), донором електронів для метанобактерій слугує водень, який утворюється декількома типами анаеробних бактерій [123].

У процесах розкладання органічної біомаси до кислот беруть участь асоціації анаеробних організмів, серед яких гідролітичні, кислотогенні, ацетогенні представники родів: *Enterobacteriaceae*, *Lactobacillaceae*, *Sterptococcaceae*, *Clostridium*, *Butyrivibrio* [158].

Активними метанотвірними компонентами метаногенної асоціації, здатними безпосередньо до біосинтезу метану, є невелика група метаногенеруючих архебактерій, життєдіяльність яких відбувається в строго анаеробних умовах. Вони відрізняються від прокаріотичних мікроорганізмів відсутністю муреїну в клітинній стінці; специфічним, таким, що не містить жирних кислот, складом ліпідів; наявністю специфічних компонентів метаболізму у вигляді коферменту М (2-меркаптоетансульфонової кислоти) і фактору F420 (особливий флавін); специфічною нуклеотидною

послідовністю 16s рРНК [21]. Рибосомна РНК (рРНК) – вид рибонуклеїнової кислоти, що є центральним компонентом рибосоми, комплексу, що збирає білки у клітині. Потім рРНК збираються в дві складні субодиниці (велика і маленька субодиниці) [139]. У бактерій, архей, мітохондрій і хлоропластів маленька рибосомна субодиниця (МСО) та містить 16s рРНК, де s означає одиницю Сведберга [128].

Вибір МСО рРНК був використаний для визначення відносних концентрацій трьох доменів (Bacteria, Archaea і Eucarya). Сума відносних кількостей Bacteria, Archaea і Eucarya (представлені у вигляді відсотка від загального МСО рРНК) повинна дорівнювати 100%, так як всі відомі організми містяться в межах цих трьох областей [139]. Bacteria становили більшість мікроорганізмів в реакторах, Archaea присутні в менших кількостях (менше 10% в більшості випадків), і Eucarya присутні на дуже низькому рівні (нижче на 0,8%).

На етапі ацетогенезу в процес задіюються ацетогенні і гідрогенутворюючі бактерії. Вони перетворюють пропіонат у ацетат,  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2$ , якщо в середовищі одночасно присутні водень-споживаючі бактерії, оскільки водень є інгібітором оцтовокислих бактерій. Встановлено, що оцтовокислі мікроорганізми - симбіонти, їх раніше вважали одним мікробом, який називали *Methanobacillus omelianskii* і який входить до типу Bacteria [139].

Для всіх метанобактерій характерна здатність рости у присутності водню і вуглекислого газу, а також висока чутливість до кисню і інгібіторів виробництва метану. У природних умовах присутня трофічна асоціація метанобактерій, тісно пов'язаних з гідрогенними бактеріями, що продукують газоподібний водень, який споживається метаногенами; у результаті його концентрація знижується і стає безпечною для воденьтвірних бактерій. В результаті, метаногенні бактерії входять до типу Archaea і Eucarya.

Ці реакції протікають одночасно, причому умови існування метаноутворюючих бактерій значно вищі, ніж кислотоутворюючі. Швидкість і

масштаби анаеробного бродіння метаноутворюючих бактерій залежать від їх метаболічної активності [49].

На інтенсивність процесу зброджування і, як наслідок, утворення біогазу впливають чотири групи факторів: біологічні (склад зброджуваної біомаси; склад мікрофлори; умови життєдіяльності мікроорганізмів), фізичні (температура зброджування; тиск у біогазовій установці; гідравлічний режим), хімічні (концентрація, кислотність середовища; вміст летких жирних кислот в зброджуваній масі; обсяг і склад біогазу, що утворюється) та організаційно технологічні (доза добового завантаження нових порцій зброджуваної маси; навантаження за беззольною речовиною; залишкові речовини) [49, 55].

Аналіз процесів анаеробного мікробіологічного бродіння показав, що на обсяг виходу біогазу найбільше впливають такі фактори як: температура ( $T$ ) бродіння, концентрація субстрату ( $S$ ), кислотність середовища ( $pH$ ) та склад органічної речовини [49], що є основними факторами впливу.

Підтримка оптимальної температури та кислотності середовища є одним з найважливіших чинників процесу зброджування. Із урахуванням оптимізації процесу переробки ТПОВ для отримання біогазу та біодобрив показник рН повинен бути в межах від 6,9 до 7,5 [16]. А щодо оптимального температурного режиму, виділяють основні три: психофільний (від 20-25°C), мезофільний (25-40°C) та термофільний - понад 40°C.

Дані відомості різні для різних видів сировини, але на підставі емпіричних даних установок періодичного завантаження, оптимальною температурою для мезофільного температурного режиму є 32 - 35 ° С, а для термофільного 52- 54 ° С. Психофільний температурний режим дотримується в установках без підігріву, в яких відсутній контроль за температурою.

Проте, перевагу здебільшого надають мезофільному режимові, оскільки при цьому досягається економія енергії. Метанове бродіння – процес ендотермічний, який потребує постійного підігріву для підтримки

температури бродіння [49]. Метантенки і сировина переважно підігріваються унаслідок спалювання утвореного газу [72].

Оскільки існуючі рівняння, які описують процеси анаеробного мікробіологічного бродіння, ґрунтуються на біохімічних перетвореннях, є детермінованими, то їх важко використовувати у випадку різної структури сировини, що є типовим у БГУ. Тому для ефективного управління процесами у БГУ необхідно створити математичні моделі, які б описували процеси на кожній стадії анаеробного мікробіологічного бродіння: ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу. Такі математичні моделі відносять до типу макромоделей, які описують динаміку росту мікроорганізмів та динаміку зміни характеристик субстрату.

Розглянемо декілька основних математичних моделей росту мікроорганізмів процесу анаеробного мікробіологічного бродіння.

Математична модель кінетики росту, отримана німецькими біохіміками Міхаелісом та Ментеном [29], та описує активність бродіння залежно від концентрації субстрату. Ця залежність може бути перенесена на зростання бактерій, тому що мікробний ріст також є автокаталітичною реакцією [45]. Проте, відомий вчений Моно [29,30] визнав нелінійне співвідношення між питомою швидкістю росту мікроорганізмів та обмеженою концентрацією субстрату, коли він досліджував зростання бактеріальних культур і паралелізм до теорії Міхаеліса-Ментена. Таким чином, Моно сформулював вираз для визначення швидкості росту бактерій у такому вигляді:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s + S}, \quad (1.1)$$

де  $\mu$  – питома швидкість росту мікроорганізмів,  $\text{доба}^{-1}$ ,  $\mu_{\max}$  – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів,  $\text{доба}^{-1}$ ,  $K_s$  – кінетичний коефіцієнт,  $S$  – концентрація субстрату.

Згідно з цією моделлю, специфічні темпи росту сильно зростають для низької концентрації субстрату та повільно для високої концентрації субстрату, поки насичення бактерій не досягнеться.

Спорідненість бактерій до граничного субстрату виражається кінетичним коефіцієнтом  $K_s$  [29]. Для  $S < K_s$ , питома швидкість росту мікроорганізмів є лінійною, а  $K_s$  завжди більше нуля, тому  $S/(K_s + S)$  завжди менше, ніж 1, і, отже, питома швидкість росту менше ніж  $\mu_{\max}$ .

Точність моделі Моно для чистих культур і простих субстратів дуже висока [29]. Модель підходить для однорідних культур, але не для гетерогенних культур або складних субстратів [5].

Крім того, відомий вчений Феффер [36], довів, що кінетику Моно не можна використовувати для опису ТПОВ як складного субстрату. Крім того, фаза відставання не включена в модель Моно. З цієї причини було розроблено ряд модифікацій.

Модель Мозера [34] описує ріст, який відрізняється від експоненціальної характеристики. Тому автор удосконалив модель Моно з параметром  $n$  (зазвичай  $n > 1$ ) для інтеграції ефектів прийняття мікроорганізмів до стаціонарних процесів шляхом мутації. Для  $n=1$  специфічний темп зростання стає рівним моделі Моно:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n} \quad (1.2)$$

У працях Контва [9] зазначено не тільки залежність концентрації субстрату, але і концентрацію клітин для розрахунку питомої швидкості росту мікроорганізмів. Таким чином, виникає ефект затухання процесу бродіння [5]. Ця модель дає хороші результати як для періодичних, так і для безперервних процесів, але її здатність моделювати динамічні процеси сильно обмежена [36]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s \cdot X + S}. \quad (1.3)$$

У праці Пауелла [40] вказано не тільки кінетику реакції, але й дифузію та проникнення субстрату через клітинну стінку двома додатковими параметрами  $K$  і  $L$ , де  $K$  описує кінетику росту мікроорганізмів через активність ферменту, а параметр  $L$  – дифузію та проникність. Модель Пауелла має такий вигляд:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S + K + L}{2 \cdot L} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot L \cdot S}{(K + L + S)^2}}\right). \quad (1.4)$$

У працях Чена та Хашимото [8] охарактеризована модифікована модель Контва [9], в якій концентрація клітин, яка залежить від рівня розкладання субстрату, включається через зв'язок між концентрацією субстрату та початковою концентрацією субстрату  $S_i$ . Як наслідок, неможливо спрогнозувати невдачі процесу через гальмування росту мікроорганізмів. Проте, процес збоїв через ефекти вимивання можна передбачити. Дана модель має такий вигляд [23]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S/S_i}{K + \frac{(1-K) \cdot S}{S_i}}. \quad (1.5)$$

У моделі Мітсдорфера [28] розглянуто швидкість росту мікроорганізмів, що залежить від інших параметрів при виробництві біогазу  $G_s$  (в  $m^3/kg$  органічної сухої речовини). Параметр  $n$  становить 1,5 і вказує на підвищену спорідненість субстрату, тому що змішані бактеріальні культури потребують більш високого транспортування субстрату в порівнянні з чистими культурами. Модель Мітсдорфера має такий вигляд:



$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S^n}{S^n \cdot (1 + K_b \cdot G_s \cdot S^n)}. \quad (1.6)$$

Варто зазначити, що наведені моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які описано в працях J. Monod, H. Moser, E.O. Powell, Y. Chen, A.G. Hashimoto, F. Bergter, R. Mitsdörffer, є детермінованими та не враховують зміну протікання процесу на будь-якій стадії, а також технологічні відхилення параметрів процесу через неоднорідність середовища, різну структуру сировини, температуру та кислотність середовища. Водночас процеси анаеробного мікробіологічного бродіння є не детермінованими.

Одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ, є використання дискретних динамічних моделей (ДДМ), побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Такі математичні моделі описано у працях Matt E. Griffin, Katherine D. McMahon, Roderick I. Mackie, Lutgarde Raskin, Н.Б. Голуб, О.А. Козловець. Вони ураховують стохастичність процесів бродіння.

ДДМ є дискретними аналогами диференціальних рівнянь. На основі даних спостережень, отриманих у процесі експерименту синтезують загальний вигляд ДДМ [58-60, 65]. У працях українського вченого О. Г. Івахненка детально описано зазначений підхід [98-103]. У результаті застосування індуктивних методів знижуються часові затрати на синтез математичних моделей та їх спрощення через автоматизацію процесу синтезу. У загальному випадку ДДМ представляють у вигляді [103]:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-p}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \vec{g}, \quad k = p, \dots, K, \quad (1.7)$$

де  $\vec{f}(\bullet)$  – вектор невідомих базисних функцій, що задає структуру ДДМ;  $v_k$  – модельована характеристика для  $k$ -ї дискрети,  $k = p, \dots, K$ ;  $p$  – порядок ДДМ;

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$  – вектори вхідних змінних для  $k$ -ї дискрети, які у нашому випадку називаємо технологічними параметрами процесу;  $\vec{g} = (g_1, \dots, g_i)^T$  – вектор невідомих параметрів ДДМ.

Однак існуючі макромоделі не враховують можливості зміни протікання процесу на будь-якій його стадії, а також технологічних відхилень змінних процесу, через неоднорідність та різну структуру біосировини, температуру та кислотність середовища. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки, наприклад вимірювань, у результатах спостережень призводять до потреби застосування методів інтервального аналізу [83, 84].

Особливістю методів інтервального аналізу є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

На основі аналізу експериментальних даних та за умов представлення результатів експерименту в інтервальному вигляді, вектор оцінок параметрів  $\hat{\vec{g}}$  та вектор базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$  у виразі (1.7) отримуємо у такий спосіб, щоб забезпечити точність математичної моделі у межах похибок вимірювань значень модельованої характеристики, отриманих на основі експериментальних даних:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [v_k^-; v_k^+], \forall k = 0, \dots, K, \quad (1.8)$$

де  $[v_k^-; v_k^+]$  – інтервал значень модельованої характеристики для  $k$ -ї дискрети,  $k = 0, \dots, K$ , межі якого визначаємо на основі похибок вимірювання модельованої характеристики за виразами  $v_k^- = v_k - v_k \cdot \varepsilon$  та  $v_k^+ = v_k + v_k \cdot \varepsilon$ , де  $v_k$  – виміряне значення модельованої характеристики;  $\varepsilon$  – відносна похибка вимірювання;  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$  – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики для

$k$ -ї дискети,  $k=0,\dots,K$ . Замінюючи у виразі (1.7) дискретні значення характеристики на інтервальні, також з урахуванням умов (1.8) обчислюємо вектор оцінок  $\hat{g}$  невідомих параметрів дискретної динамічної моделі. Тоді вираз для інтервальної дискретної динамічної моделі (ІДДМ) набуває вигляду:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}, k = p, \dots, K. \quad (1.9)$$

Варто зауважити, що виконання умов (1.8) забезпечує можливість знаходження ІДДМ (1.9) із гарантованими прогностичними властивостями.

Таким чином, для побудови математичних моделей на різних стадіях процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у БГУ доцільно використовувати ДДМ (1.7). Для визначення її загального вигляду потрібно розв'язати задачі структурної та параметричної ідентифікації [135]. Як відомо, задача параметричної ідентифікації математичної моделі є етапом задачі структурної ідентифікації [38, 39, 83, 136].

Розглянемо детальніше особливості цих задач.

## **1.2. Аналіз методів в задачі параметричної ідентифікації на основі інтервальних даних**

Методи ідентифікації моделей систем поділяють на детерміновані і стохастичні [91].

До основних стохастичних методів розв'язування задач параметричної ідентифікації відносять: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності та методи випадкового пошуку [95].

Розглянемо класичний варіант методу найменших квадратів, в якому передбачається те, що модель процесу відома з точністю до значень невідомих параметрів:

$$v_k^M = \vec{f}^M(v_{k-p}, \dots, v_k, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k, \vec{g}), k = p, \dots, K. \quad (1.10)$$

Для визначення найкращих оцінок невідомих параметрів необхідно встановити міру наближення математичної моделі до отриманих експериментальних даних. Зокрема, у методі найменших квадратів таким критерієм є функція квадратів помилок, мінімальне значення якої і визначає оцінки параметрів [81]:

$$S(g_1, g_2, \dots, g_m) = \sum_{k=p}^K \delta^2 = \sum_{k=p}^K (v_{k+1} - \vec{f}^M(v_{k-p}, \dots, v_k; \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k; \vec{g}_1, \dots, \vec{g}_m))^2. \quad (1.11)$$

Існують численні методи розв'язання подібних задач, наприклад, метод найменших модулів, узагальнений, зважений чи рекурентний метод найменших квадратів [90]. Також існує ряд різних алгоритмів розв'язання подібних задач: від аналітичних і чисельних методів до пошукових методів. Однак при цьому основним недоліком цих методів є неможливість ослаблення або повністю уникнення невизначеностей, які зустрічаються при ідентифікації, тобто вибору виду моделі, похибок спостережень, кроку дискретизації тощо [90].

Так як і метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності дає можливість отримати тільки точкові оцінки параметрів. Аналіз зазначених методів показав, що вони не дають можливості врахувати розкид технологічних параметрів процесу, похибки вимірювань, неоднорідність та різну структуру біосировини. Тому для урахування вищезазначеного необхідно перейти до інтервальної форми представлення даних і використовувати критерій узгодження (1.8) між експериментальними і прогнозованими даними. Таким чином, для побудови математичних моделей доцільним є використання методів аналізу інтервальних даних [31-33, 64, 84, 105, 159].

У цьому випадку для знаходження оцінок параметрів ІДДМ, потрібно розв'язати інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [91] для деякого відомого вектора базисних функцій, що представлена в такому вигляді:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+], \\ [\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}, \\ v_k^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g} \leq v_k^+, k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (1.12)$$

Дану ІСНАР (1.12) отримуємо, підставляючи інтервальні оцінки вихідної характеристики  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$  (задані у вигляді початкових умов та прогнозовані на основі виразу (1.9) в умови (1.8).

Для знаходження хоча б одного розв'язку цієї системи, формулюють оптимізаційну задачу у вигляді [65]:

$$\delta(\hat{g}) \xrightarrow{\hat{g}} \min, \quad (1.13)$$

де  $\delta(\hat{g})$  – функція мети, яка описує якість наближення отриманих оцінок параметрів  $\hat{g}$  до оптимальних.

Загальний вигляд функції мети представляють у вигляді:

$$\delta(\hat{g}) = \max_{k=1, \dots, K} \{ |mid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) - mid([v_k])| \},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$  (1.14)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \{ |mid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) - wid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) \cap [v_k]| \},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K,$  (1.15)

де  $mid(\bullet)$  та  $wid(\bullet)$  – операції визначення центру та ширини інтервалу, відповідно.

Розв'язком задачі оптимізації (1.13) є вектор оцінок  $\hat{g}$  параметрів ІДДМ (1.9).

Як бачимо з вигляду дискретної функції мети (1.14), ця задача належить до класу NP-повних, а її алгоритм розв'язування побудований на процедурах випадкового пошуку [137]. До таких методів відносять:

- метод випадкового пошуку із лінійною тактикою;
- метод випадкового пошуку по найкращій спробі;
- метод випадкового пошуку із адаптацією розподілення випадкового кроку;
- метод випадкового пошуку на основі напрямного конуса.

Метод випадкового пошуку із лінійною тактикою дає можливість мінімізувати функцію мети за один етап при будь-яких початкових умовах, проте не володіє великим спектром можливих напрямків спуску.

Застосування методу випадкового пошуку по найкращій спробі містить операцію накопичування, що складається з декількох пробних кроків та за сукупністю незалежних проб рішення приймається за вибором найбільш вдалої. Але використання даного методу дає можливість потрапляння в таку зону, коли робочий крок робиться у бік збільшення функції мети.

Метод випадкового пошуку із адаптацією розподілення випадкового кроку володіє підвищеною швидкістю, але це не завжди покращує процес пошуку, оскільки процес оптимізації дуже швидко змінюється.

Використовуючи метод випадкового пошуку на основі напрямного конуса можна отримати адаптивні процедури глобального пошуку змінюючи величину кута. Зазначений метод характеризується також низькою обчислювальною складністю.

Для пошуку оптимальних параметрів ІДДМ при застосуванні будь-якого методу випадкового пошуку розв'язування задачі параметричної

ідентифікації виникають такі основні проблеми, а саме: вибір довжини кроку та вибір напрямку пошуку оптимуму [82].

На основі прикладів, описаних у працях [81] наявність цих проблем призводить або до «зациклення» при реалізації алгоритму вибраного методу, або до значного підвищення обчислювальної складності його реалізації. Варто зазначити, що метод випадкового пошуку на основі напрямного конуса є найбільш ефективним за критерієм мінімальної обчислювальної складності із забезпеченням його збіжності.

Тому розглянемо детальніше цей метод випадкового пошуку на основі напрямного конуса, суть якого полягає у наступному.

На кожному кроці цього методу пошуку будують гіперконус із вершиною у точці  $\hat{g}_l$ , кутом розкриття  $\psi$  і віссю  $\vec{w}$ . Цей гіперконус «відсікає» від гіперсфери з центром у точці  $\hat{g}_l$  і радіусом  $r$  деяку поверхню [82]. На отриманій поверхні обирають  $m$  випадкових точок за рівномірним законом розподілу, обчислюють у цих точках значення функції мети. Далі обирають точку  $\hat{g}_{l+1}$ , у якій значення функції мети найменше та визначають вектор пам'яті за формулою [95]:

$$\vec{w}_{l+1} = \alpha \cdot \vec{w}_l + \beta \cdot \frac{\hat{g}_{l+1} - \hat{g}_l}{r}, \quad (1.15)$$

де  $\alpha$  – ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) – коефіцієнт забування, а  $\beta$  – коефіцієнт інтенсивності врахування нової інформації.

Пошук продовжують доти, поки зменшується значення функції мети. Якщо функція мети не зменшується, то зменшують довжину кроку  $r$ . Зауважимо, що пошук зупиняють при досягненні необхідного значення функції мети або за бажанням дослідника.

Враховуючи обчислювальну складність алгоритмів методу параметричної ідентифікації проведено ряд досліджень залежності цієї

складності від розмірності задачі параметричної ідентифікації [95]. Унаслідок чого встановлено, що найбільш чутливим алгоритмом до зростання розмірності задачі є метод випадкового пошуку на основі направляючого конуса. Заразом він є найбільш ефективним.

Проте, зазначені методи параметричної ідентифікації не враховують множинності оцінок параметрів, через розкид технологічних параметрів процесу, похибок вимірювань, неоднорідність та різну структуру біосировини. Хибно вважають, що точкові оцінки параметрів, які є одним із розв'язків ІСНАР (1.12) ураховують технологічні відхилення. Водночас розкид технологічних параметрів процесу (температури чи кислотності середовища) та похибки у результатах спостережень призводять до множинності ІДДМ. Для отримання множини цих моделей необхідно розробити новий метод параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з множинним представленням оцінок їх параметрів. В теорії інтервального аналізу найчастіше використовують інтервальні оцінки значень параметрів для моделей. Такий підхід відзначається простотою обчислень і особливо є актуальним при побудові ІДДМ.

### **1.3. Аналіз методів в задачі структурної ідентифікації на основі інтервальних даних**

У працях [38, 69, 79, 89, 93, 141-143] досліджено та описано методи структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів. Серед найефективніших із них слід відзначити такі:

- метод групового урахування аргументів (МГУА);
- метод редукції структури математичної моделі;
- метод «нарощування» структури математичної моделі.

Основними недоліками цих методів є наступне. У МГУА не існує єдиного загального правила завершення процедури структурної ідентифікації. Критерієм завершення процедури може бути обрано лише



один із сформульованих наступним чином: середнє значення похибки прогнозування наступного ряду селекції більше за значення похибки на попередньому ряді; мінімальне значення похибки прогнозування наступного ряду селекції більше від мінімального значення похибки попереднього ряду тощо [131, 132, 134].

Також цей метод не забезпечує побудову моделей із гарантованими прогностичними властивостями, тому що він ґрунтується на зовнішніх критеріях, таких як критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними, що є не придатними у тому випадку, коли експериментальні дані представлені в інтервальному вигляді [89]. МГУА характеризується високою обчислювальною складністю [102], так як одночасне застосування принципів цього методу та критерію верифікації інтервальної моделі (1.8), у випадку ідентифікації моделі з гарантованими прогностичними властивостями, призводить до необхідності багаторазового розв'язування задачі параметричної ідентифікації.

Основним недоліком методу редукції структури математичної моделі є те, що невідомими є порядок та степінь дискретної динамічної моделі, які необхідно визначити для формування початкової структури. Застосування методу редукції, призводить до неможливості знаходження єдиного розв'язку задачі структурної ідентифікації та до суттєвого збільшення обчислювальної складності [125]. А також, при вилученні структурних елементів не враховують їх взаємодію з іншими компонентами математичної моделі [83]. А це призведе до втрати значущих структурних елементів оптимальної математичної моделі [27].

Через неможливість виявлення важливих структурних елементів математичної моделі, застосування методу послідовного включення чи «наращування» структури математичної моделі може призвести до переускладнення її структури [83]. Крім того, метод «наращування» характеризується високою обчислювальною складністю унаслідок ускладнення структури математичної моделі шляхом додавання нових

структурних елементів та проведення процедури параметричної ідентифікації.

Не зважаючи на вказані недоліки зазначених методів їх перевагою є строге теоретичне обґрунтування. Водночас основним недоліком усіх методів є неможливість їх застосування у випадку потреби врахування розкиду технологічних параметрів процесу, похибок вимірювань, неоднорідності та різної структури біосировини, оскільки в цьому випадку вихідними для ідентифікації є інтервальні дані.

Для розв'язування задач подібного класу, які математично зводяться до задач дискретної оптимізації, застосовують: метод структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів; методи та алгоритми, які ґрунтуються на принципах ройового інтелекту, до яких відносять алгоритм бджолоїної колонії, мурашині, зозулі тощо.

У працях [62, 113, 131, 134, 148] розглянуто метод структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІДДМ на основі генетичних алгоритмів із модифікованими операторами селекції та схрещування. Варто зазначити, що ці алгоритми активно застосовують такі основні процедури, як схрещування, селекцію та мутацію [62].

До недоліків цього методу структурної ідентифікації відносять: збільшення початкової кількості структур ІДДМ (особин популяції), адже вона прямо пропорційно залежить від кількості структурних елементів (генів); відсутність прийнятної структури ІДДМ після завершення процедури структурної ідентифікації унаслідок втрати важливих компонентів моделі; нераціональний випадковий вибір структур ІДДМ для схрещування, тобто схрещування відібраних структур ІДДМ відбувається із застосуванням оператора «схрещування», який побудовано на принципі «розіграшу лотереї», де відбувається попарне «схрещування» структур, які відбирають із множини кращих структур ІДДМ випадковим чином; неефективність механізму уникнення локальних екстремумів складної багатоекстремальної

функції мети задачі структурної ідентифікації, внаслідок застосування оператора мутації [62, 131].

Спільними ознаками методів на основі ройового інтелекту та у генетичних алгоритмів те, що ініціалізація початкової популяції здійснюється випадковим чином, використання відомих значень функції мети для оцінювання знайдених розв'язків тощо [136]. Проте, на відміну від генетичних алгоритмів, методи, що базуються на основі ройового інтелекту, не використовують генетичних операторів, таких як схрещення чи мутації [126, 148]. Натомість особини популяції локально взаємодіють та змінюють швидкості, а також мають пам'ять [132]. Крім того, механізми взаємодії між особинами популяції у ройових та генетичних алгоритмах є абсолютно різними [147]. Зокрема в генетичних алгоритмах хромосоми обмінюються інформацією попарно, тому вся популяція рухається синхронно у напрямку екстремуму функції мети, а у ройових алгоритмах – взаємодія між особинами популяції відбувається локально, що також забезпечує виявлення локальних екстремумів та відповідно швидше знаходження глобального екстремуму функції мети [107]. Основною перевагою методів на основі ройового алгоритму є менша кількість параметрів алгоритму.

Як уже зазначалося, до основних методів ройових алгоритмів відносять: мурашиний алгоритм, алгоритм рою часток, алгоритм зозулі, алгоритм бджолоїної колонії тощо [131].

В основу цих методів покладено принцип об'єднання особини у зграї чи колонії для покращення умов своєї життєдіяльності. Тобто у контексті розв'язування задачі ідентифікації, будь-яка колонія живих організмів у процесі функціонування ефективно вирішує оптимізаційні і, як правило, багатокритеріальні задачі.

Алгоритм бджолоїної колонії, на відміну від інших ройових алгоритмів, містить ефективний механізм для уникнення локальних екстремумів функції мети, а також дозволяє легко встановити основні аналогії між особливостями харчової поведінки бджолоїної колонії та основними поняттями задачі

структурної ідентифікації. У контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії представлений алгоритм моделює поведінку медоносних бджіл у процесі пошуку джерел нектару [25].

Враховуючи вище зазначене, в подальшому дослідженні для розв'язування задачі структурної ідентифікації доцільно використовувати алгоритм бджолоїної колонії.

Також базуючись на аналіз методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів перейдемо безпосередньо до постановки задачі структурної ідентифікації ІДДМ із використанням алгоритму бджолоїної колонії.

Суть цього алгоритму, полягає в оптимізації деякої функції мети, яка залежить від вибраного набору структурних елементів [7]. Позначимо за  $\lambda_s$  поточну структуру ДДМ:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \subset \Lambda, \quad (1.16)$$

де  $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$  – набір структурних елементів, що задає поточну  $s$ -ту структуру ІДДМ,  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина усіх структурних елементів,  $F = \{f_1(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_l(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_L(\vec{v}_{k-1})\}$ , де  $|F| = L$  (потужність множини  $F$ );  $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$  – вектор невідомих значень параметрів, який для поточної структури ІДДМ оцінюватиметься на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [137];  $\Lambda$  – множина усіх можливих структур ІДДМ.

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури  $\lambda_0$  ІДДМ у вигляді (1.16), тому сформулюємо нову ІДДМ:

$$[v_k^-; v_k^+] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_{m_0}^0. \quad (1.17)$$

Наведена вище ІДДМ (1.17), повинна задовільняти умови (1.8), тобто забезпечувати належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

У випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектора базисних функцій (поточної структури  $\lambda_s$  ІДДМ) і знаходженні інтервальних оцінок параметрів ІДДМ.

Якість поточної структури ІДДМ оцінюватимемо за значенням функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  обчислюватимемо за допомогою виразів, вигляд яких для фіксованої структури такий [136]:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([v_k]) \right| \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$  (1.18)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) - \text{wid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) \cap [v_k] \right| \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K;$  (1.19)

Вираз (1.18) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (1.19) у випадку  $\delta(\lambda_s) = 0$  забезпечує виконання умови (1.17).

Тепер задачу структурної ідентифікації ІДДМ запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму функції мети  $\delta(\lambda_s)$  [129]:

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \vec{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}^s(\bullet) \in F. \quad (1.20)$$

Із виразів (1.18) та (1.19) бачимо, що для обчисленого значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  для фіксованої структури  $\lambda_s$  ІДДМ за будь-яких умов

справедливою буде нерівність  $\delta(\lambda_s) \geq 0$ . Таким чином, можна стверджувати, що функція мети  $\delta(\lambda_s)$  має глобальний екстремум лише у тих точках, для яких виконується наступна рівність:  $\delta(\lambda_s) = 0$ . У просторі пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації ІДДМ функція  $\delta(\lambda_s)$  має багато глобальних мінімумів [58].

Чим менше значення  $\delta(\lambda_s)$ , тим «краща» поточна структура ІДДМ. Якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то поточна структура ІДДМ дає можливість побудувати адекватну модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

Реалізація методу структурної ідентифікації забезпечує мінімізацію функції мети (1.20) у спосіб перетворення послідовності структур  $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$  через застосування деяких операторів, які є аналогами відповідних процедур із поведінкової моделі бджолоїної колонії [24].

Зазначений метод структурної ідентифікації із використанням алгоритму бджолоїної колонії відзначаються високою обчислювальною складністю через емпіричний вибір операторів перетворення послідовності структур. Зокрема, це стосується оператора синтезу множини поточних структур, який перетворює структуру різницевого рівняння у вигляді (1.17) за допомогою лінійного показника «інтенсивності пошуку джерела нектару» [131].

Іншим недоліком цього методу є множинність структур для моделі, тому для забезпечення єдиного розв'язку необхідно поєднати метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі використання поведінкових моделей бджолоїної колонії у спосіб введення параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

#### 1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження

Унаслідок проведеного аналізу математичних моделей біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у БГУ встановлено, що такі моделі є детермінованими. З'ясовано, що процеси анаеробного мікробіологічного бродіння мають недетерміністичний характер, тому одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ, є використання математичних моделей у вигляді ДДМ, побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Однак існуючі математичні моделі не враховують можливості зміни протікання процесу на будь-якій його стадії, а також технологічних відхилень змінних процесу, через неоднорідність та різну структуру біосировини, температуру та кислотність середовища. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки, наприклад вимірювань, у результатах спостережень призводять до потреби застосування методів інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

Методи ідентифікації моделей систем поділяють на детерміновані і стохастичні. До основних стохастичних методів розв'язування задач параметричної ідентифікації відносять: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності та методи випадкового пошуку.

Для визначення оптимальних оцінок невідомих параметрів необхідно встановити міру наближення математичної моделі до отриманих експериментальних даних. Зокрема, у методі найменших квадратів таким критерієм є функція квадратів помилок, мінімальне значення якої і визначає оцінки параметрів.

Так як і метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності дає можливість отримати тільки точкові оцінки параметрів. Аналіз зазначених методів показав, що вони не дають можливості врахувати

розкид технологічних параметрів процесу, похибки вимірювань, неоднорідність та різну структуру біосировини. Тому для урахування вищезазначеного необхідно перейти до інтервальної форми представлення даних і використовувати критерій узгодження (1.8) між експериментальними і прогнозованими даними. Таким чином, для побудови математичних моделей доцільним є використання методів аналізу інтервальних даних.

Основною задачею, яку необхідно розв'язати в процесі параметричної ідентифікації є задача розв'язку ІСНАР. Для знаходження хоча б одного розв'язку системи розв'язують оптимізаційну задачу з нелінійною дискретною функцією мети. Проаналізовано методи випадкового пошуку для розв'язання цієї задачі та обґрунтовано використання методу випадкового пошуку на основі напрямного конуса Растрігіна.

Проте, зазначені методи параметричної ідентифікації не враховують множинності оцінок параметрів, через розкид технологічних параметрів процесу, похибок вимірювань, неоднорідність та різну структуру біосировини. Хибно вважати, що точкові оцінки параметрів, які є одним із розв'язків ІСНАР (1.12), ураховують технологічні відхилення. Водночас розкид технологічних параметрів процесу (температури чи кислотності середовища) та похибки у результатах спостережень призводять до множинності ІДДМ. Для отримання множини цих моделей необхідно розробити новий метод параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з множинним представленням оцінок їх параметрів, зокрема – інтервальних.

Досліджено та описано методи структурної ідентифікації математичних моделей, а саме: метод редукції структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; метод «нарощування» структури математичної моделі. Основним недоліком усіх методів є неможливість їх застосування у випадку потреби врахування розкиду технологічних параметрів процесу, похибок вимірювань, неоднорідності та різної структури біосировини, оскільки в цьому випадку вихідними для ідентифікації є інтервальні дані.



Проаналізовано методи на основі генетичних алгоритмів. Показано їх надзвичайно високу обчислювальну складність та множинність структур в залежності від початкових умов.

Обґрунтовано застосування для розв'язання задач структурної ідентифікації ІДДМ методів на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Показана, що існуючий метод також має високу обчислювальну складність, яка в першу чергу пов'язана з емпіричним вибором операторів перетворення структур. Іншим, і основним, недоліком цього методу є множинність структур, що не дає можливості отримати моделі з однаковою структурою. Тому, для забезпечення єдиного розв'язку необхідно поєднати метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі використання поведінкових моделей бджолоїної колонії у спосіб введення параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

На основі проведеного аналізу, визначено мету дисертаційного дослідження. Отже, метою є побудова та дослідження математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із урахуванням технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях на основі розробки та застосування методу параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та методу структурної ідентифікації цих моделей із застосуванням алгоритмів бджолоїної колонії для зменшення його часової реалізації.

Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено наступні **завдання:**

- провести аналіз моделей процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння та відомих методів структурної і параметричної ідентифікації цих моделей;
- розробити метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх характеристик;
- удосконалити метод структурної ідентифікації ДДМ із застосуванням інтервальних даних та алгоритмів бджолоїної колонії;

- розробити математичні моделі кожної стадії анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках з урахуванням технологічних відхилень змінних такого процесу;

- розширити можливості програмного продукту для ідентифікації інтервальних дискретних моделей процесів та провести його апробацію в практичних застосуваннях.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Встановлено, що існуючі моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які побудовано на біохімічних рівняннях, є детермінованими, внаслідок чого у випадку різної структури сировини, що є типовим у БГУ, такі моделі використовувати недоцільно. Тому для ефективного управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння потрібно будувати та застосовувати математичні моделі для різних стадій процесу.

2. З'ясовано, що процеси анаеробного мікробіологічного бродіння носять недетерміністичний характер, тому одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ, є використання математичних моделей у вигляді ДДМ, побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок вимірювань у результатах спостережень необхідно застосовувати методи інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

3. Проаналізовано існуючі методи параметричної ідентифікації ІДДМ. Показано, що зазначені методи параметричної ідентифікації не враховують множинності оцінок параметрів, які спричинені урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу, похибок вимірювань, неоднорідності та різної структури біосировини. Встановлено, що для розв'язання задач ідентифікації параметрів на основі аналізу інтервальних даних слід використовувати методи випадкового пошуку. За результатами аналізу цих методів встановлено, що всі вони зорієнтовані на пошук точкових оцінок параметрів. Це не дає можливість отримати ДДМ із інтервальним представленням параметрів.

4. Проаналізовано методи структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей, а саме: метод редукції структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; метод «нaroщування» структури математичної моделі. Показано, що вони характеризуються високою обчислювальною складністю та зорієнтовані на використання експериментальних даних без урахування розкиду технологічних параметрів процесу та різної структури біосировини.

5. Обґрунтовано використати метод структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Встановлено, що він відзначається високою обчислювальною складністю через емпіричний вибір операторів перетворення структур. Інший недолік цього методу є множинність структур для моделі, тому для забезпечення єдиного розв'язку необхідно поєднати метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та метод параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНОЇ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ В ІНТЕРВАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

У першому розділі розглянуто існуючі методи параметричної ідентифікації, що ґрунтуються на випадковому пошуку вектора параметрів. Встановлено, що для розв'язування задачі параметричної ідентифікації доцільно використовувати метод випадкового пошуку на основі напрямного конуса Растрігіна. Основним недоліком цього методу є отримання точкових оцінок параметрів ІДДМ, що з одного боку не дає можливості врахувати невизначеність, пов'язану із розкидом технологічних параметрів та похибок спостереження за характером процесу бродіння, а з іншого боку призводить до множинності структур ІДДМ. Тому одним із шляхів урахування цих невизначеностей є розробка методу ідентифікації множинних оцінок параметрів для єдиної структури моделі. Одним із способів отримання цих оцінок є інтервальний підхід, коли оцінки параметрів моделі отримують у вигляді числових інтервалів і при цьому структура моделі залишається незмінною. Водночас зазначений підхід суттєво ускладнює задачу параметричної ідентифікації.

Матеріали цього розділу опубліковано автором у працях [71, 72, 76].

#### **2.1. Множина розв'язків задачі параметричної ідентифікації інтервальної дискретної динамічної моделі**

У першому розділі розглянуто ДДМ (1.1) для автономної системи у загальному вигляді. Проте, на практиці досить часто потрібно враховувати ще фактори які впливають на характер процесу. Тобто, замість традиційно використаної автономної моделі доцільно використовувати неавтономну модель.

Як бачимо з (1.1), при відомій фіксованій структурі цієї моделі, невизначеність, пов'язана із розкидом технологічних параметрів та похибок спостережень за характером процесу бродіння, може бути врахована при оцінюванні параметрів цієї моделі внаслідок зміни технологічних параметрів, які для неавтономної моделі є вхідними змінними. У такому випадку отримаємо [90]:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-p}, \dots, v_{k-1}) \cdot \vec{g}(\vec{u}), \quad k = p, \dots, K. \quad (2.1)$$

У рівнянні (2.1) коефіцієнти  $g_i$ , замінено на невідомі функції  $g_i(\vec{u})$ , що залежать від зовнішніх вхідних змінних – технологічних параметрів процесу.

Опираючись на вираз (2.1) по аналогії з виразом для автономної ІДДМ (1.8), запишемо ІДДМ для неавтономної системи:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-]) \cdot \hat{g}(\vec{u}), \quad k = p, \dots, K. \quad (2.2)$$

Отже, якщо ІДДМ процесу має вигляд (2.2), то для її налаштування на основі інтервальних даних (за аналогією з методом розглянутим в працях [91, 92]), потрібно розв'язати ІСНАР, що представлена в такому вигляді:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+], \\ [\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}(\vec{u}), k = p, \dots, K. \\ v_k^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}(\vec{u}) \leq v_k^+, k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (2.3)$$

Отримана ІСНАР є достатньо складною, оскільки містить функції параметрів  $g_i(\vec{u})$ , які залежать від вхідних змінних. Як вже зазначалось, уведення цих змінних пов'язано із потребою урахування зміни технологічних параметрів. Тому розв'язки цієї системи можливо отримати тільки у дуже простих випадках, які переважно не мають практичного застосування.

Водночас урахувати вплив розкиду технологічних параметрів процесу на характеристику процесу можна визначивши гарантовані межі зміни значень параметрів моделі в залежності від розкиду значень технологічних параметрів (вхідних змінних), тобто:

$$\widehat{g}(\vec{u}) \in [\widehat{g}^-, \widehat{g}^+],$$

де  $[\widehat{g}^-, \widehat{g}^+]$  – вектор інтервалів можливих значень параметрів ІДДМ.

У такому випадку ІДДМ процесу будемо представляти таким різницеvim інтервальним рівнянням:

$$[\widehat{v}_k] = [\widehat{v}_k^-; \widehat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\widehat{v}_{k-p}^-], \dots, [\widehat{v}_{k-1}^-]) \cdot [\widehat{g}^-, \widehat{g}^+] \quad k = p, \dots, K. \quad (2.4)$$

Звідси, ІСНАР (2.3) набуває такого вигляду:

$$\begin{cases} [\widehat{v}_0^-; \widehat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\widehat{v}_1^-; \widehat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\widehat{v}_{p-1}^-; \widehat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+], \\ [\widehat{v}_k] = [\widehat{v}_k^-; \widehat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\widehat{v}_{k-p}^-; \widehat{v}_{k-p}^+], \dots, [\widehat{v}_{k-1}^-; \widehat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\widehat{g}], \\ v_k^- \leq \vec{f}^T([\widehat{v}_{k-p}^-; \widehat{v}_{k-p}^+], \dots, [\widehat{v}_{k-1}^-; \widehat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\widehat{g}] \leq v_k^+, k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (2.5)$$

Як бачимо, отримана ІСНАР відрізняється від ІСНАР в класичному випадку, оскільки містить невідомі оцінки параметрів ІДДМ в інтервальному вигляді. Тому для її розв'язування не придатні відомі методи, які побудовано на основі процедур випадкового пошуку і зорієнтовані на пошук точкових оцінок параметрів.

Область розв'язків ІСНАР (2.5) є складною для представлення. У загальному випадку не існує методів її точного оцінювання. З метою обґрунтування цього твердження розглянемо простий приклад оцінювання параметрів ІДДМ – як розв'язків ІСНАР (2.5).

Нехай процес анаеробного мікробіологічного бродіння можна представити у вигляді такого різницевого рівняння [56]:

$$v_k = v_{k-1} + (g_1 \cdot v_{k-1} - g_2 \cdot v_{k-1}^2) \cdot T, \quad (2.6)$$

де  $v_k$  – об'єм виходу біогазу,  $g_1$ ,  $g_2$  – невідомі параметри моделі,  $T$  – крок дискретизації.

За загальною схемою ідентифікації параметрів, спочатку сформулюємо задачу математично у вигляді такої ІСНАР:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], \\ v_k^- \leq [\hat{v}_{k-1}^-] + ([\hat{g}_1] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-]) - [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-]^2 \cdot T \leq v_k^+, \\ v_{k+1}^- \leq [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] + ([\hat{g}_1] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) - \\ - [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot T \leq v_{k+1}^+, k = 1, \dots, K. \end{cases} \quad (2.7)$$

Якщо в інтервальну систему (2.7) підставити інтервальні дані – результати експерименту, то розв'язком цієї системи є множина оцінок  $\hat{g}_i$  ( $i = 1, 2$ ) параметрів, а результатом розв'язування задачі ідентифікації у випадку представлення оцінок параметрів в інтервальному вигляді є така ІДДМ:

$$[v_k^-; v_k^+] = [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+] + ([g_1] \cdot [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) - [g_2] \cdot [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+] \cdot [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+] \cdot T. \quad (2.8)$$

Як бачимо, ІСНАР (2.7) складається із  $K$  рівнянь, які необхідно сформулювати на основі рекурентної процедури.

Проілюструємо складність формування самої ІСНАР (2.7) на прикладі двох перших інтервальних рівнянь, які відповідають двом першим дискретам процесу за виключенням дискрет, в яких задано початкові умови.

Побудована ІСНАР для цього випадку має такий вигляд:



$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], \\ v_1^- \leq [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + ([\hat{g}_1] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+]) - [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot T \leq v_1^+, \\ v_2^- \leq [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + 2 \cdot T \cdot [\hat{g}_1] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T \cdot [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - \\ - T^2 \cdot [\hat{g}_1] \cdot [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T \cdot [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - 2 \cdot T^2 \cdot [\hat{g}_1] \cdot [\hat{g}_2] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + \\ + 2 \cdot T^2 \cdot ([\hat{g}_2])^2 \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + 2 \cdot T^3 \cdot [\hat{g}_1] \cdot ([\hat{g}_2])^2 \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - \\ - T^2 \cdot ([\hat{g}_2])^3 \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \leq v_2^+. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Далі задаємо дані в таблиці 1 для ідентифікації параметрів ІДМ (2.8).

Таблиця 2.1

Результати вимірювань виходу біогазу анаеробного мікробіологічного бродіння

№ дискрети $k$	Діб	$v_k^-$ , $\text{дм}^3$	$v_k^+$ , $\text{дм}^3$
0	1	0,028	0,032
1	2	0,036	0,042
2	3	0,047	0,053

Із урахуванням таблиці інтервальних даних, ІСНАР (2.9) (без урахування початкових умов) матиме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,199 \leq [0,028; 0,032] + ([\hat{g}_1] \cdot [0,028; 0,032]) - [\hat{g}_2] \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] \cdot T \leq 0,221; \\ 0,456 \leq [0,028; 0,032] + 2 \cdot T \cdot [\hat{g}_1] \cdot [0,028; 0,032] - T \cdot [\hat{g}_2] \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] - \\ - T^2 \cdot [\hat{g}_1] \cdot [\hat{g}_2] \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] - T \cdot [\hat{g}_2] \cdot [0,028; 0,032] - 2 \cdot T^2 \cdot [\hat{g}_1] \cdot [\hat{g}_2] \times \\ \times [0,028; 0,032] + 2 \cdot T^2 \cdot ([\hat{g}_2])^2 \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] + 2 \cdot T^3 \cdot [\hat{g}_1] \cdot ([\hat{g}_2])^2 \times \\ \times [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] - T^2 \cdot ([\hat{g}_2])^3 \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] \cdot [0,028; 0,032] \leq 0,504. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Як бачимо, перше інтервальне рівняння отримано на основі початково заданих умов, а друге – рекурентно з першого у спосіб підстановки розв'язку цього рівняння в умови для другої дискрети.

Представимо розв'язок цієї системи графічно. На рис. 2.1 та 2.2 сірим кольором зображено множини розв'язків першого та другого рівнянь системи (2.10), відповідно.

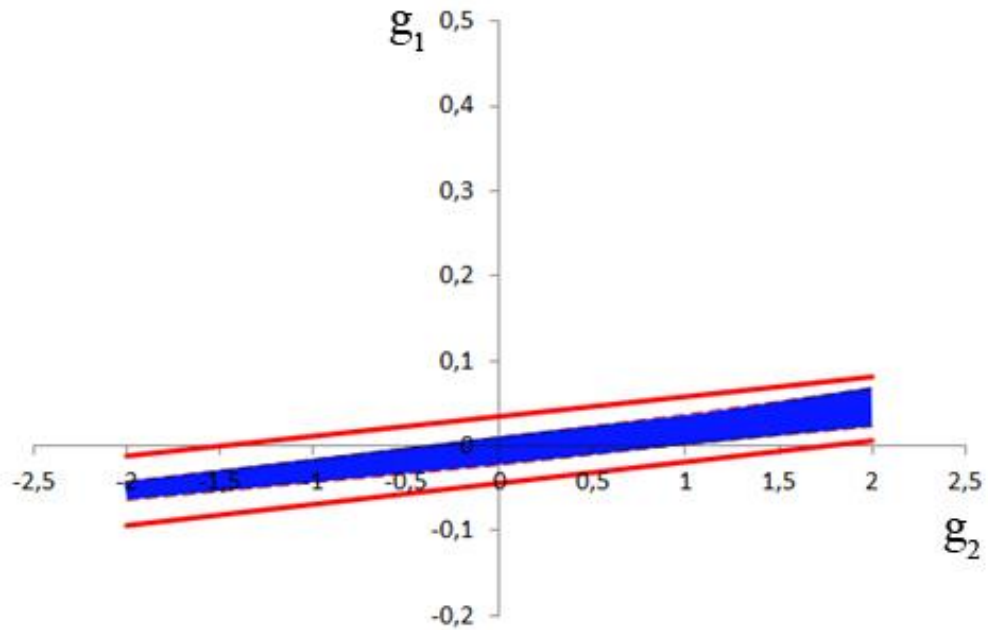


Рисунок 2.1 – Множина розв'язків першого рівняння ІСНАР (2.10)

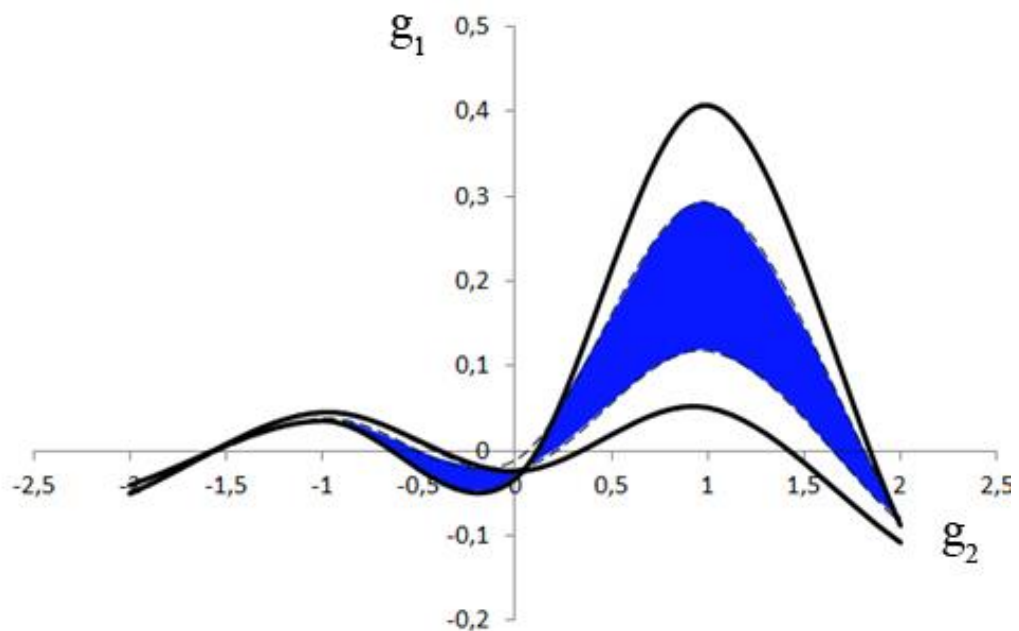


Рисунок 2.2 – Множина розв'язків другого рівняння ІСНАР (2.10)

Аналіз спільного розв'язку цих рівнянь (оскільки вони утворюють систему) показує, що на множині значень параметрів  $\hat{g}_1$ ,  $\hat{g}_2$  їх розв'язком є розірвана та не опукла область. Цю область розв'язків зображено на рис. 2.3 у вигляді двох частин сірим кольором.

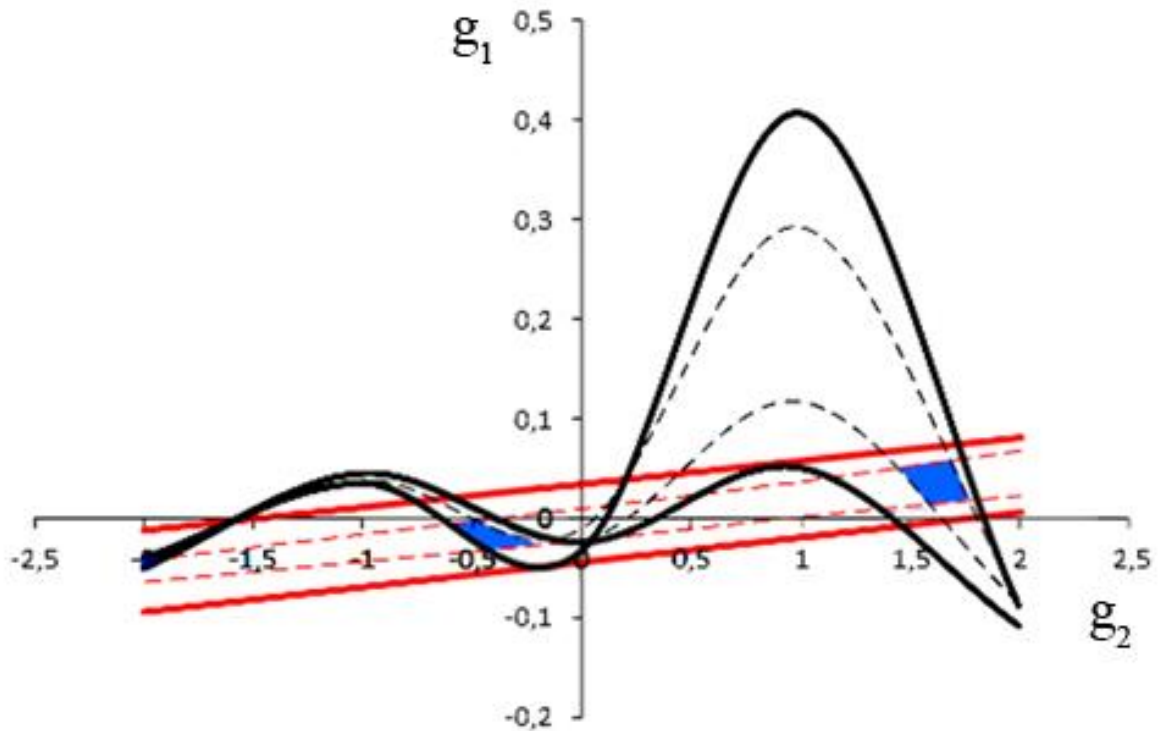


Рисунок 2.3 – Спільна область розв’язків ІСНАР (2.10)

Позначимо множину розв’язків цієї ІСНАР за  $\Omega$ .

Опираючись на традиційні відомі в інтервальному аналізі методи оцінювання множини розв’язків ІСНАР в інтервальному вигляді, на рис. 2.4 та 2.5 також наведено допустимі та гарантовані інтервальні оцінки параметрів ІДДМ, відповідно, які в загальному випадку можуть бути обчислені як не єдино можливими.

Як бачимо із рисунків, область, яку зображено незаштрихованим прямокутником, означає гарантовані інтервальні оцінки параметрів ІДДМ, а область яку зображено заштрихованим прямокутником позначає допустимі інтервальні оцінки параметрів ІДДМ.

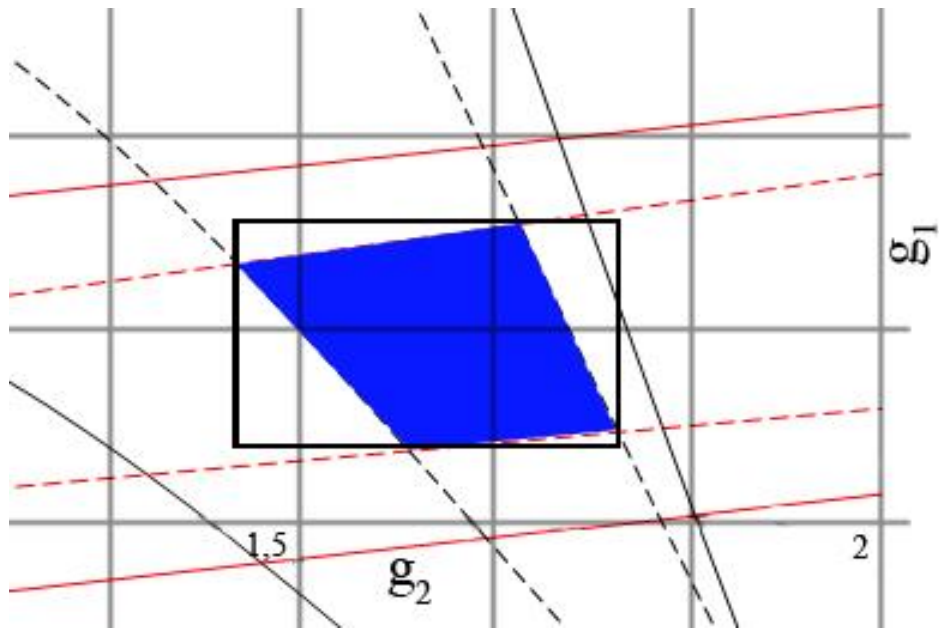


Рисунок 2.4 – Гарантовані інтервальні оцінки параметрів ІДДМ

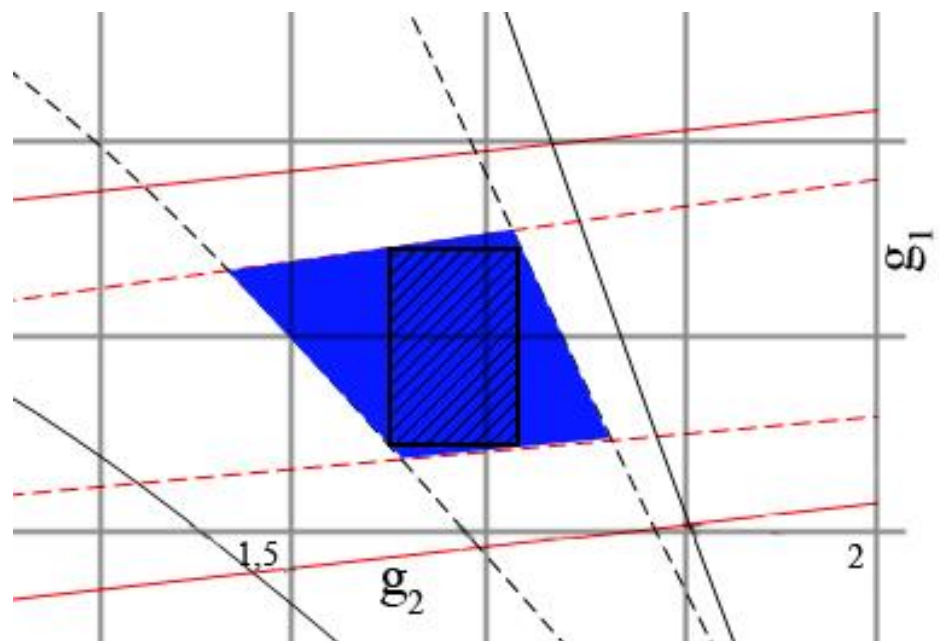


Рисунок 2.5 – Допускові інтервальні оцінки параметрів ІДДМ

На рис. 2.6 наведено область розв'язків ІСНАР (2.10) спільно з інтервальними гарантованими та допустимими її оцінками. Як бачимо, область  $\Omega$ , що зображена на рисунку сірим кольором, є спільним розв'язком двох рівнянь ІСНАР. Гарантована оцінка розв'язку цієї системи є достатньо «грубою», оскільки включає достатньо велику область, яка не є розв'язком

ІСНАР (2.10). На одній із частин області позначено також точкову оцінку розв'язку.

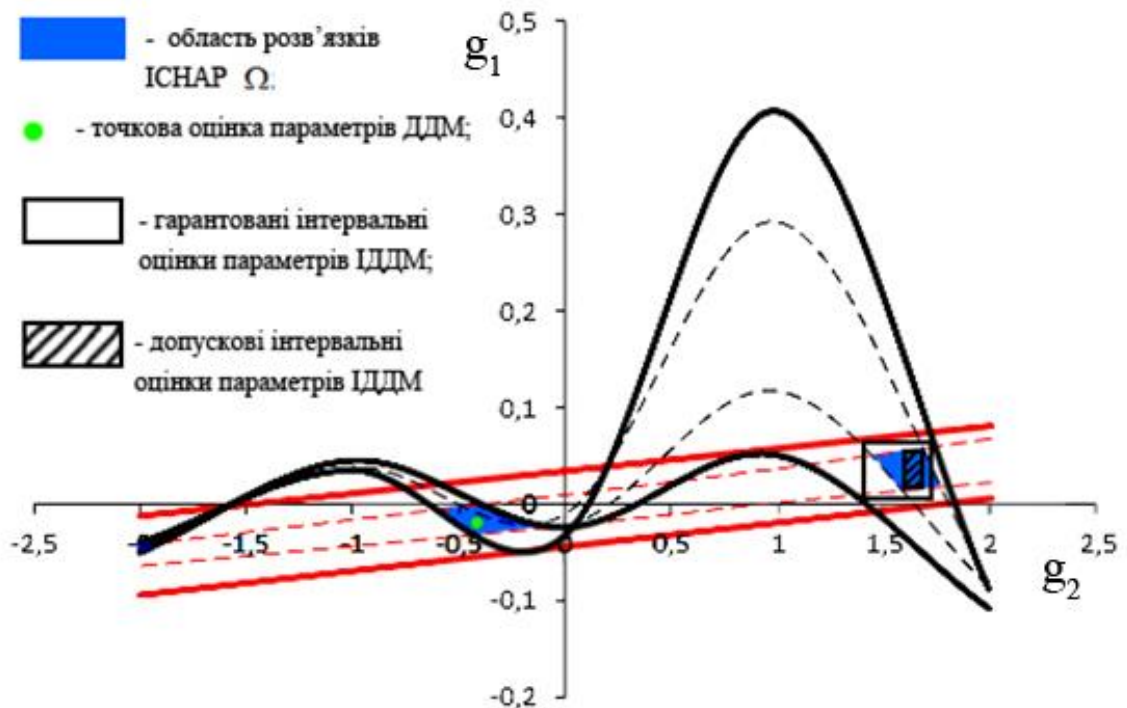


Рисунок 2.6 – Множина розв'язків ІСНАР (2.10) з гарантованими та допустими інтервальними її оцінками

Із проведеного аналізу випливають такі узагальнення:

1) задача параметричної ідентифікації ІДДМ з урахування початкових умов в інтервальному вигляді для прогнозованої характеристики є задачею розв'язку ІСНАР;

2) точкові оцінки розв'язку ІСНАР є вектором параметрів ІДДМ процесу, які відображають його характер при фіксованих значеннях технологічних параметрів процесу і не відображають можливий розкид цих параметрів;

3) розв'язок цієї задачі – не опукла (в загальному випадку розірвана) область оцінок параметрів моделі динамічної системи;

4) доцільно враховувати хоча б межі зміни параметрів ІДДМ в залежності від зміни технологічних умов процесу у вигляді гарантованих чи допустимих інтервальних оцінок цих параметрів;

5) з огляду на обчислювальну складність розв'язування цієї задачі, навіть для простого прикладу, актуальним завданням є аналіз та розробка простих можливих обчислювальних схем обчислення інтервальних оцінок множини розв'язків ІСНАР.

## 2.2. Метод обчислення гарантованих інтервальних оцінок параметрів ІДДМ

Як було проілюстровано на прикладі в попередньому підрозділі, невизначеність у випадку спостережень за характеристикою процесу, або зміна технологічних параметрів процесу призводять до задачі множинної ідентифікації параметрів ІДДМ. Математично, це означає обчислення розв'язків ІСНАР (2.5), або знаходження інтервальних оцінок цих розв'язків. Відносно простішою є ситуація, коли необхідно обчислити гарантовані інтервальні оцінки розв'язків ІСНАР (2.5) на окремих зв'язаних сегментах загальної області розв'язків.

Для знаходження гарантованих інтервальних оцінок параметрів ІДДМ задачу ідентифікації формулюємо у такому вигляді:

$$\delta([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}^-; \hat{g}^+]} \min, \quad (2.11)$$

з обмеженнями на значення параметрів, заданими ІСНАР (2.5), тобто за умови:

$$[\hat{g}^-; \hat{g}^+] \supseteq \Omega. \quad (2.12)$$

У виразі (2.11)  $\mathcal{D}([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$  – функція мети, яка описує якість наближення отриманих інтервальних оцінок до оптимальних. Зазначена функція визначає розміри області гарантованих інтервальних оцінок. Як витікає із аналізу, проведеного у попередньому підрозділі, геометрично ця область є прямокутником (в загальному вигляді  $m$ -вимірним прямокутним паралелепіпедом). Тому функція мети  $\mathcal{D}([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$  в задачі (2.11), (2.12) оптимізації гарантованих інтервальних оцінок може означати, наприклад мінімізацію об’єму цього паралелепіпеда. У такому випадку її можна переписати у вигляді  $2m$  задач математичного програмування:

$$\hat{g}_i^+ = \hat{g}_i \longrightarrow \max, i = 1, \dots, m, \quad \hat{g}_i^- = \hat{g}_i \longrightarrow \min, i = 1, \dots, m, \quad (2.13)$$

за виконання обмежень на множину допустимих розв’язків, що співпадає з множиною розв’язків ІСНАР (2.5). Цю множину розв’язків формально можна представити у вигляді рекурентної послідовності інтервальних нелінійних рівнянь системи (2.5):

$$\begin{aligned} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] &\subseteq [v_0^-; v_0^+], [\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+] \subseteq [v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \\ v_{p+1}^- &\leq \tilde{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}] \leq v_{p+1}^+, \\ v_{p+2}^- &\leq \tilde{f}^T(\tilde{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}] \leq v_{p+2}^+, \\ v_{p+3}^- &\leq \tilde{f}^T(\tilde{f}^T(\tilde{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}] \leq v_{p+3}^+, \\ v_{p+4}^- &\leq \tilde{f}^T(\tilde{f}^T(\tilde{f}^T(\tilde{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}]) \cdot [\hat{g}] \leq v_{p+4}^+, \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2.14)$$

Варто зауважити, що умови (2.14) задають допустиму область розв’язків задач (2.13), визначену як розв’язки ІСНАР (2.5).

Як бачимо, задача знаходження гарантованих інтервальних оцінок параметрів ІДДМ є задачею математичного програмування з лінійною

функцією мети і нелінійними обмеженнями. Хоча область допустимих розв'язків такої задачі є не опуклою, але цільова функція лінійною. Можна стверджувати, що розв'язок задачі (2.13) за умов (2.14) досягається на межі області допустимих розв'язків.

Зважаючи на простоту цільових функцій (2.13), задачу обчислення гарантованих інтервальних оцінок параметрів, сформульовану як задачу умовної оптимізації, можна звести до задачі безумовної оптимізації із використанням методу невизначених множників Лагранжа [109]. Слід зауважити, що це є один з кращих методів розв'язування такої задачі.

Не порушуючи загальності, але для спрощення аналізу складності розв'язання отриманої задачі розглянемо її формулювання на прикладі ідентифікації ІДДМ, яка містить два параметри:

$$v_k = v_{k-1} + (g_1 \cdot v_{k-1} - g_2 \cdot v_{k-1}^2) \cdot T .$$

Для ідентифікації параметрів цієї моделі використовуємо ІСНАР (2.10), сформовану для двох дискретних значень спостережень за об'ємом виходу біогазу, які наведено в таблиці 2.1.

Для знаходження нижньої межі інтервалу першого параметра різницевого рівняння (2.8), математична задача матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} & \hat{g}_1 \rightarrow \min , \\ & \left\{ \begin{array}{l} 0,0475 \leq [0,036; 0,042] + (\hat{g}_1 \cdot [0,036; 0,042] - \hat{g}_2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T \leq 0,0525 \\ 0,076 \leq [0,036; 0,042] + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \hat{g}_1 - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \hat{g}_2 - \\ - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T^2 \cdot \hat{g}_1 \cdot \hat{g}_2 - [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \hat{g}_2 - \\ - 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \hat{g}_1 \cdot \hat{g}_2 + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \hat{g}_2^2 + \\ 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^3 \cdot \hat{g}_1 \cdot \hat{g}_2^2 - \\ - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \hat{g}_2^3 \leq 0,084 \end{array} \right. \quad (2.15) \end{aligned}$$



Перепишемо вище сформульовану математично задачу оптимізації з умовами-нерівностями на умови-рівняння:

$$\begin{aligned}
 & \widehat{g}_1 \rightarrow \min, \\
 & [0,036; 0,042] + (\widehat{g}_1 \cdot [0,036; 0,042] - \widehat{g}_2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T - 0,0475 = 0 \\
 & [0,036; 0,042] + (\widehat{g}_1 \cdot [0,036; 0,042] - \widehat{g}_2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T - 0,0525 = 0 \\
 & [0,036; 0,042] + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_1 - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 - [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^2 + \\
 & 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^3 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2^2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^3 - 0,076 = 0 \\
 & [0,036; 0,042] + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_1 - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 - [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^2 + \\
 & 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^3 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2^2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^3 - 0,084 = 0
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Побудуємо функцію Лагранжа для отриманої задачі оптимізації:

$$\begin{aligned}
 F(\widehat{g}_1, \widehat{g}_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) = & \widehat{g}_1 - \lambda_1 ([0,036; 0,042] + (\widehat{g}_1 \cdot [0,036; 0,042] - \\
 & - \widehat{g}_2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T - 0,0475) - \lambda_2 ([0,036; 0,042] + \\
 & + (\widehat{g}_1 \cdot [0,036; 0,042] - \widehat{g}_2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T - 0,0525) - \\
 & - \lambda_3 ([0,036; 0,042] + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_1 - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 - [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^2 + \\
 & 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^3 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2^2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^3 - 0,076) - \\
 & - \lambda_4 ([0,036; 0,042] + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_1 - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042]) \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 - [0,036; 0,042] \cdot T \cdot \widehat{g}_2 - \\
 & - 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2 + 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^2 + \\
 & 2 \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^3 \cdot \widehat{g}_1 \cdot \widehat{g}_2^2 - \\
 & - [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot [0,036; 0,042] \cdot T^2 \cdot \widehat{g}_2^3 - 0,084),
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

де  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  – невизначені множники Лагранжа.

Як бачимо, функція Лагранжа в нашому випадку є інтервальною, що суттєво ускладнює розв’язки поставленої задачі. У цьому випадку доцільно застосувати інтервальну арифметику і отримати інтервальні значення множників Лагранжа.

Продиференціювавши функцію Лагранжа по невизначених множниках та по невідомим параметрах, а також прирівнявши результати часткового диференціювання до нуля, отримаємо таку ІСНАР:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - (0,02 \cdot [0,036;0,042]) \cdot (\lambda_1 - \lambda_2 + 2 \cdot \lambda_3 - 0,04 \cdot \lambda_3 \cdot g_2 + 2 \cdot \lambda_4 - 0,04 \cdot \lambda_4 \cdot g_2) - (0,02^2 \cdot ([0,036;0,042])^2) \times \\ \times (\lambda_3 - 0,04 \cdot \lambda_3 \cdot g_2 + \lambda_4 - 0,04 \cdot \lambda_4 \cdot g_2) = 0; \\ - 0,02 \cdot [0,036;0,042] \cdot (\lambda_3 + 0,04 \cdot g_1 \cdot \lambda_3) - 0,02 \cdot ([0,036;0,042])^2 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 0,02 \cdot \lambda_3 \cdot g_1 - 0,08 \cdot \lambda_3 \cdot g_2 + \\ + 0,0016 \cdot \lambda_3 \cdot g_1 \cdot g_2 + \lambda_4 + 0,02 \cdot g_1 \cdot \lambda_4 - 0,08 \cdot \lambda_4 \cdot g_2 + 0,016 \cdot \lambda_4 \cdot g_1 \cdot g_2) - 0,02^2 \cdot 3 \cdot g_2^2 \cdot ([0,036;0,042])^3 \times \\ \times (\lambda_3 + \lambda_4) = 0; \\ [0,036;0,042] \cdot (1 + 0,02 \cdot g_1 - 0,02 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2) - 0,0475 = 0; \\ [0,036;0,042] \cdot (1 + 0,02 \cdot g_1 - 0,02 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2) - 0,0525 = 0; \\ 0,036;0,042] \cdot (1 + 0,04 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_1 - 0,02 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2 - (0,02 \cdot [0,036;0,042])^2 \cdot g_1 \cdot g_2 - 0,02 \cdot g_2 - \\ - 2 \cdot 0,02^2 \cdot g_1 \cdot g_2 + 2 \cdot 0,02^2 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2^2 + 2 \cdot 0,02^3 [0,036;0,042] \cdot g_1 \cdot g_2^2 - 0,02^2 \cdot ([0,036;0,042])^2 \cdot g_2^3 - \\ - 0,076 = 0; \\ 0,036;0,042] \cdot (1 + 0,04 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_1 - 0,02 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2 - (0,02 \cdot [0,036;0,042])^2 \cdot g_1 \cdot g_2 - 0,02 \cdot g_2 - \\ - 2 \cdot 0,02^2 \cdot g_1 \cdot g_2 + 2 \cdot 0,02^2 \cdot [0,036;0,042] \cdot g_2^2 + 2 \cdot 0,02^3 [0,036;0,042] \cdot g_1 \cdot g_2^2 - 0,02^2 \cdot ([0,036;0,042])^2 \cdot g_2^3 - \\ - 0,084 = 0. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Як відомо [81], розв’язком такої системи є не опукла множина. Тому початкове наближення оцінок  $\hat{g}_i$  можна отримати із розв’язку задачі лінійного програмування  $\hat{g}_i \rightarrow \min(\max)$ . Для знаходження одного розв’язку отриманої системи використовуємо ППП MATLAB, зокрема функцію «fmincon».

Далі розв’язуємо задачу для знаходження верхньої межі інтервалу першого параметра різницевого рівняння (2.8). Математична задача для цього випадку матиме такий вигляд:

$$\hat{g}_1 \longrightarrow \max, \text{ за умов (2.15).}$$

Далі аналогічно розв'язуємо дві оптимізаційні задачі для обчислення верхньої та нижньої меж інтервалу для другого параметра моделі (2.8). На рис. 2.7 зображено отримані результати розв'язку ІСНАР (2.15).

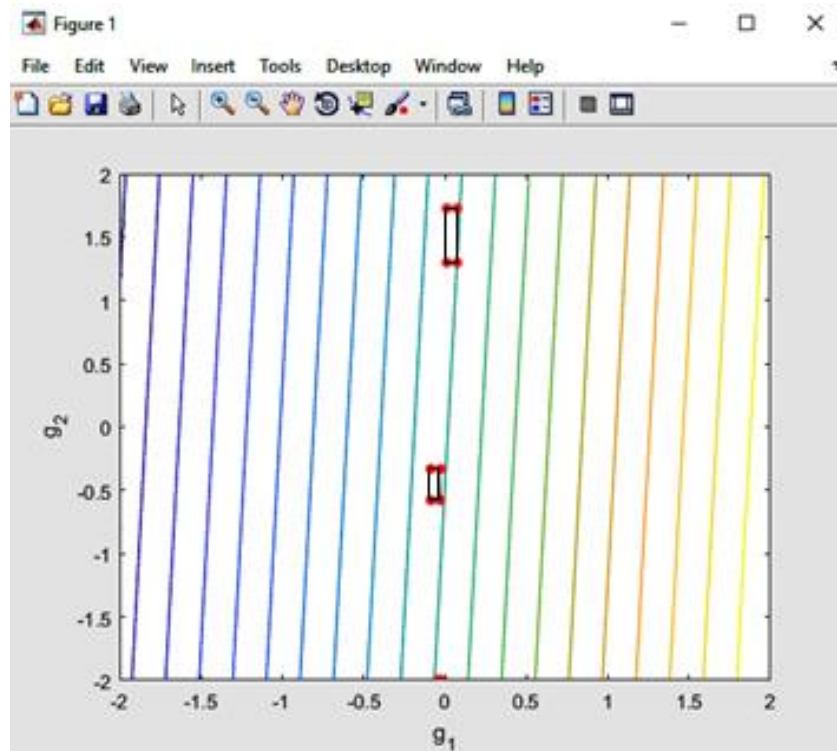


Рисунок 2.7 – Результат обчислень гарантованих інтервальних оцінок множини розв'язків ІСНАР (2.10) у за допомогою середовища MATLAB

Як бачимо, ці задачі можуть бути розв'язані за допомогою методу невизначених множників Лагранжа і відповідно із застосуванням Optimization Toolbox ППП MATLAB.

Водночас очевидною є складність розв'язування таких задач у випадку ІДДМ з великою кількістю параметрів. Ще одним недоліком обчислення гарантованих інтервальних оцінок параметрів ІДДМ є те, що отримані у такий спосіб інтервальні оцінки параметрів є достатньо неточними, оскільки отриманій області належать оцінки параметрів, із застосуванням яких, не можливо побудувати ДДМ, які адекватно відображають процеси в БГУ (див. рис. 2.4). Також проблемою обчислення гарантованих інтервальних оцінок є отримання інтервальних, а не звичайних алгебричних, рівнянь у

процесі обчислення часткових похідних функції Лагранжа, що призводить до наявності багатьох розв'язків при пошуку меж інтервалів параметрів ІДДМ.

Все вище зазначене, спонукає до знаходження допускових інтервальних оцінок параметрів ІДДМ, які також забезпечують гарантовані прогностичні властивості ІДДМ.

### 2.3. Метод та алгоритм обчислення допускових інтервальних оцінок параметрів ІДДМ

У випадку знаходження допустимих інтервальних оцінок, тобто «вписаних» в область розв'язків, як це показано на рис. 2.7 заштрихованою областю, задача ідентифікації суттєво ускладнюється, оскільки є двохкритеріальною та не має однозначного розв'язку:

$$\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}_i^-; \hat{g}_i^+]} \min, \quad (2.19)$$

$$\delta_2([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}_i^-; \hat{g}_i^+]} \max, \quad (2.20)$$

за умови:

$$[\hat{g}^-; \hat{g}^+] \subseteq \Omega. \quad (2.21)$$

У виразі (2.20)  $\delta_2([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$  – функція мети, яка описує ступінь покриття області розв'язків ІСНАР (2.5) допусковими інтервальними оцінками параметрів ІДДМ. Наприклад, ця функція може задавати об'єм допускової області інтервальних оцінок.

Значення функції мети  $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$  обчислюють на основі аналізу інтервальних даних. Вона не має представлення в аналітичному вигляді, а її

значення можна обчислити чисельними методами. На рис 2.8 проілюстровано схему обчислення значень цієї функції.

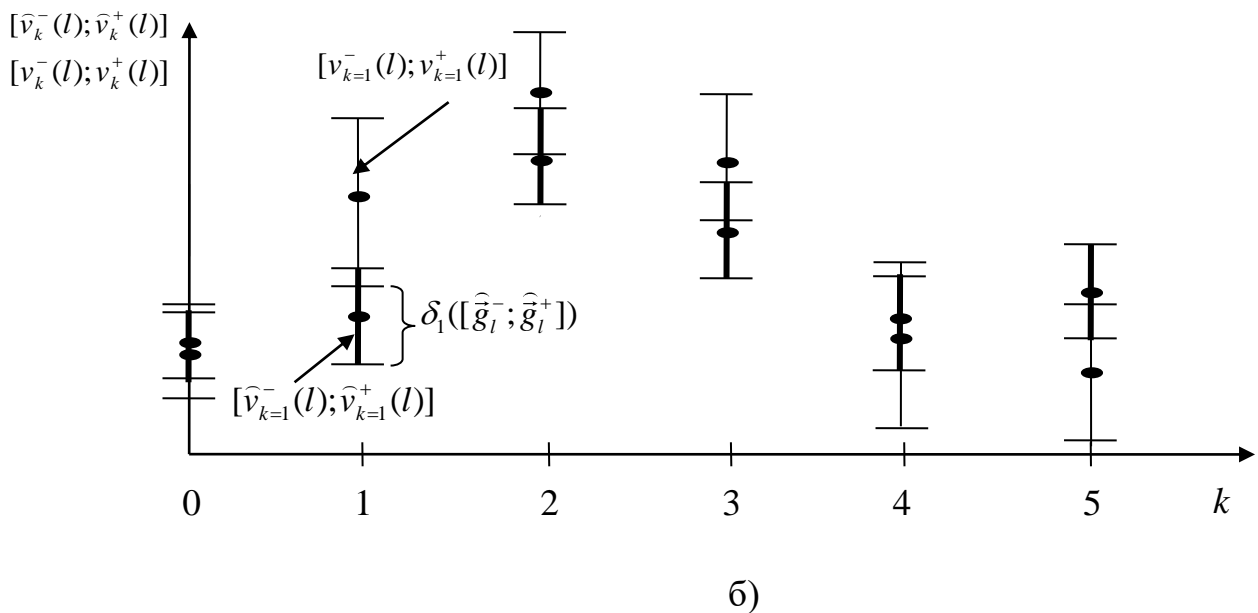
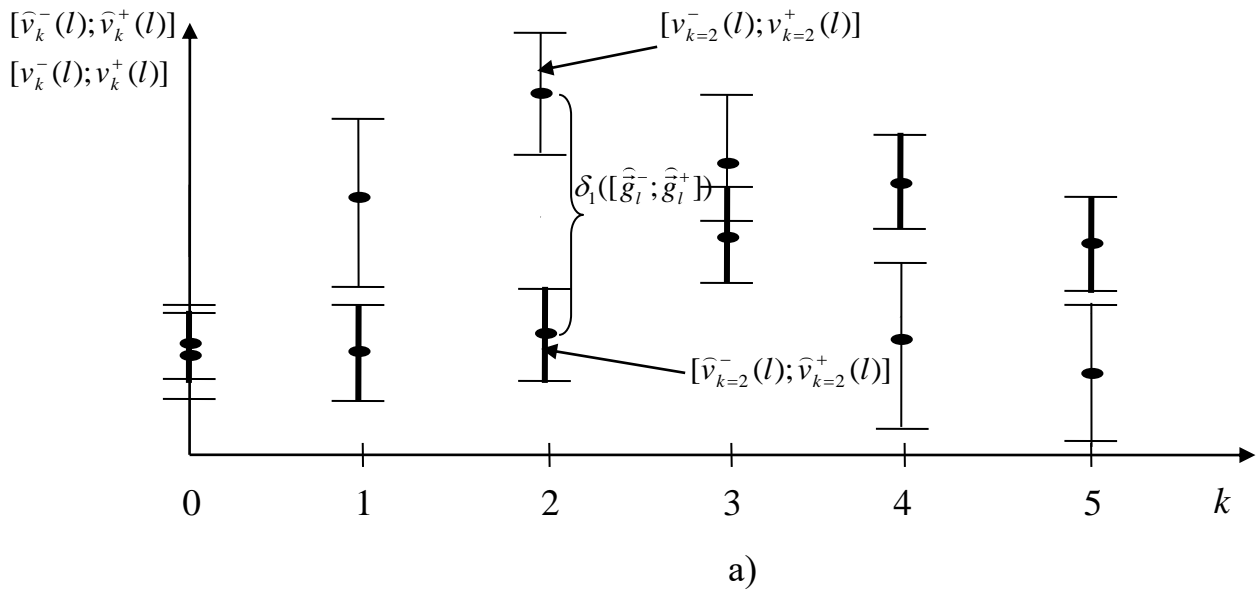


Рисунок 2.8 – Ілюстрація обчислення значень функції мети:

а) для випадку «грубих» оцінок параметрів ІДДМ; б) для випадку уточнення цих оцінок

Як бачимо із рис. 2.8, а, інтервальні оцінки прогнозованих значень  $[\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)]$  характеристики процесу, які обчислено для поточної інтервальної оцінки параметрів  $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$  та отримано із експерименту  $[v_k^-(l); v_k^+(l)]$  для дискретних значень  $k$ , відрізняються і не мають спільної області. При цьому найбільше відхилення бачимо між центрами двох інтервалів:  $[\hat{v}_{k=2}^-(l); \hat{v}_{k=2}^+(l)]$  та  $[v_{k=2}^-(l); v_{k=2}^+(l)]$  для дискрети  $k=2$ . Модуль цього відхилення між центрами інтервалів є значенням функції мети  $\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+])$ .

Якщо побудувати деяку обчислювальну процедуру уточнення цих інтервальних оцінок  $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$  параметрів, то на  $l$ -й ітерації цієї процедури інтервальні оцінки параметрів ІДДМ (2.4) будуть точнішими і відповідно інтервальне різницеве рівняння (2.5) забезпечить точніший прогноз процесу. На рис. 2.8, б, проілюстровано випадок, коли для усіх дискрет інтервальні оцінки прогнозованого коридору характеристики та інтервали цієї характеристики, які отримані з експерименту, перетинаються. У цьому випадку найбільше неспівпадіння між інтервалами  $[\hat{v}_{k=1}^-(l); \hat{v}_{k=1}^+(l)]$  та  $[v_{k=1}^-(l); v_{k=1}^+(l)]$  проілюстровано для дискрети  $k=1$ . Мінімальне (нульове) значення функції мети, досягається, коли для усіх дискрет інтервали оцінок прогнозованої характеристики належать до інтервалів оцінок цієї характеристики, які отримано з експерименту. У цьому випадку виконуються умови (1.8) і відповідно умова (2.21).

Провівши аналіз формування функції мети (2.19) в задачі параметричної ідентифікації, запишемо вирази для її обчислення, зважаючи, що ця процедура буде ітераційною:

$$\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \text{mid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) - \text{mid}([v_k]) \right\},$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)] \cap [v_k^-(l); v_k^+(l)] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K; \quad (2.22)$$

$$\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \begin{aligned} &mid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) - \\ &-wid(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) \end{aligned} \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)] \cap [v_k^-(l); v_k^+(l)] = \emptyset, \forall k=1, \dots, K,$

(2.23)

У випадку, коли значення функції мети досягає мінімуму, тобто  $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) = 0$ , тоді переходимо до розв'язування задачі (2.20) – максимізації об'єму допускової області інтервальних оцінок параметрів ІДДМ. При цьому збільшення розмірів (об'єму) допускової області здійснюємо по-кроково з деяким приростом:

$$\hat{g}_l^- = \hat{g}_l^- - \Delta \bar{g}_l; \quad \hat{g}_l^+ = \hat{g}_l^+ + \Delta \bar{g}_l, \quad (2.24)$$

де  $\Delta \bar{g}_l$  – вектор приростів меж інтервалів  $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$ .

Якщо на якійсь ітерації  $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \neq 0$ , тоді переходимо до реалізації оптимізаційної процедури (2.19).

Очевидно, що розглянута оптимізаційна задача відноситься до NP-складних. Тому для її розв'язування пропонуємо використати методи випадкового пошуку, особливості яких розглянуто у першому розділі.

Запропонована обчислювальна схема для отримання наближень до інтервальних оцінок розв'язків ІСНАР (2.5) загалом містить чотири кроки.

Крок 1. Задання початкового (нульового) вектора параметрів в інтервальному вигляді  $[\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]$ .

У цьому випадку можуть бути задані і точкові оцінки параметрів.

Крок 2. Генерування поточного інтервального вектора параметрів ІДДМ в околі радіусом  $r$  випадковим чином:

$$[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+] = [\hat{g}_{l-1}^-; \hat{g}_{l-1}^+] + r \cdot \vec{\xi}_l, l = 1, \dots, L; \quad (2.25)$$

$$\vec{\xi}_l = \left( \frac{\xi_{1l}}{R_l}, \frac{\xi_{2l}}{R_l}, \dots, \frac{\xi_{ml}}{R_l} \right)^T; \quad (2.26)$$

$$R_l = \sqrt{\xi_{1l}^2 + \xi_{2l}^2 + \dots + \xi_{ml}^2}, \quad (2.27)$$

де  $\xi_{1l}, \dots, \xi_{ml}$  – випадкові числа, згенеровані відповідно до рівномірного закону розподілу на інтервалі  $[-1:1]$ .

Також на цьому кроці на перших ітераціях можуть бути використані точкові оцінки параметрів.

Крок 3. Перевірку «якості»  $\delta_1([\hat{g}_i^-; \hat{g}_i^+])$  поточного наближення інтервальної (чи точкової) оцінки  $[\hat{g}_i^-; \hat{g}_i^+]$  вектора параметрів визначаємо за формулою (2.23).

Крок 4. Якщо значення функції мети  $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) = 0$  дорівнює нулю, то розширюємо поточні допускові інтервали за формулою (2.24) і переходимо на крок 3. Якщо для поточного наближення значення функції мети  $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) = 0$ , то повторюємо крок 4, тобто виконуємо ітерацію за формулою (2.24), в іншому випадку повертаємо попереднє наближення інтервальних оцінок вектора параметрів і переходимо на крок 2.

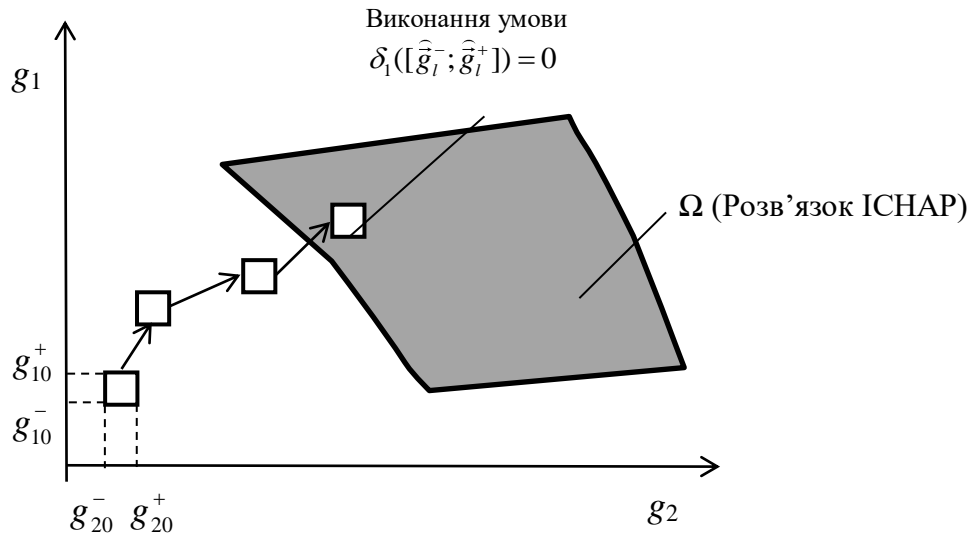
Умовою завершення ітерацій є вичерпання кількості ітерацій «розширення» інтервалів на четвертому кроці.

Запропонована ітераційна схема відрізняється ускладненням у порівнянні з випадком знаходження точкових оцінок параметрів. Проте вона на відміну від існуючих забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

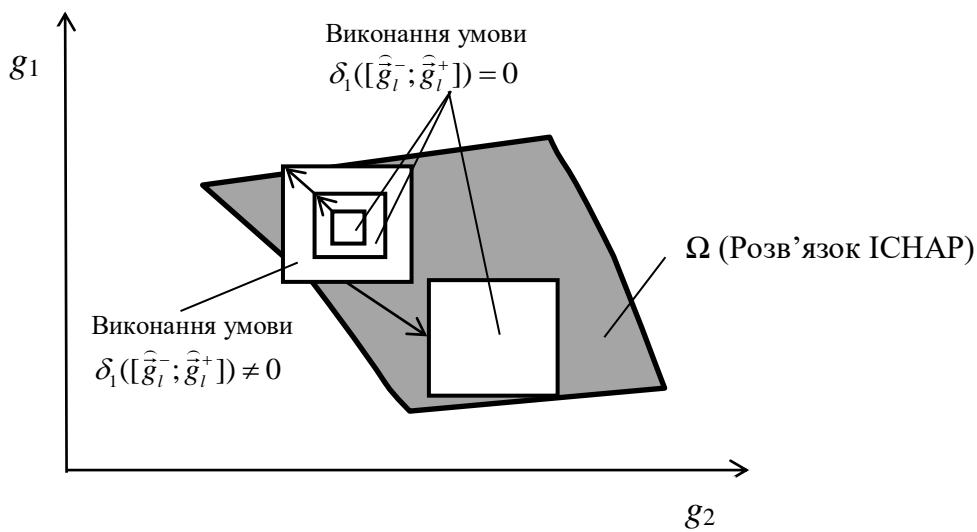
На рис. 2.9, а, схематично проілюстровано виконання перших трьох кроків реалізації методу. А на рис. 2.9, б, наведено ілюстрацію четвертого кроку. Варто зазначити, що важливим питанням є вибір схеми реалізації



виразу (2.22), тобто задання приросту меж інтервалів. У випадку використання великих приростів, виникає проблема збіжності, а у випадку малих приростів зростає часова складність обчислень.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Ілюстрація виконання основних кроків реалізації методу параметричної ідентифікації

Для підвищення ефективності методу випадкового пошуку на кроці 2 розглянемо також більш складну схему методу випадкового пошуку на

основі напрямного конуса Растригіна, але модифіковану для обчислення інтервальних оцінок параметрів.

На початковій ітерації випадкового пошуку ( $l=0$ ) задаємо початкове наближення поточного допускового інтервалу інтервального вектора  $[\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]$ . В околі цього наближення на поверхні уявної гіперсфери радіусом  $r$ , тобто на відстані  $r$  від інтервального вектора  $[\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]$  в просторі параметрів на основі рівномірного закону розподілу генеруємо поточний інтервальний вектор параметрів ІДДМ:

$$[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+] = [\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+] + r \cdot \vec{\xi}_n, n = 1, \dots, N. \quad (2.28)$$

Зауважимо, що як і в попередньому випадку реалізації цього кроку на початкових ітераціях можна обчислювати точкові оцінки параметрів.

Серед згенерованих вибираємо такий інтервальний вектор (точкову оцінку), який забезпечує найменше значення функції мети:

$$[\hat{g}_1^-; \hat{g}_1^+] = \arg \min_{n=1, \dots, N} (\delta_1([\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]) + r \cdot \vec{\xi}_n). \quad (2.29)$$

Отримана інтервальна оцінка вектора параметрів є наближенням для наступної ітерації. Додатково в цій процедурі обчислюємо інтервальний вектор пам'яті, який визначає правильний напрям пошуку:

$$\vec{w} = \text{mid}([\hat{g}_1^-; \hat{g}_1^+] - [\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]) / r, \quad (2.30)$$

де  $\text{mid}(\bullet)$  – операція визначення середини інтервалу подальшого пошуку.

На наступних ітераціях у просторі параметрів будуємо уявні гіперконуси з кутом розкриття  $\psi$  і віссю  $\vec{w}_k$  та з вершинами, координати яких визначаються межовими значеннями компонент інтервального вектора

$[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$ . Ці гіперконуси «відсікають» деякі поверхні від гіперсфер з радіусом  $r$  із центрами, заданими координатами у межових значеннях інтервалів - компонент інтервального вектора  $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$ . На отриманих поверхнях у просторі параметрів та їх допусків генеруємо на основі рівномірного закону розподілу  $n$  випадкових інтервалів за формулою (2.28), де вектор  $\vec{\xi}_n$  в даному випадку обчислюємо, виходячи із обмежень на параметри конуса. Серед згенерованих інтервалів обираємо такий, який забезпечує найменше значення функції мети:

$$[\hat{g}_{l+1}^-; \hat{g}_{l+1}^+] = \arg \min_{n=1, \dots, N} [(\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) + r \cdot \vec{\xi}_n)], \quad \vec{\xi}_n \in \chi(\psi, w_k, r), \quad (2.31)$$

де  $\chi(\psi, w_k, r)$  – область, яка описує конус з кутом розкриття  $\psi$ , напрямом осі  $\vec{w}_k$  і радіусом  $r$ .

Отримана інтервальна оцінка вектора параметрів є наближенням для наступної  $l+1$  ітерації пошукової процедури. Далі у цій процедурі додатково перевизначаємо вектор пам'яті:

$$\vec{w}_{l+1} = \text{mid}[\alpha \cdot \vec{w}_l + \beta \cdot (([\hat{g}_{l+1}^-; \hat{g}_{l+1}^+] - [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) / r)], \quad (2.32)$$

де  $\alpha - (0 \leq \alpha \leq 1)$  – коефіцієнт забування,  $\beta$  – коефіцієнт запам'ятовування нової інформації.

Пошук продовжується до тих пір, поки зменшується значення функції мети. Якщо ж значення функції мети не зменшується на певній ітерації, то замість конуса використовуємо гіперсферу, як на початковій ітерації для заданого вектора інтервальних оцінок параметрів. Якщо ж і далі серед згенерованих інтервалів значень параметрів неможливо знайти той, який забезпечує зменшення функції мети, то у цьому випадку налаштуємо довжину кроку  $r$  і, як правило, зменшуємо його.

Загальним правилом завершення процесу обчислень є вичерпання наперед заданої кількості ітерацій розширення поточних допускових інтервалів вектора параметрів ІДДМ.

Таким чином, запропоновано метод та обчислювальну процедуру параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних моделей із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Для урахування невизначеності, яка пов'язана із розкидом технологічних параметрів та похибок спостережень за характером процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, а також для отримання єдиної структури ІДДМ, які описують цей процес, взамін отримання точкових оцінок параметрів цих моделей необхідно отримувати множинні оцінки. Знаходження цих оцінок є задачею обчислення множини розв'язків ІСНАР, яка в загальному випадку є неопуклою, незв'язаною та не має аналітичного представлення.

2. Одним із способів отримання цих оцінок є інтервальний підхід, коли оцінки параметрів моделі отримують у вигляді числових інтервалів і при цьому структура моделі залишається незмінною. Водночас зазначений підхід суттєво ускладнює задачу параметричної ідентифікації.

3. Для розв'язування цієї задачі розглянуто два способи отримання інтервальних оцінок параметрів ІДДМ: гарантованих та допускових. У процесі досліджень встановлено, що гарантовані інтервальні оцінки є достатньо неточними, оскільки отриманій області параметрів у такому випадку належать оцінки параметрів, із застосуванням яких не можливо побудувати дискретні динамічні моделі, які адекватно відображають процеси в біогазових установках. Також проблемою обчислення гарантованих інтервальних оцінок є отримання інтервальних, а не звичайних алгебричних рівнянь у процесі обчислення часткових похідних функції Лагранжа, що призводить до наявності багатьох розв'язків при пошуку меж інтервалів параметрів ІДДМ.

4. На основі проведених обґрунтувань запропоновано метод та обчислювальну процедуру параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних

моделей із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

5. Розглянуто метод параметричної ідентифікації моделей динамічних систем із заданою точністю, за результатами спостережень за вихідною змінною з обмеженими за амплітудою похибками вимірювань отримано вирази та побудовано алгоритми для знаходження інтервальних оцінок змінних стану ДДМ, що уможливило побудову методу параметричної ідентифікації ДДМ.

### **РОЗДІЛ 3**

## **УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ АЛГОРИТМУ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ**

У попередньому розділі обґрунтовано метод параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів. Розглянутий метод забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень. Особливість запропонованого методу полягає у тому, що його реалізація у випадку структурної ідентифікації повинна забезпечити єдину структуру ІДДМ. Водночас його багаторазове застосування у процесі структурної ідентифікації ІДДМ підвищить часову складність реалізації методу структурної ідентифікації, оскільки, як зазначено у попередньому розділі, він є складнішим у порівнянні із методом параметричної ідентифікації точкових оцінок параметрів ІДДМ. Тому доцільним є удосконалення відомого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі використання поведінкових моделей бджолоїної колонії у спосіб уведення параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів, а також в напрямку зниження часової складності його реалізації.

Матеріали цього розділу ґрунтуються на результатах опублікованих автором у працях [73, 77, 132].

### **3.1. Математична задача оцінювання якості структури дискретної динамічної моделі та її обґрунтування**

Матеріали цього розділу ґрунтуються на детальному аналізі відомого методу структурної ідентифікації, який розроблено із застосуванням алгоритмів бджолоїної колонії. Цей метод уперше опубліковано у праці [39].

Багаторазове використання цього методу для побудови ІДДМ процесів у різних предметних областях показало ряд недоліків. Зокрема, неоднозначність розв'язку, тобто отриманої структури моделі, для різних початково заданих умов. З іншого боку, ряд операторів, які використано для перетворення поточних структур, які претендують на кінцеву оптимальну структуру, обрано евристично, без теоретичного чи експериментального обґрунтування. Це стосується оператора, який визначає кількість «структурнащадків», які мають бути згенеровані для аналізованої «структури-предка». У контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії цей оператор визначає кількість бджіл-дослідників, які обрали досліджуване поточне джерело-нектару. У відомому методі структурної ідентифікації результат виконання цього оператора ґрунтується на припущенні, що кількість бджіл-дослідників, які переміщуються в окіл джерела нектару (на основі повідомлення робочої бджоли) лінійно залежить від його якості. При цьому випадки можливих інших залежностей не досліджувалися. Очевидно, що таке припущення не достатньо обґрунтоване. Також очевидно, що збільшення кількості згенерованих структур «навколо» поточної призведе до зростання часової складності реалізації методу. Але водночас таке збільшення призведе до концентрації досліджень структур кращої якості і сумарний ефект щодо зростання обчислювальної складності може бути зворотнім. Тобто в підсумку обчислювальна складність може зменшитись. Це важливо для випадку ускладнення процедури параметричної ідентифікації у вигляді інтервальних оцінок параметрів ІДДМ, яку багаторазово необхідно використовувати у процесі структурної ідентифікації.

Суть відомого методу структурної ідентифікації полягає в оптимізації деякої функції мети, яка залежить від обраного набору структурних елементів [2]. Особливості цього методу проаналізовано у першому розділі. Зокрема, метод зорієнтовано на пошук структури для ДДМ у вигляді (1.16). При цьому на кожному кроці для перевірки якості поточної структури обчислюється значення функції мети на основі багаторазового використання



методу параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді точкових оцінок параметрів.

У випадку використання інтервальних оцінок параметрів – як результату параметричної ідентифікації, задача ускладнюється, оскільки в цьому випадку замість моделі (1.16) з фіксованою структурою, що аналізується необхідно брати до уваги модель з інтервальними оцінками параметрів:

$$[v_k^-; v_k^+] = [f_1^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_1^0] + [f_2^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_2^0] + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_{m_0}^0]. \quad (3.1)$$

Наведена вище ІДДМ (3.1), повинна задовольняти умови (1.8), тобто забезпечувати належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

Як зазначалося вище, параметрична ідентифікація є етапом структурної ідентифікації. У випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектора базисних функцій (поточної структури  $\lambda_s$  ІДДМ) і знаходженні інтервальних оцінок параметрів ІДДМ.

Таким чином, знаходження інтервальних оцінок параметрів дозволить знайти єдину модель, яка буде забезпечувати «якісне» відображення динаміки процесу при певному розкіді початкових умов. Зокрема, для задачі моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, це параметри: температура та кислотність середовища. З практичної точки зору, це є найкращим варіантом пошуку структури, так як в протилежному випадку при точкових значеннях параметрів моделі, будемо отримувати багато розв'язків, тобто набір структур. Для налаштування БГУ за результатами такого моделювання виникають певні труднощі.

З урахуванням наведених вище міркувань, якість поточної структури ІДДМ оцінюватимемо за значенням функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , значення якої для поточної структур обчислюватимемо за допомогою виразів:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) - \text{mid}([v_k]) \right| \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$  (3.2)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) - \right. \right.$$

$$\left. - \text{wid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) \cap [v_k] \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K,$  (3.3)

де  $\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}])^T$ ,  $\hat{g}^s$  – вектор базисних функцій різницевого рівняння та вектор параметрів для поточної структури, відповідно.

Вираз (3.2) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (3.3) у випадку  $\delta(\lambda_s) = 0$  забезпечує отримання адекватної моделі.

Задача структурної ідентифікації ІДДМ полягає у мінімізації функції мети  $\delta(\lambda_s)$ :

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s \vec{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}^s(\bullet) \in F, \hat{g}^s \in [\hat{g}^s], \quad (3.4)$$

де  $[\hat{g}^s]$  – інтервальний вектор параметрів, який отримуємо із розв'язку задачі параметричної ідентифікації на основі методу представленого у другому розділі.

Властивості функції мети (3.2) та (3.3) такі, що для будь-якого її значення для поточної структури  $\lambda_s$  ІДДМ вона приймає невід'ємне значення, а отже її мінімум досягається за умови  $\delta(\lambda_s) = 0$ . Опираючись на теорію множинності моделей [136], у просторі пошуку розв'язків задачі

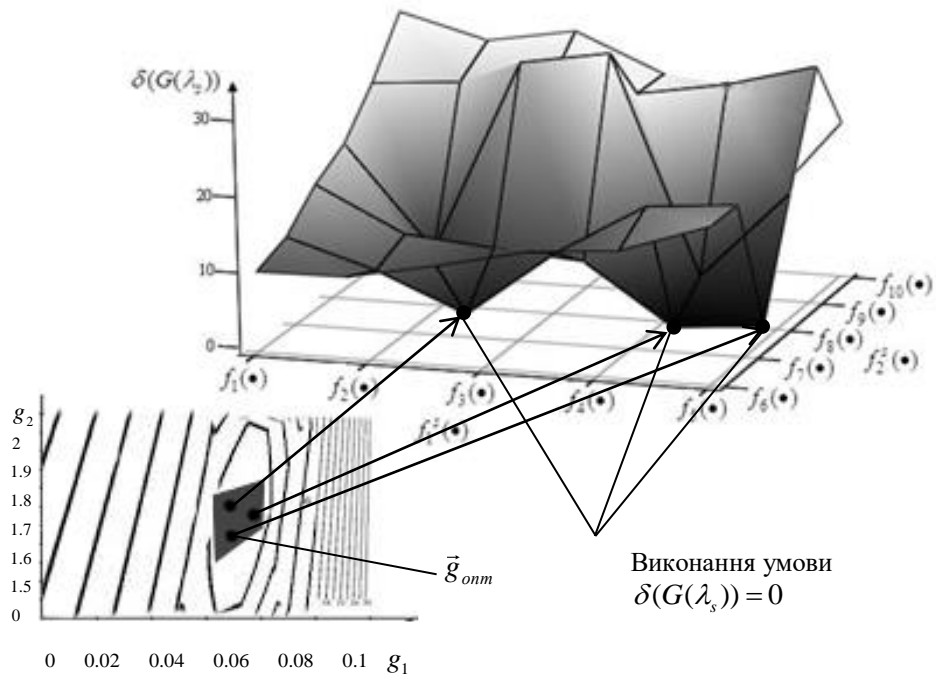
структурної ідентифікації ІДДМ, функція  $\delta(\lambda_s)$  має багато мінімумів, кожен з яких відповідає одній структурі моделі. Уведення процедури параметричної ідентифікації у вигляді інтервальних оцінок параметрів повинно забезпечити наявність одного глобального мінімуму цієї функції. На рис. 3.1, а, проілюстрована графічна інтерпретація випадку використання точкових оцінок параметрів, а рис. 3.1, б, ілюструє випадок отримання інтервальних оцінок для поточної структури.

Кожен із рисунків 3.1, а, та 3.1, б, складається з двох частин. Верхня частина ілюструє функцію мети в задачі структурної ідентифікації та відображає простір структурних елементів. Нижня частина рисунків ілюструє лінії рівного рівня функції мети для задачі параметричної ідентифікації в просторі значень параметрів моделі (для випадку  $m=2$ ). На нижній частині обох рисунків сірим кольором зображено область розв'язків задачі параметричної ідентифікації, а також на рис. 3.1, а, наведено точкові оцінки параметрів  $\bar{g}_{omn}$ , а на рис. 3.1, б, – інтервальні оцінки параметрів  $[\bar{g}_{omn}]$  розв'язку задачі параметричної ідентифікації.

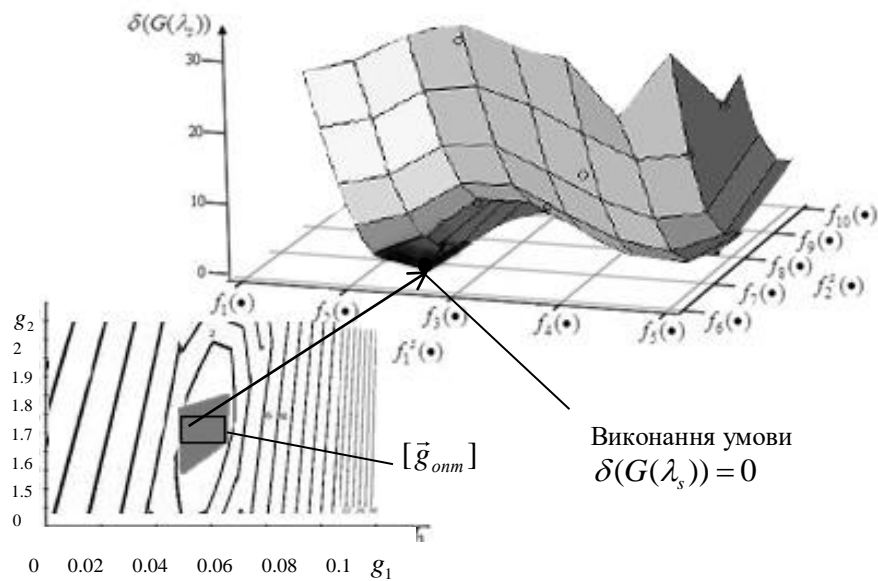
Як бачимо, з рис. 3.1, а, кожен точковий розв'язок задачі параметричної ідентифікації  $\bar{g}_{omn}$  забезпечує знаходження певної структури ІДДМ, для якої виконується умова  $\delta(G(\lambda_s)) = 0$ .

Таким чином, у випадку використання точкових оцінок параметрів ІДДМ отримуємо множину структур ІДДМ, для яких виконується умова  $\delta(G(\lambda_s)) = 0$ . Множинність структур є основним недоліком існуючого методу структурної ідентифікації.

Урахування інтервальних оцінок параметрів  $[\bar{g}_{omn}]$  в задачі параметричної ідентифікації на основі нового, запропонованого у другому розділі, методу дає можливість отримати одну структуру ІДДМ, для якої виконується умова  $\delta(G(\lambda_s)) = 0$ . Такий випадок проілюстровано на рис. 3.1, б.



а)



б)

Рисунок 3.1 – Графічна ілюстрація відмінності у випадку використання точкових та інтервальних оцінок параметрів у методі структурної ідентифікації

Отже, поєднання компонентів поведінкової моделі, методу аналізу інтервальних даних та методу параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді

інтервальних оцінок параметрів створює можливість сформулювати теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму функції мети  $\delta(\lambda_s)$  в задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

Як вже зазначалося, задачу структурної ідентифікації ІДДМ розв'язують за допомогою певної послідовності перетворень структур  $\lambda_s$  із аналізом значень функції мети. При побудові процедур, які покладено в основу методу структурної ідентифікації, необхідно здійснити таку послідовність перетворень, яка б забезпечувала на кожній ітерації зменшення значень функції мети  $\delta(\lambda_s)$ .

Застосування аналізу інтервальних даних передбачає розв'язування ІСНАР для оцінювання якості кожної згенерованої структури ІДДМ.

Введемо математичний оператор  $G(\lambda_s)$ , який здійснює генерування математичної моделі на основі перетворення її структури  $\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot [g_1^s]; f_2^s(\bullet) \cdot [g_2^s]; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot [g_{m_s}^s]\}$  в адитивну згортку, тобто:

$$G(\lambda_s) = \{f_1^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_1^s]; f_2^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_2^s]; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_{m_s}^s]\}. \quad (3.5)$$

На відміну від відомого оператора [131], запропонований - оперує з інтервальними оцінками параметрів. Такий оператор дає можливість отримати інтервальне різницеve рівняння у вигляді (3.1).

Із урахуванням виразу (3.5) оптимізаційну задачу структурної ідентифікації перепишемо у такому вигляді:

$$\delta(G(\lambda_s)) \xrightarrow{\lambda_s} \min, \quad (3.6)$$

$$m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \in \Lambda_{m_{сн}} \hat{g}^s \in [\hat{g}^s],$$

де  $m_{сн}$  – номер ітерації реалізації методу структурної ідентифікації.

Далі застосувавши схему математичного формулювання для задачі параметричної ідентифікації отримуємо ІСНАР:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+]; \\ [\hat{v}_k] = (\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]; \\ v_k^- \leq (\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s] \leq v_k^+, k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (3.7)$$

Поточна структура ІДДМ  $\lambda_s$  із відомим інтервальним вектором параметрів  $[\hat{g}^s]$  є одним із потенційних розв'язків задачі структурної ідентифікації. Якість поточної структури оцінюємо на основі виразу (3.2), чи (3.3), застосовуючи попередньо процедуру параметричної ідентифікації. Процедуру відбору структур – претендентів для побудови ІДДМ характеристик процесу анаеробного мікробіологічного бродіння побудуємо на основі поведінкових моделей колонії медоносних бджіл.

У дисертаційній роботі запропоновано удосконалити метод структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії для побудови процедур реалізації ітераційної схеми розв'язування оптимізаційної задачі (3.6), яка на кожній ітерації забезпечує умову  $\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda_{s+1})$ , а також має меншу часову складність реалізації.

### **3.2. Удосконалений метод структурної ідентифікації з нелінійним оператором показника кількості «структур-нащадків»**

Розглянемо детальніше метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Опираючись на відому схему реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії [131], зробимо певні узагальнення процесів та операторів послідовного перетворення поточних структур ІДДМ. Результати цього узагальнення

наведено на рис. 3.2. Зокрема, на цьому рисунку проілюстровано схему послідовності певних перетворень методу структурної ідентифікації, що розкриває суть цього методу, та результати цих перетворень у вигляді отриманих проміжних структур ІДДМ.

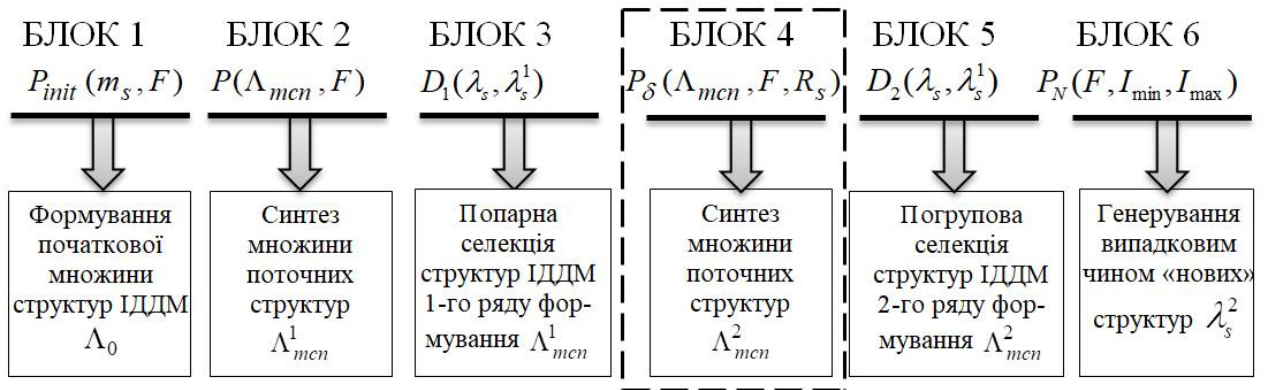


Рисунок 3.2 – Схема послідовності перетворень методу структурної ідентифікації

Отже, суть методу структурної ідентифікації ІДДМ полягає у виконанні такої послідовності перетворень.

Блок 1: формування початкової множини структур  $\Lambda_{mcp}$  (для якої виконується умова  $mcp=0$ ) за допомогою оператора  $P_{init}(m_s, F)$ , що є процедурою випадкового вибору структурних елементів із множини  $F$  у кількості  $m_s$  та оцінювання їх «якості» за допомогою функції мети  $\delta(\lambda_s)$ .

Блок 2: синтез множини поточних структур із використанням оператора  $P(\Lambda_{mcp}, F)$ , який здійснює перетворення структури різницевого рівняння у вигляді (1.16). В контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії, цей оператор означає дослідження околу робочими бджолами відомого джерела нектару.

Блок 3: проведення попарної селекції множини структур ІДДМ першого ряду формування  $\Lambda_{mcp}^1$  із використанням оператора  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$ , який реалізує процес синтезу «кращої» із структур ІДДМ за значеннями функції мети. В

контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії цей оператор означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл.

Блок 4: синтез множини поточних структур із використанням оператора  $P_{\delta}(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$ , який перетворює структуру різницевого рівняння у вигляді (1.16), що у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками.

Блок 5: проведення по-групової селекції множини структур ІДДМ другого ряду формування  $\Lambda_{mcs}^2$  із використанням оператора  $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$ , який реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІДДМ за значеннями функції мети, що у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару для бджіл-дослідників.

Блок 6: генерування «нових» структур ІДДМ  $\lambda_s$  із використанням оператора  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , який випадковим чином генерує «нову» структуру ІДДМ з множини всіх структурних елементів при умові, що усі структури для яких  $Limit_s \geq LIMIT$  вважаються «вичерпними». У контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає пошук нового джерела нектару.

Варто зазначити, що значення функції мети змінюється в залежності від «якості» структури обернено пропорційно, тобто чим краща структура, тим менше значення функція мети  $\delta(\lambda_s)$ . У випадку ж якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то така структура дозволяє побудувати адекватну ІДДМ.

Реалізація методу структурної ідентифікації забезпечує мінімізацію функції мети (3.6) у спосіб перетворення послідовності структур  $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$  через застосування представлених операторів  $P(\Lambda_{mcs}, F)$ ,  $P_{\delta}(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$ ,  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ ,  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$ ,  $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$ , які є аналогами відповідних процедур із поведінкової моделі бджолоїної колонії [24].



Результати аналізу операторів цілеспрямованого перетворення «структур-предків» показали, що «корисні» їх властивості визначаються значенням показника  $R_s$  в операторі  $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$ . Зазначений оператор виділений пунктиром в блоці 4 на рис. 3.2. Цей оператор призначений для визначення числа «структур-нащадків», які потрібно згенерувати із подібним властивостями (подібними структурними елементами) як у «структури-предка».

Згідно з традиційно-використовуваним методом структурної ідентифікації [131], цей оператор побудовано по аналогії з компонентами поведінкової моделі колонії медоносних бджіл у якій припускають, що кількість бджіл-дослідників, які концентруються в околі джерела нектару (на основі повідомлення робочої бджоли) лінійно залежить від його якості. Що є цілком природнім. При цьому випадки побудови цього оператора на припущеннях про інші залежності між цими категоріями, на практиці не досліджувалися.

Варто зазначити, що природа поведінки колонії медоносних бджіл є достатньо складною. Зокрема, недостатньо дослідженим є біологічні механізми бджіл-дослідників. У цілому невідомо чим ці бджоли керуються, приймаючи рішення летіти за тою чи іншою робочою бджолою. Однак у алгоритмах, які описано Карагодою Ю.Г., абсолютно справедливо вважається, що кількість «завербованих» бджіл-дослідників завжди залежить від якості джерела нектару. У відомому методі структурної ідентифікації прийнято, що ця залежність є лінійною. Аналіз цього припущення показує, що на перший погляд воно є природнім, оскільки збільшення кількості згенерованих структур «навколо» поточної через використання нелінійного оператора, який збільшує кількість згенерованих «структур-нащадків» призведе до зростання часової складності реалізації методу. Але водночас таке збільшення може забезпечити концентрацію досліджень структур кращої якості і внаслідок підвищити ефективність алгоритму. Також у підсумку це може призвести до зниження обчислювальної складності навіть

у випадку ускладнення процедури параметричної ідентифікації, унаслідок обчислення інтервальних оцінок параметрів ІДДМ, яка є складовою методу структурної ідентифікації.

Отже, у відомому методі структурної ідентифікації значення показника  $R_s$ , який визначає кількість структур, які будуть згенеровані на основі  $s$ -ї структури із множини  $\Lambda_{mcn}^1$ , для кожної структури обчислюють за такою формулою:

$$R_s = \text{ToInt} \left( \frac{S \cdot \left( 2 \cdot \max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) - \delta(\lambda_{s-1}^1) \right)}{\sum_{s=1}^S \left( \max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S, \quad (3.12)$$

де  $R_1 = 0$ , операція  $\text{ToInt}(\bullet)$  означає заокруглення до найближчого цілого значення.

Опираючись на вище зазначене, досліджено застосування двох випадків нелінійності функції якості джерела нектару – квадратичної та кубічної залежності кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ «структур-нащадків» від значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , відповідно:

$$R_s = \text{ToInt} \left( \frac{S \cdot \left( 2 \cdot \max \{ (\delta(\lambda_s^1))^2 \mid s=1 \dots S \} - (\delta(\lambda_s^1))^2 - (\delta(\lambda_{s-1}^1))^2 \right)}{\sum_{s=1}^S \left( \max \{ (\delta(\lambda_s^1))^2 \mid s=1 \dots S \} - (\delta(\lambda_s^1))^2 \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S, \quad (3.13)$$

$$R_s = \text{ToInt} \left( \frac{S \cdot \left( 2 \cdot \max \{ (\delta(\lambda_s^1))^3 \mid s=1 \dots S \} - (\delta(\lambda_s^1))^3 - (\delta(\lambda_{s-1}^1))^3 \right)}{\sum_{s=1}^S \left( \max \{ (\delta(\lambda_s^1))^3 \mid s=1 \dots S \} - (\delta(\lambda_s^1))^3 \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S. \quad (3.14)$$

У таблиці 3.1 наведено результати комп'ютерних експериментів, які обґрунтовують застосування квадратичної залежності (3.13) для побудови цього показника.

Таблиця 3.1

Часова складність реалізації комп'ютерних експериментів для значення показника «інтенсивності пошуку джерела нектару»

Номер обчислювального експерименту	Кількість параметрів моделі	Кількість вимірювань	Кількість ітерацій при використанні		
			квадратичної залежності для показника $R_s$	лінійної залежності для показника $R_s$	кубічної залежності для показника $R_s$
1	2	3	2 245	2 356	2 641
2	3	5	58 067	62 131	69 392
3	4	10	947 511	1 042 262	1 775 384
4	10	50	10 003 873	12 004 647	13 539 142
5	12	70	29 978 542	40 471 031	50 345 657
6	15	100	43 823 119	85 734 678	114 624 871

Як бачимо з таблиці 3.1 в обчислювальних експериментах 1-3 для простіших моделей, які містять не більше чотирьох параметрів, у випадку застосування квадратичної залежності (3.13), зниження обчислювальної складності показника  $R_s$  становить від 5% до 10% у порівнянні з лінійною залежністю (3.12). Очевидно, що при ускладненні моделі із збільшенням кількості спостережень ефективність використання квадратичної залежності показника  $R_s$  підвищується. Для задачі структурної ідентифікації в обчислювальному експерименті 4, що містить 10 параметрів, обчислювальна складність із використанням квадратичної залежності показника  $R_s$ , у порівнянні з лінійною знижується на 20 %. А для випадку ІДДМ з 15 параметрів для 100 інтервальних вимірювань обчислювальна складність знижується на  $(1 - \frac{43023119}{84934618}) \cdot 100\% = 49,3\%$ .

У четвертому розділі дисертації наведено один із прикладів дослідження двох наведених вище випадків застосування нелінійних операторів для квадратичної та кубічної залежності кількості згенерованих структур ІДДМ на основі поточної, який також підтверджує загальну тенденцію при виборі квадратичної залежності (3.13) для побудови зазначеного оператора.

Послідовність перетворень структур ІДДМ, яка використовується у розглянутому методі структурної ідентифікації математичних моделей, прискорює виявлення ділянок з локальними мінімумами функції мети та забезпечує, принаймні на тестових прикладах, знаходження єдиної структури у випадку використання інтервальних оцінок параметрів моделей.

### **3.3. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації з нелінійним оператором показника кількості «структур-нащадків»**

На основі розробленого методу структурної ідентифікації реалізовано обчислювальну блок-схему алгоритму його реалізації (рис. 3.3).

На схемі, розкрито суть взаємодії та послідовність виконання компонентів поведінкової моделі у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації із застосуванням квадратичної залежності показника  $R_s$ . Розглянемо кожен блок, що представлений на даній схемі.

«Блок 1» ініціалізує початкові параметри алгоритму. Для початку задаємо значення таких змінних:  $LIMIT$  – максимальну можливу кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо поточна структура ІДДМ не оновлювалася вже  $LIMIT$  разів, то вона вважається «вичерпаною»;  $S$  – початкову кількість структур ІДДМ;  $[I_{\min}; I_{\max}]$  – інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне  $I_{\min}$  та максимальне  $I_{\max}$  значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІДДМ  $\lambda_s$  та множину структурних елементів  $F$ .

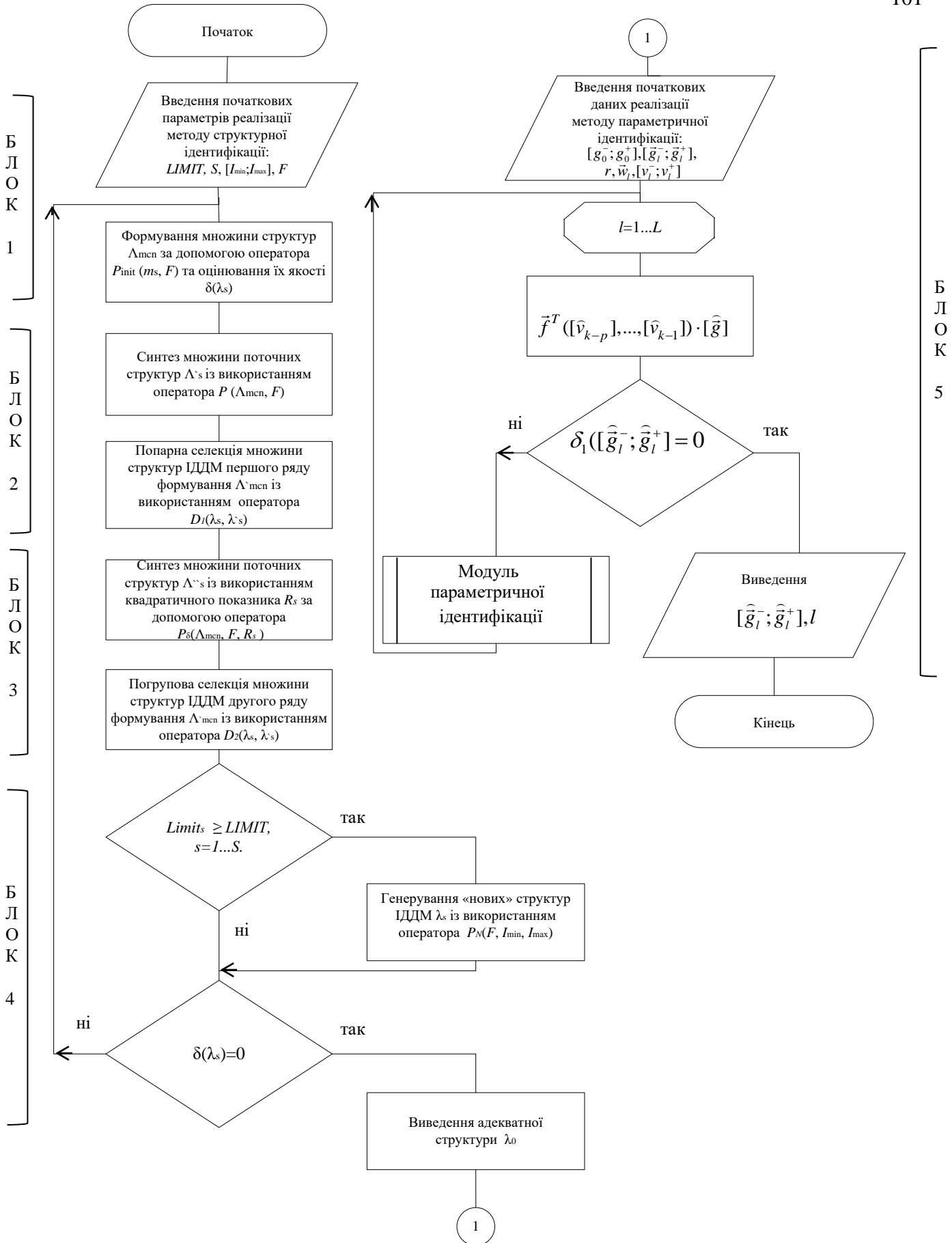


Рисунок 3.3 – Узагальнена блок-схема алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Після цього формуємо початкову множину структур ІДДМ  $\Lambda_0$  (потужності  $S$ ). Варто зазначити, що початкову множину структур ІДДМ  $\Lambda_0$  формуємо випадковим чином із набору структурних елементів  $F$  із використанням оператора  $P_{init}(m_s, F)$ .

«Блок 2» синтезує множини поточних структур ІДММ  $\Lambda_{mcn}^1$ , здійснений шляхом перетворення множини структур  $\Lambda_{mcn}$  ( $mcn$  – номер поточної ітерації) у множину структур ІДДМ  $\Lambda_{mcn}^1$ . Таке перетворення здійснюється за допомогою оператора  $P(\Lambda_{mcn}, F)$ . Далі проводиться попарна селекція структур ІДДМ із застосуванням оператора  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$  з отриманням множини найкращих структур  $\Lambda_{mcn}^1$ .

«Блок 3» перетворює кожен структуру  $\lambda_{mcn}^1$  із множини структур  $\Lambda_{mcn}^1$  у множину структур ІДДМ  $\Lambda_s^1$  (де  $s=1\dots S$ ), шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із набору  $F$ . Тоді позначимо за  $\Lambda_{mcn}^2$  таке об'єднання множин  $\Lambda_{mcn}^2 = \{\lambda_1^1 \cup \lambda_2^1 \dots \cup \dots \lambda_s^1 \dots \cup \lambda_s^1\}$ ,  $s=1\dots S$ . Таким чином, із використанням оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  отримуємо множину структур  $\Lambda_{mcn}^2$ . Далі проводиться по-групово селекція поточних структур ІДДМ із застосуванням оператора  $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$  із отриманням множини «найкращих» структур  $\Lambda_{mcn}^2$  із поточних множин  $\Lambda_{mcn}^1$ .

«Блок 4» перевіряє «вичерпаності» поточних структур ІДДМ. Усі структури  $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mcn}^2$ , для яких виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважаємо «вичерпаніми». Якщо структура є «вичерпаною», то замінюємо її «ною», яку генеруємо на основі оператора  $P_N(F, I_{min}, I_{max})$ .

Якщо знайдено хоча б одну структуру, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$ , то завершуємо процедуру структурної ідентифікації, в іншому випадку повертаємося у «Блок 2» [28].

«Блок 5» переходить до кроку реалізації нового методу параметричної ідентифікації із знаходженням інтервальних оцінок параметрів, який описаний у попередньому розділі. Модуль параметричної ідентифікації здійснює процедуру реалізації послідовності 1-4 кроків алгоритму параметричної ідентифікації, наведених у підрозділі 2.3.

Як уже зазначалось в попередньому підрозділі, на інтенсивність пошуку джерела нектару впливає значення показника  $R_s$  в операторі  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , що призначений для визначення числа «структур-нащадків», які потрібно згенерувати із подібним властивостями (подібними структурними елементами) як у «структури-предка». Зміна способу реалізації цього показника дасть можливість знизити обчислювальну складність його застосування.

Тому розглянемо детальніше «Блок 3» із рис. 3.3. За аналогією до поведінкової моделі бджолоїної колонії цей блок реалізує фазу активності бджіл-дослідників. Це означає, що після «бджолоїного танцю» в окіл кращих джерел їжі летять бджоли-дослідники із вулика, причому чим якісніше джерело їжі, тим більше туди летить бджіл [7].

У «Блоці 3» оператор  $P_\delta(\lambda_{mcn}, F, R_s)$  здійснює формування множини поточних структур ІДДМ  $\Lambda_{mcn}^2$  з урахуванням їх «якості»:

$$\Lambda_{mcn}^2 = P_\delta(\Lambda_{mcn}^1, F, R_s), \quad (3.15)$$

Із математичної точки зору, оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  означає перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  з множини структур  $\Lambda_{mcn}^1$  першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму  $mcn$ , у множини структур ІДДМ  $\Lambda_s^1$  (де  $s = 1 \dots S$ ) заміною випадковим чином  $m_s$  елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із множини структурних елементів  $F$ . Однак

оператор  $P_{\delta}(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  здійснює заміну лише для тих структур  $\lambda_s^1 \in \lambda_{mcn}^1$ , для яких  $R_s > 0$ .

### 3.4. Програмний комплекс реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей

Розроблений програмний комплекс призначений для моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях та реалізує пошук структури математичної моделі із урахуванням розширення функціональних можливостей унаслідок уведення в існуючий комплекс процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у програмному модулі структурної ідентифікації та програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

Провівши аналіз вимог до системи виділимо наступні варіанти використання, які зображено на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Функціональна модель розроблюваного програмного комплексу для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях



Розглянемо детальніше функціональні можливості зазначеного програмного комплексу.

Як показано на рис. 3.4 програмна система дає можливість побудувати ІДДМ для конкретної стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, а також провести прогнозування по вибраній стадії процесу бродіння на основі уже відомої ІДДМ.

При побудові моделі потрібно ввести експериментальні дані, задати початкові параметри налаштування, задати степінь полінома та порядок ІДДМ. А далі, на основі введених параметрів реалізації методу проводимо структурну ідентифікацію моделі із урахуванням процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару», де функція «Формування набору структурних елементів» автоматично генерує масив усіх можливих структурних елементів. Тоді функція «Параметрична ідентифікація моделі» реалізує новий метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів із застосуванням методу випадкового пошуку на основі напрямного конуса Растрігіна. Функція «Виведення та збереження структури моделі» забезпечує можливість зупинки програми, а функція «Побудова коридору динаміки вихідної характеристики» будує графік коридору динаміки вихідної характеристики.

При прогнозуванні по вибраній стадії процесу бродіння програмний модуль дає можливість обрати модель, ввести початкові дані, а функція «Побудова коридору прогнозованих інтервальних значень вихідної характеристики» дозволяє графічно зобразити прогнозовані інтервальні значення вихідної характеристики.

Програмний комплекс для автоматизації побудови моделі для конкретної стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, а також для прогнозування по вибраній стадії процесу бродіння ІДДМ розроблено із використанням об'єктно-орієнтованого підходу.

Для його реалізації застосовано мову програмування C# , технологію .NET, а також використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio.

На рис. 3.5. показано об'єктно-орієнтовану модель програмного комплексу для структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії із використанням процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» та для параметричної ідентифікації процесів ДДМ з інтервальним представленням їх параметрів із використанням методу випадкового пошуку на основі напрямного конуса Растрігіна.

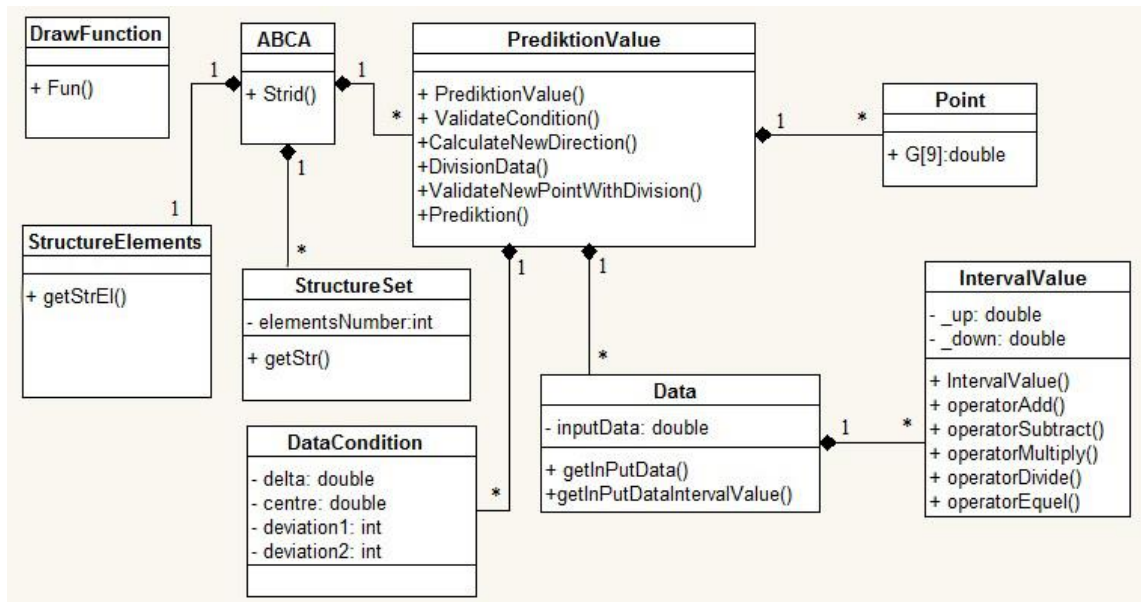


Рисунок 3.5 – Діаграма класів програмного комплексу для моделювання та прогнозування вихідних продуктів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках

Для зручності використання програмного комплексу розроблено графічний інтерфейс для введення даних та виведення структур ІДДМ для процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, а також для візуалізації результатів моделювання та прогнозування, який представлено на рис. 3.6-3.12.

Розглянемо детальніше особливості програмного інтерфейсу розробленого комплексу на прикладі задач структурної та параметричної ідентифікації математичної моделі анаеробного мікробіологічного бродіння ТПОВ у біогазових установках для конкретної стадії. На рис. 3.6 зображено елемент програмного інтерфейсу для вибору подальшої операції, тобто для вибору стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння.

Обравши стадію для побудови математичної моделі процесу бродіння (в даному випадку – стадію ацетогенезу), вибираємо наступну опцію програмного комплексу: побудувати модель чи спрогнозувати дані по вибраній стадії.

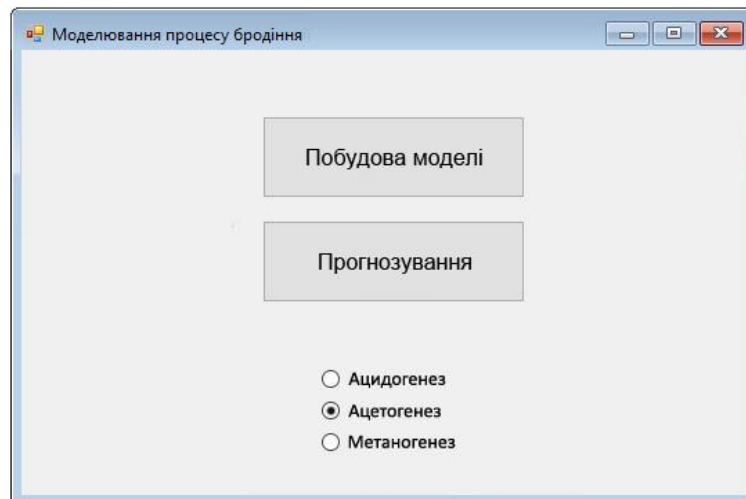


Рисунок 3.6 – Елемент програмного інтерфейсу для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

Вибравши опцію «Побудова моделі» програмний модуль завантажить наступний елемент програмного інтерфейсу, який відображає сторінку введення експериментальних даних та початкових параметрів налаштування. Далі у програмному модулі динамічно генеруються задана кількість комірок, які необхідно заповнити експериментальними даними (рис. 3.7).

Побудова моделі

Введіть похибку відхилення даних:

Введіть умову відхилення похибки:

Введіть кількість днів спостереження:

Введіть експериментальні дані:

88	85	84	81	78	81	82	84	86	89	91
90	88	88	87	88	88	89	90	91	92	91
91	90	89	87	83	80	76	78	80	79	79
78	76	77	78	79	80	81	82	82	82	80
77	75	75	75	75	75	74	74	73	73	72

Рисунок 3.7 – Елемент програмного інтерфейсу для введення експериментальних даних та початкових параметрів налаштування

Після уведення усіх необхідних даних та натиснувши кнопку «Далі» програмний модуль завантажить наступний елемент програмного інтерфейсу (див. рис. 3.8), де необхідно ввести степінь полінома та порядок ІДДМ, який визначає початкові умови для реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ.

Побудова моделі

Введіть степінь полінома:

Введіть порядок ІДДМ:

Введіть початкову кількість структур ІДДМ:

Введіть кількість структурних елементів в структурі ІДДМ: 3  до

Введіть максимальну кількість ітерацій алгоритму:

Введіть максимальну можливу кількість ітерацій "незмінності" структури:

Рисунок 3.8 – Елемент програмного інтерфейсу введення початкових параметрів реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ

Також на цій сторінці програмного інтерфейсу потрібно ввести початкові параметри реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ,

заповнивши усі поля, а саме: початкову кількість структур ІДДМ –  $S$ , кількість структурних елементів у структурі ІДДМ –  $[I_{\min}; I_{\max}]$ , максимальну кількість ітерацій алгоритму –  $MCN$ , максимальну можливу кількість ітерацій «незмінності» структури –  $LIMIT$ .

Після введення усіх необхідних даних та натиснувши на кнопку «Далі», запустивши при цьому функцію «Структурна ідентифікація моделі», програмний модуль здійснює процес етапу структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ. У програмному модулі структурної ідентифікації використовується процедура для реалізації квадратичного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару», а в модулі параметричної ідентифікації використовується алгоритм ДДМ процесу з інтервальним представленням їх параметрів.

Через деякий проміжок часу, як тільки буде знайдено результат, який задовольняє умови (3.6), програмний модуль завантажить елемент програмного інтерфейсу з вказаною структурою та із знайденими її інтервальними оцінками параметрів (як показано на рис. 3.9).

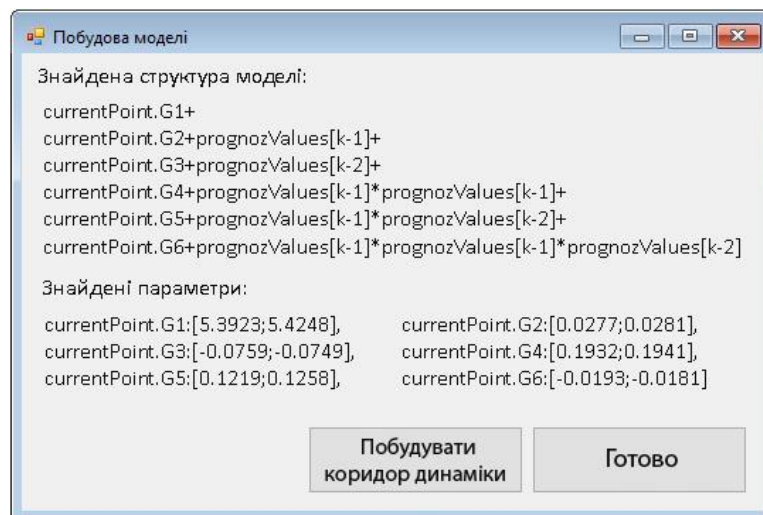


Рисунок 3.9 – Елемент програмного інтерфейсу програмного комплексу для виведення результатів моделювання

Програмний модуль також надає можливість побудувати графік коридору динаміки вихідної характеристики. Для цього потрібно вибрати

опцію «Побудувати коридор динаміки» і він завантажить елемент програмного інтерфейсу із зображенням графіка коридору динаміки вихідної характеристики процесів анаеробного мікробіологічного бродіння (рис. 3.10). В іншому випадку, обравши опцію «Готово» програмний модуль завершить процес моделювання та закриє програму.

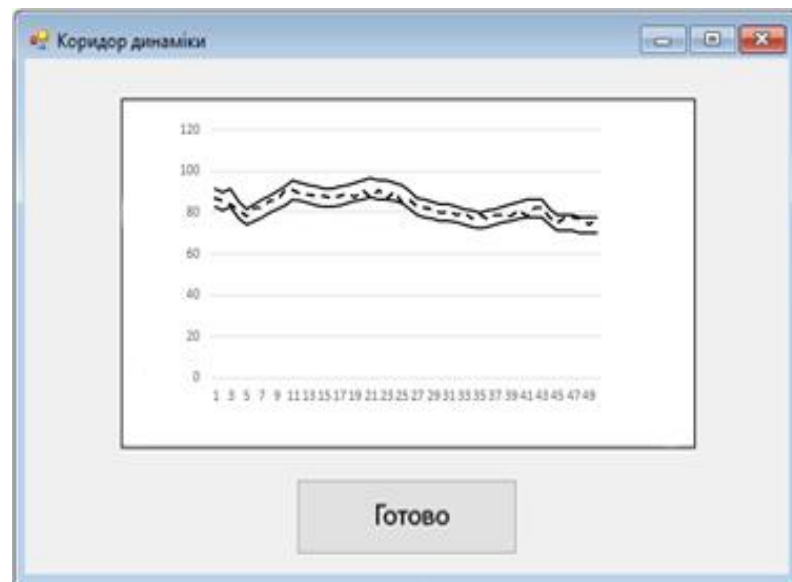


Рисунок 3.10 – Елемент програмного інтерфейсу для виведення коридору динаміки вихідної характеристики процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

Повернемося до рис. 3.6, де після вибору стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, вибираємо подальшу опцію «Прогнозування» по цій стадії. Тоді ж програмний модуль завантажить елемент програмного інтерфейсу для прогнозування по вибраній стадії процесу, де обравши модель для прогнозування на цій стадії та ввівши початкові дані та обравши опцію «Розпочати прогнозування» (рис. 3.11), модуль побудує графік коридору прогнозованих інтервальних значень вихідної характеристики процесу анаеробного мікробіологічного бродіння (рис. 3.12).

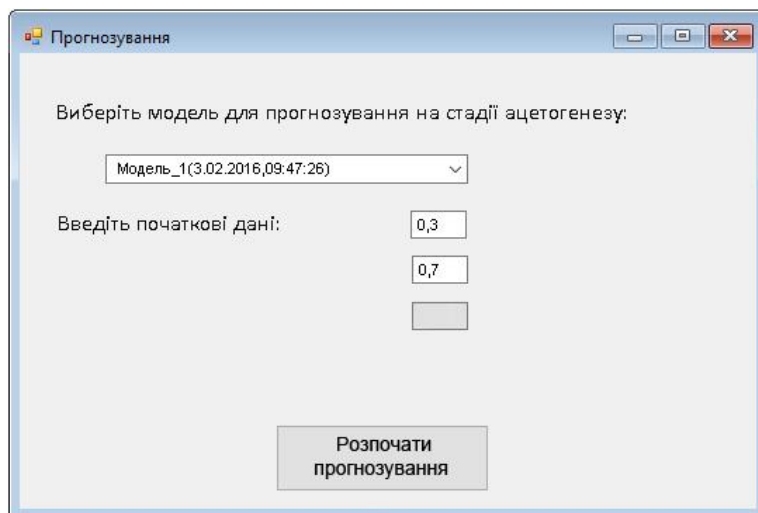


Рисунок 3.11 – Елемент програмного інтерфейсу для прогнозування по вибраній стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

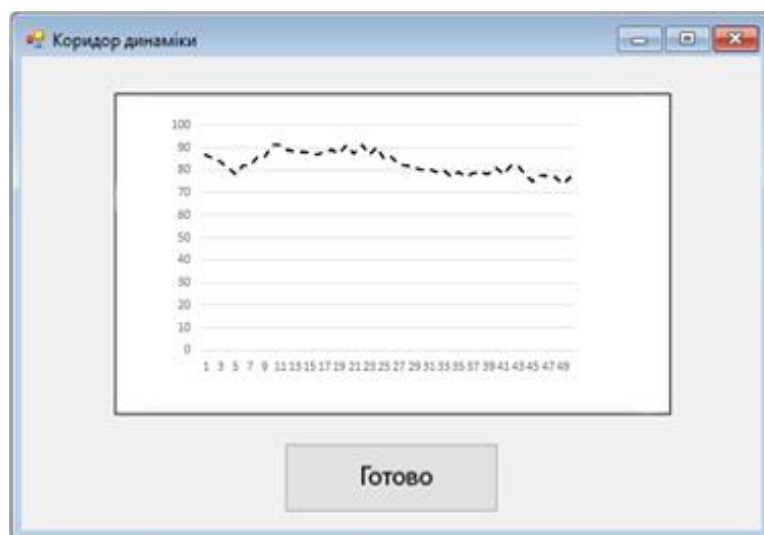


Рисунок 3.12 – Елемент програмного інтерфейсу для побудови коридору прогнозованих інтервальних значень вихідної характеристики процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

Таким чином, створений програмний комплекс призначений для автоматизації побудови математичної моделі на будь-якій стадії, а також для прогнозування ІДДМ по вибраній стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розглянуто задачу оцінювання якості структури дискретної динамічної моделі та проведено обґрунтування методу її розв'язування. Поєднання компонентів поведінкової моделі бджолоїної колонії, методу аналізу інтервальних даних та методу параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді інтервальних оцінок параметрів створює можливості сформулювати теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму функції мети в задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

2. Удосконалено метод структурної ідентифікації ДДМ на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії. У запропонованому методі обґрунтовано використання нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у вигляді квадратичної залежності між кількістю «структур-нащадків» згенерованих «навколо» поточної «структури-предка» та значенням функції мети для цієї «структури-предка». Такий підхід дозволив підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і таким чином знизити обчислювальну складність його реалізації.

3. На тестових прикладах для різницевих рівнянь з різною кількістю елементів проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності існуючого та запропонованого методу структурної ідентифікації. Показано зниження обчислювальної складності для запропонованого методу мінімум на 5% для простих моделей та до 50% для більш складних.

4. Розроблено блок-схему алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Запропонована схема побудована на квадратичній залежності між кількістю «структур-нащадків» згенерованих «навколо» поточної «структури-предка» та значенням функції мети для цієї «структури-предка», а також використовує новий метод параметричної ідентифікації, який дає можливість обчислити інтервальні оцінки параметрів ІДДМ.



5. Запропоновано та обґрунтовано функціональну модель програмного комплексу для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях. На основі цієї моделі побудовано програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями внаслідок уведення в існуючий комплекс програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у програмному модулі структурної ідентифікації.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРОБКИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ АНАЕРОБНОГО МІКРОБІОЛОГІЧНОГО БРОДІННЯ**

Розроблений метод параметричної ідентифікації у вигляді інтервальних оцінок параметрів ІДДМ та удосконалений метод структурної ідентифікації цих моделей дають можливість побудувати математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок вимірювань.

Як відомо з першого розділу, загалом ці процеси мають три стадії: ацидогенезу, ацетогенезу і метаногенезу. Розділення на зазначені стадії є дещо умовним, хоч кожна з них має свої ознаки та часові межі, де інтенсивність певного процесу є високою. Таким чином, створення математичних моделей для кожної стадії дає можливість корегувати процес завдяки зміни технологічних параметрів: температури та (чи) кислотності середовища.

З іншого боку, важливим завданням є апробація розроблених методів ідентифікації математичних моделей, підтвердження достовірності отриманих при цьому наукових результатів на прикладі побудови цих моделей. Одним із важливих завдань, які також висвітлені в цьому розділі, є перевірка впливу вибору початкових умов при побудові ІДДМ на стійкість результату моделювання.

Матеріали цього розділу опубліковано автором у працях [73-77, 80-81].

#### **4.1. Інтервальна дискретна динамічна модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових органічних відходів у біогазових установках на стадії ацидогенезу**

При бродінні цукрів, вищих жирних кислот та амінокислот на стадії ацидогенезу ацетат є важливим проміжним елементом, з якого за участю кислоутворюючих бактерій на стадії ацетогенезу відбувається подальше розкладання з утворенням органічних кислот і їх солей, а також спиртів та альдегідів. Ці кислоти окислюються і утворюється оцтова кислота. На цій стадії до ферментативного виробництва залучаються види кислоутворюючих бактерій *Acetobacter acetii* та штучно виведені *Clostridium thermoaceticum*. Для підживлення цих бактерій використовують цукровмісну сировину — глюкозу, яка утворюється при першому етапі – гідролізі. На останньому етапі – метаногенезі за допомогою метаноутворюючих бактерій відбувається метанове бродіння, що є остаточним бактеріальним перетворенням органічних речовин з утворенням метану й води. Метаноутворюючі бактерії більш чутливі до умов середовища, а ніж кислоутворюючі; вони потребують повної відсутності кисню [22].

У прикладі, наведеному у праці [23], розглянуто процеси анаеробного бродіння ТПОВ. Усі експериментальні дані отримано з літератури для умов використання 5-літрового реактора з періодичним завантаженням із початковим об'ємом субстрату 3 дм<sup>3</sup>.

Біореактор містив ТПОВ, які були зібрані з різних фракцій паперу і харчові відходи також в біореактор додавали попередньо подрібненні макулатуру і паперові упаковки подрібнювали. Усі складові подрібнювалися та перемішувалися спеціальним блендером. Процес бродіння досліджувався від початку завантаження твердих органічних побутових відходів протягом 50 діб при температурі  $T_0=[35;37]^{\circ}\text{C}$ . Іншим параметром технологічного процесу є кислотність середовища, яку можливо корегувати способом додавання лужного розчину. А саме для зазначеного об'єму достатньо додати

декілька грамів лугів  $\text{NaHCO}_3$  та (чи)  $\text{NaOH}$ , для контролю і підвищення рН середовища до 7,2.

У зазначеному прикладі, посівний матеріал для варильного котла складав 500 мл суміші анаеробного мулу (75%) і гній великої рогатої худоби (25%). До отриманого субстрату також додали 150 мл дистильованої води.

Основними вихідними продуктами на стадії ацидогенезу є ацетат, концентрація якого вимірювалась щодня. Так само вимірювались показники відсотка від загального МСО рРНК як кислотоутворюючих бактерій, так і метаноутворюючих. Як відомо, вибір МСО рРНК цільових олігонуклеотидних зондів був використаний для визначення відносних концентрацій трьох доменів (Bacteria, Archaea і Eucarya). Сума відносних кількостей Bacteria, Archaea і Eucarya (представлені у вигляді відсотка від загального МСО рРНК) повинна дорівнювати 100%, так як всі відомі організми містяться в межах цих трьох областей [40]. Традиційно тип Bacteria становлять більшість мікроорганізмів в реакторах, Archaea присутні в менших кількостях (менше 10% в більшості випадків), і Eucarya присутні на дуже низькому рівні (0,8%).

Для урахування розкиду технологічних параметрів температури чи кислотності середовища задали похибки спостереження процесу на рівні 5% від середніх для середньої температури в реакторі та середньої кислотності. Критерієм адекватності моделі були умови, щоб інтервальні оцінки прогнозованого значення концентрації ацетату були в межах цієї відносної похибки.

У цих умовах доцільним є використання методів аналізу інтервальних даних, зокрема розроблених методів структурної та параметричної ідентифікації

Вихідні дані для заданих технологічних чинників (температури процесу бродіння та кислотності середовища) із урахуванням їх розкидів, наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Динаміка концентрації ацетату на стадії ацидогенезу, відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій на стадіях ацетогенезу та метаногенезу протягом 50 діб в інтервальному вигляді

$k$	$\tau$ , діб	$v_k^-$ , $\frac{мг}{л}$	$v_k^+$ , $\frac{мг}{л}$	$v_k^-$ , % МСО рРНК	$v_k^+$ , % МСО рРНК	$v_k^-$ , % МСО рРНК	$v_k^+$ , % МСО рРНК
0	1	0,285	0,315	9,5	10,5	84	96
2	3	0,903	0,997	8,55	9,45	78	90
4	5	1,473	1,627	7,44	8,56	73	83
6	7	2,28	2,52	7,89	9,23	76	88
8	9	2,945	3,255	8,835	10,165	80	92
10	11	3,705	4,095	7,89	9,23	85	97
12	13	4,275	4,725	6,324	7,346	83	95
14	15	4,75	5,25	4,8825	5,6175	81	93
16	17	3,61	3,99	5,115	5,885	82	94
18	19	2,47	2,73	5,8125	6,68	84	96
20	21	1,425	1,575	6,975	8,025	86	98
22	23	0,38	0,42	7,975	9,025	85	97
24	25	0,285	0,315	7,875	8,925	83	95
26	27	0,266	0,294	7,068	8,284	77	89
28	29	0,247	0,273	5,9125	6,78	71	81
30	31	0,209	0,231	3,9525	4,7475	75	75
32	33	0,18	0,2	2,325	3,375	73	73
34	35	0,162	0,178	1,767	2,333	71	71
36	37	0,143	0,157	1,7475	1,9825	73	73
38	39	0,124	0,136	1,6575	1,9025	75	75
40	41	0,114	0,126	1,6275	1,8725	77	77
42	43	0,105	0,115	1,6275	1,8725	77	77
44	45	0,095	0,105	1,6275	1,8725	70	80
46	47	0,095	0,105	1,6275	1,8725	70	80
48	49	0,095	0,105	1,6275	1,8725	69	79
49	50	0,095	0,105	1,6275	1,8725	69	79

Для синтезу математичної моделі процесу перш за все сформулюємо структуру моделі (етап структурної ідентифікації), після цього проведемо

процедуру налаштування її параметрів (етап параметричної ідентифікації) [131].

Як показано у попередніх розділах, для структурної ідентифікації необхідно сформувавши набір структурних елементів. Опіраючись на відомі особливості процесу ацидогенезу згенеруємо набір структурних елементів. Результати цієї процедури наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Множина структурних елементів  $F$  моделей динаміки концентрації ацетату ТПОВ на стадії ацидогенезу

№пп	Структурний елемент	№пп	Структурний елемент
1	$v_{k-1}$	99	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-5}$
2	$v_{k-2}$	...	...
...	...	126	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-9}$
9	$v_{k-9}$	...	...
10	$v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	137	$v_{k-2} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$
11	$v_{k-1} \cdot v_{k-2}$	...	...
...	...	154	$v_{k-4} \cdot v_{k-5} \cdot v_{k-9}$
18	$v_{k-1} \cdot v_{k-9}$	...	...
19	$v_{k-2} \cdot v_{k-2}$	174	$v_{k-7} \cdot v_{k-8} \cdot v_{k-9}$
20	$v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	175	$v_{k-1}^3$
...	...	...	...
27	$v_{k-2} \cdot v_{k-9}$	184	$v_{k-1}^4$
...	...	...	...
90	$v_{k-9} \cdot v_{k-9}$	193	$v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-2}$
91	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	...	...
93	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-4}$	201	$v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-3}$
...	...	...	...
98	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$	390	$v_{k-9} \cdot v_{k-9} \cdot v_{k-9} \cdot v_{k-8}$

Для побудови ІДДМ процесу формування концентрацій ацетату необхідно задати початкові умови у вигляді вимірних значень концентрацій ацетату на початкових дискретах:  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = [v_{k=0} - v_{k=0} \cdot 0,01; v_{k=0} + v_{k=0} \cdot 0,01]$ ,  $\{k=0, \dots, 9\}$ . Варто зазначити, що широкі інтервали вибору початкових умов можуть ускладнити процес структурної ідентифікації, або навіть призвести до відсутності єдиної математичної моделі, яка якісно адекватно описує процеси на цій стадії. Водночас суттєве звуження інтервалів для початкових умов не дасть можливості при використанні моделі урахувати реальні можливі розкиди технологічних параметрів процесу.

Для синтезу структури ІДДМ за допомогою методу структурної ідентифікації згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=390$ . Множина структурних елементів містить поліноміальні функції не вищій четвертого степеня.

Для реалізації методу структурної ідентифікації задаємо такі параметри алгоритму:  $MCN=100$ ;  $LIMIT=5$ ;  $S=15$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 7]$  та множину структурних елементів  $F$  (табл. 4.2).

Далі формуємо початкову множину структур ІДДМ  $\Lambda_0$ ,  $S=15$  (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Початкова множина структур ІДДМ динаміки концентрації ацетату ТПОВ на стадії ацидогенезу

№	Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s$ , $s = 1 \dots S$ .	Значення функції мети $\delta(\lambda_s)$
1	2	3
1	4, 56, 86, 215, 286	9,43
2	12, 156, 209, 329	6,566

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
3	22, 27, 106, 127, 294	2,314
4	113, 200, 233, 256, 312	7,003
5	7, 46, 79, 104, 216, 334, 351	2,906
6	9, 15, 211, 300	5,715
7	98, 108, 205, 222, 321	6,304
8	3, 87, 156, 198	8,381
9	34, 49, 99, 107, 303	8,507
10	9, 15, 38, 388	7,406
11	24, 109, 116, 334, 380	4,632
12	5, 67, 90, 238, 288	3,96
13	77, 168, 170, 234	2,133
14	32, 48, 100, 222, 379	6,54
15	29, 77, 139, 211, 255, 258, 361	5,314

Ураховуючи заданий початковий набір структурних елементів, на кожній ітерації з використанням операторів алгоритму бджолоїної колонії отримуємо послідовність структур, які в кінцевому випадку забезпечують виконання умов гарантованої точності ІДДМ для усіх дискретних значень.

Унаслідок проведення етапу структурної ідентифікації, а саме проведення 22 ітерацій модифікацій ІСНАР, отримали ІДДМ динаміки концентрації ацетату при бродінні ТПОВ на стадії ацидогенезу:

$$\begin{aligned}
 [\hat{v}_k^-, \hat{v}_k^+] = & [0.0641; 0.0642 + [0.7601; 0.7604] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] + [0.1788; 0.1789] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \times \\
 & \times [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] - [0.0929; 0.0931] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-, \hat{v}_{k-9}^+] - [0.0017; 0.0018] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-, \hat{v}_{k-9}^+] \times \\
 & \times [\hat{v}_{k-5}^-, \hat{v}_{k-5}^+] - [0.0068; 0.0069] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-3}^-, \hat{v}_{k-3}^+] \cdot [\hat{v}_{k-5}^-, \hat{v}_{k-5}^+], k = 9 \dots 49.
 \end{aligned} \quad (4.1)$$



Отримана структура дискретної динамічної моделі і параметри дали можливість побудувати адекватну ІДДМ процесу ацидогенезу.

Результати прогнозування в порівнянні з експериментальними даними динаміки концентрації ацетату ТПОВ при  $pH=7,2$  та із урахуванням розкиду цього параметру в межах допустимих  $[7,1; 7,3]$  (близько 1%) наведено на рис. 4.1.

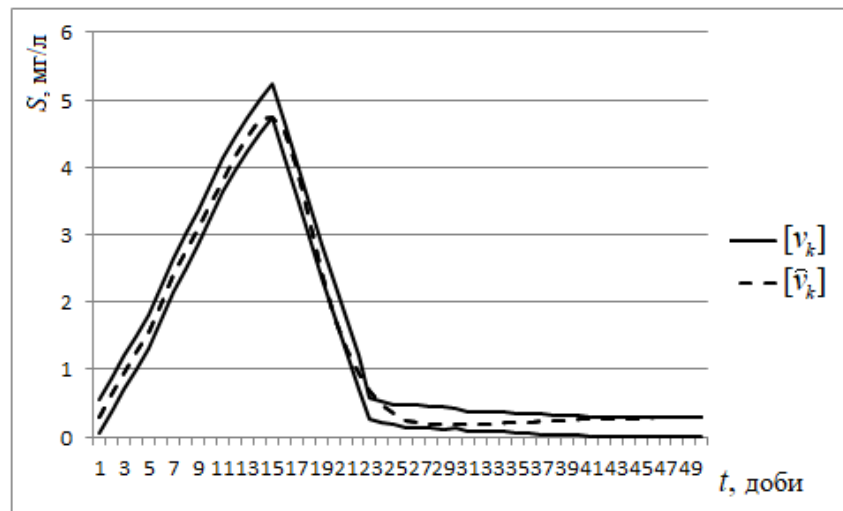


Рисунок 4.1 – Коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ при  $pH=7,2$  в межах розкиду  $[7,1; 7,3]$

Як бачимо з рис. 4.1 коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ знаходиться в межах коридору експериментальних даних, що забезпечує адекватність математичної моделі.

Отримана модель дає можливість спрогнозувати коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ на стадії ацидогенезу, яка містить такі фактори впливу як: температура середовища  $[T^-; T^+] = [35; 37]^{\circ}C$  і кислотність середовища  $pH=7,2$  в межах розкиду  $[7,1; 7,3]$ .

Таким чином, користуючись моделлю, можемо забезпечити на цій стадії оптимальну динаміку концентрації ацетату, яка своєю чергою, визначить оптимальний розвиток популяції мікроорганізмів, а саме кислотоутворюючих бактерій на наступній стадії анаеробного мікробіологічного бродіння. Для застосування отриманої математичної моделі, з метою прогнозування

динаміки концентрації ацетату в субстраті в умовах зміни кислотності середовища бродіння, достатньо задати тільки початкові дані для цих умов.

Тестові дані динаміки концентрації ацетату для перевірки адекватності запропонованої математичної моделі отримали з праці [21] для таких значень кислотності середовища бродіння:  $pH_1=6,9$  та  $pH_2=7,5$ . Результати зіставлення наведено на рис. 4.2 та рис. 4.3 відповідно.

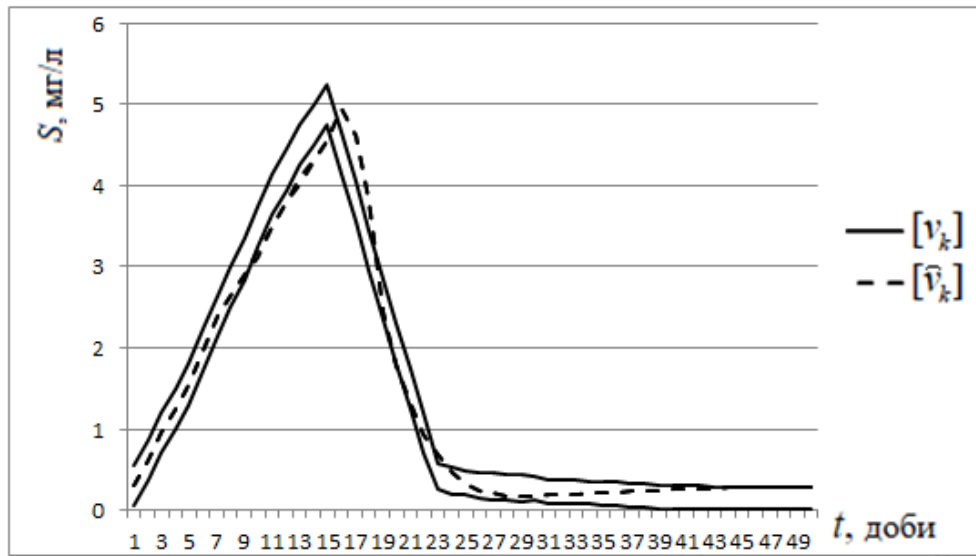


Рисунок 4.2 – Коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ при  $pH=6,9$

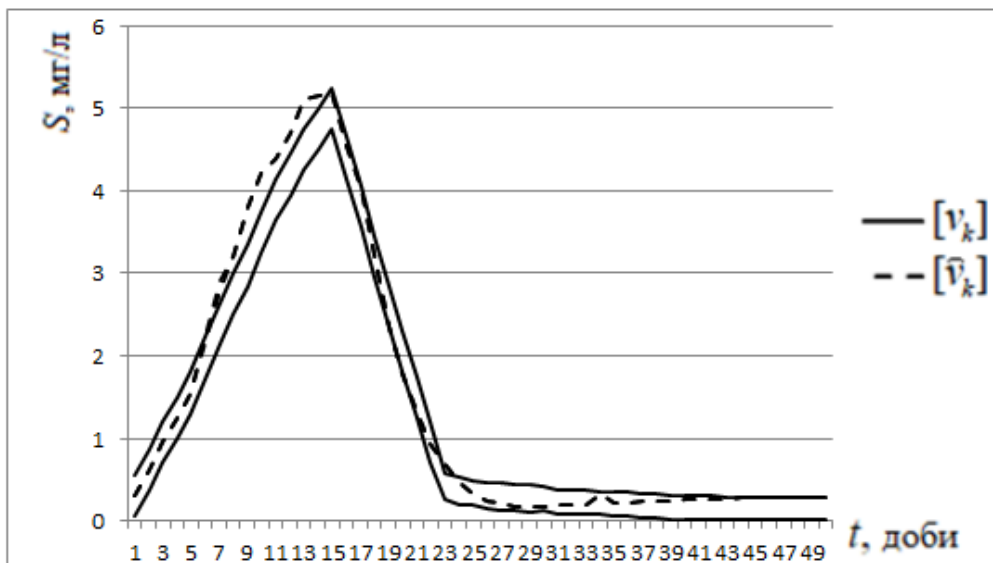


Рисунок 4.3 – Коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ при  $pH=7,5$

Як бачимо, отримана математична модель динаміки концентрації ацетату у БГУ є адекватною, оскільки процеси ацидогенезу представлені на рис. 4.2 та рис. 4.3 за тестовими та прогнозованими результатами якісно співпадають.

Незначні розбіжності в динаміці прогнозованого і тестового процесу можуть бути скомпенсовані у спосіб переходу від неавтономної до автономної моделі динаміки концентрації ацетату в субстраті завдяки введенню в цю модель додаткового чинника – кислотність середовища анаеробного мікробіологічного бродіння. Водночас запропонований у дисертації підхід урахування відхилень технологічних параметрів процесу у вигляді інтервальних оцінок параметрів моделі дає можливість отримати адекватні моделі.

#### **4.2. Інтервальна дискретна динамічна модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових органічних відходів у біогазових установках на стадії ацетогенезу**

Основним вихідним продуктом на стадії ацетогенезу є оцтова кислота, яка із взаємодією з метаноутворюючими бактеріями дасть можливість переходу на кінцевий етап, а саме метаногенез, де основним вихідним продуктом є біогаз.

Як і на попередній стадії, опираючись на відомі особливості процесів ацетогенезу, згенеруємо набір структурних елементів у вигляді ІДДМ. Результати цієї процедури наведемо у вигляді множини структурних елементів  $F$  моделі утворення кислотоутворюючих бактерій на етапах анаеробного процесу бродіння у таблиці 4.4.

Для побудови ІДДМ процесу формування відсотку МСО кислотоутворюючих бактерій необхідно задати початкові умови у вигляді вимірних значень концентрацій ацетату у початкових дискретах:  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = [v_{k=0} - v_{k=0} \cdot 0,01; v_{k=0} + v_{k=0} \cdot 0,01], \{k=0, \dots, 14\}$ .

Множина структурних елементів  $F$  моделей динаміки відсотку МСО рРНК  
кислоутворюючих бактерій ТПОВ на стадії ацетогенезу

№пп	Структурний елемент	№пп	Структурний елемент
1	$v_{k-1}$	56	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-14}$
2	$v_{k-2}$	57	$(v_{k-3} \cdot v_{k-3}) / v_{k-2}$
...	...	58	$(v_{k-3} \cdot v_{k-3}) / v_{k-1}$
13	$v_{k-13}$	...	...
14	$v_{k-14}$	79	$(v_{k-14} \cdot v_{k-14}) / v_{k-13}$
15	$v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	80	$(v_{k-14} \cdot v_{k-14}) / v_{k-12}$
16	$v_{k-2} \cdot v_{k-2}$	81	$v_{k-13} \cdot v_{k-13} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-2}$
...	...	82	$v_{k-13} \cdot v_{k-13} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-3}$
28	$v_{k-14} \cdot v_{k-14}$	...	...
29	$v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	93	$v_{k-13} \cdot v_{k-13} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-14}$
30	$v_{k-2} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-2}$	94	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-3}$
...	...	...	...
42	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-14}$	113	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-11}$
43	$v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	114	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-12}$
...	...	115	$v_{k-14} \cdot v_{k-14} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-13}$

Для синтезу структури ІДДМ за допомогою методу структурної ідентифікації згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=115$ . Множина структурних елементів містить поліноміальні функції не вищі четвертого степеня.

Для реалізації методу структурної ідентифікації задаємо такі параметри алгоритму:  $MCN=100$ );  $LIMIT=5$ ;  $S=10$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 7]$  та множину структурних елементів  $F$  (табл. 4.4).

Далі формуємо початкову множину структур ІДДМ  $\Lambda_0$ ,  $S=10$  (табл. 4.5).

Початкова множина структур ІДДМ динаміки концентрації ацетату ТПОВ на стадії ацидогенезу

№	Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s, s = 1 \dots S$ .	Значення функції мети $\delta(\lambda_s)$
1	16, 24, 48, 56, 84	6,64
2	14, 62, 89, 91	3,061
3	5, 9, 16, 27, 74, 102	12,08
4	11, 24, 48, 68, 85, 114	1,23
5	7, 54, 66, 94, 101, 113	4,546
6	8, 12, 92, 98, 100	2,653
7	11, 29, 35, 68, 72	1,784
8	23, 34, 61, 78, 81, 115	2,279
9	7, 25, 28, 79, 97, 101	3,092
10	1, 11, 38, 41	4,05

Ураховуючи заданий початковий набір структурних елементів, на кожній ітерації з використанням операторів алгоритму бджолоїної колонії отримуємо послідовність структур, які в кінцевому випадку забезпечують виконання умов гарантованої точності ІДДМ для усіх дискретних значень.

Унаслідок застосування алгоритму структурної ідентифікації отримали ІДДМ динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій у БГУ:

$$\begin{aligned}
 [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = & -[0.0491; 0.0497] + [0.1021; 0.1026] \cdot [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] / [\hat{v}_{k-8}^-; \hat{v}_{k-8}^+] - \\
 & - [0.1711; 0.1719] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] \cdot [\hat{v}_{k-14}^-; \hat{v}_{k-14}^+] \cdot [\hat{v}_{k-14}^-; \hat{v}_{k-14}^+] + [0.58; 0.5804] \times \\
 & \times [\hat{v}_{k-4}^-; \hat{v}_{k-4}^+] + [0.0231; 0.0234] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] + \\
 & + [0.4512; 0.4519] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+], k = 15 \dots 49.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Отримана структура дискретної динамічної моделі містить п'ять елементів і шість інтервальних оцінок параметрів.

Результати прогнозування в порівнянні з експериментальними даними динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій ТПОВ наведено на рис.4.4.

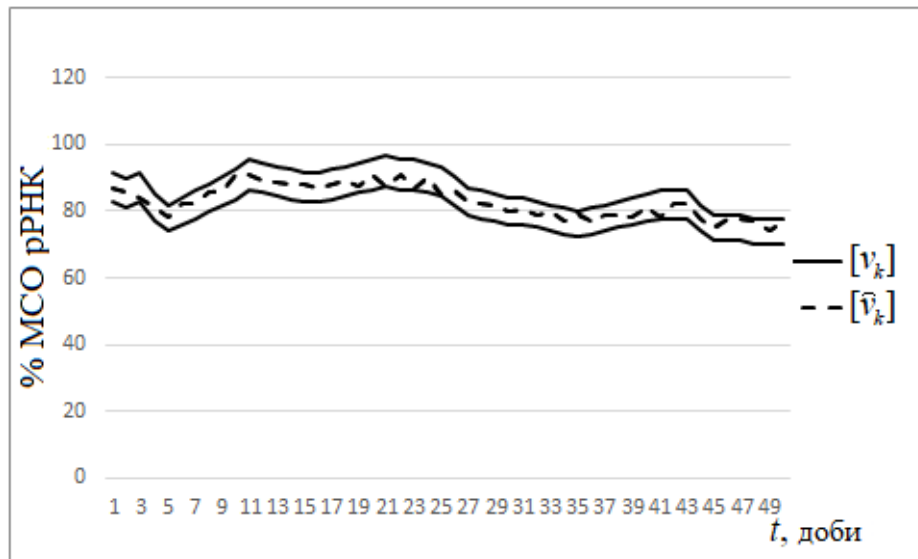


Рисунок 4.4 – Коридор динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій у БГУ

Як бачимо з рис. 4.4 коридор динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій у БГУ знаходиться в межах коридору експериментальних даних, що забезпечує адекватність математичної моделі.

Отримана модель дає можливість спрогнозувати коридор динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій у БГУ на стадії ацетогенезу, яка містить такі фактори впливу як: температура середовища  $[T^-; T^+] = [35; 37]^\circ\text{C}$  і кислотність середовища  $\text{pH} = 7,2$  з розкидом в межах 1%.

Таким чином, користуючись моделлю, можемо забезпечити на цій стадії оптимальний відсоток МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій у БГУ, яка своєю чергою, визначить оптимальний розвиток популяції мікроорганізмів, а саме метаноутворюючих бактерій на наступній стадії анаеробного мікробіологічного бродіння.

Для застосування отриманої математичної моделі, з метою прогнозування відсотку МСО рРНК кислоутворюючих бактерій в субстраті в умовах зміни кислотності середовища бродіння, достатньо задати тільки початкові дані для цих умов. Також на підставі отриманої моделі можливо регулювати процес для наступної стадії у спосіб зміни температури і (чи) кислотності.

#### 4.3. Інтервальна дискретна динамічна модель динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у біогазових установках

Як і в обох попередніх випадках побудови ІДДМ процесів на відповідних стадіях, для побудови ІДДМ процесу на стадії метаногенезу спочатку необхідно згенерувати набори структурних елементів. Опираючись на відомі особливості процесу метаногенезу згенеруємо набір структурних елементів у вигляді ІДДМ. Результати цієї процедури наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Множина структурних елементів  $F$  моделей процесу формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу

№пп	Структурний елемент	№пп	Структурний елемент
1	2	3	4
1	$v_{k-1}$	167	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-5}$
2	$v_{k-2}$	...	...
...	...	177	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-16}$
16	$v_{k-16}$	...	...
17	$v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	236	$v_{k-2} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$
18	$v_{k-1} \cdot v_{k-2}$	...	...
...	...	367	$v_{k-9} \cdot v_{k-12} \cdot v_{15}$
32	$v_{k-1} \cdot v_{k-16}$	...	...
33	$v_{k-2} \cdot v_{k-2}$	560	$v_{k-14} \cdot v_{k-15} \cdot v_{k-16}$

Продовження таблиці 4.6

1	2	3	4
34	$v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	561	$v_{k-1} / v_{k-2}$
...	...	562	$v_{k-1} / v_{k-3}$
47	$v_{k-2} \cdot v_{k-16}$	...	...
...	...	575	$v_{k-1} / v_{k-16}$
152	$v_{k-16} \cdot v_{k-16}$	...	...
153	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	802	$v_{k-16} / v_{k-1}$
154	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-4}$	803	$v_{k-16} / v_{k-2}$
...	...	...	...
166	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$	816	$v_{k-16} / v_{k-15}$

Як бачимо з таблиці 4.6, для синтезу структури ІДДМ за допомогою методу структурної ідентифікації згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=816$ . Множина структурних елементів містить поліноміальні функції не вищі третього степеня.

Для побудови ІДДМ процесу формування метаноутворюючих бактерій необхідно задати початкові умови у вигляді вимірних значеннях відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у початкових дискретах:  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = [v_{k=0} - v_{k=0} \cdot 0,01; v_{k=0} + v_{k=0} \cdot 0,01]$ ,  $\{k=0, \dots, 15\}$ .

Для реалізації методу структурної ідентифікації задаємо такі параметри алгоритму:  $MCN=100$  (максимальне кількість ітерацій алгоритму);  $LIMIT=5$  (максимальну можливу кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо структура ІДДМ не покращувалася у процесі її перетворення  $LIMIT$  разів, то вона вважається «вичерпаною»);  $S=20$  (початкову кількість структур ІДДМ),  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 7]$  (інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне  $I_{\min}$  та максимальне  $I_{\max}$  значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІДДМ  $\lambda_s$ ) та множину структурних елементів  $F$ .



Далі формуємо початкову множину структур ІДДМ  $\Lambda_0$  (потужністю  $S=20$ ). Результати цієї процедури наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Початкова множина структур ІДДМ процесу формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу

№	Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s$ , $s = 1 \dots S$ .	Значення функції мети $\delta(\lambda_s)$
1	111, 187, 216, 400	13,654
2	4, 56, 309, 522, 679	8,006
3	54, 405, 516, 527, 714, 802	11,543
4	119, 214, 298, 468, 588, 635, 698	13,883
5	77, 504, 616, 634	12,46
6	1, 5, 211, 611	4,675
7	67, 88, 315, 442, 721	9,34
8	223, 344, 614, 645, 811	12,831
9	14, 45, 568, 697, 719, 803	8,192
10	9, 14, 98, 318, 488, 586, 708	10,047
11	25, 105, 216, 339, 561, 734	11,6
12	59, 146, 287, 538, 588, 735, 804	7,896
13	377, 568, 590, 734	9,533
14	412, 458, 600, 722, 779	11,315
15	34, 67, 98, 125, 488, 735, 779	10,678
16	7, 12, 105, 737	12,005
17	4, 12, 567, 600, 624, 755	13,972
18	9, 111, 149, 346, 590, 815	6,817
19	611, 623, 744, 787, 794, 810	9,211
20	4, 604, 616, 812	8,995

Опираючись на поведінкову модель бджолоїної колонії, з набору структурних елементів послідовно формуємо «нові» структури ІДДМ. Для їх оцінки кожен раз мінімізуємо функцію мети задачі параметричної ідентифікації для поточної структури моделі.

Ураховуючи заданий початковий набір структурних елементів, на кожній ітерації з використанням операторів алгоритму бджолоїної колонії отримуємо послідовність структур, які в кінцевому випадку забезпечують виконання умов гарантованої точності ІДДМ для усіх дискретних значень.

Унаслідок проведення етапу структурної ідентифікації, після 28 ітерацій модифікацій ІСНАР, отримали ІДДМ динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ:

$$[\hat{v}_k^-, \hat{v}_k^+] = [0.8527; 0.8531] + [0.0029; 0.0031] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-, \hat{v}_{k-9}^+] \cdot [\hat{v}_{k-16}^-, \hat{v}_{k-16}^+] - [0.1009; 0.1011] \cdot [\hat{v}_{k-8}^-, \hat{v}_{k-8}^+] / [\hat{v}_{k-2}^-, \hat{v}_{k-2}^+] + [0.8617; 0.8621] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] - [0.1278; 0.1279] \cdot [\hat{v}_{k-5}^-, \hat{v}_{k-5}^+] - [0.0342; 0.0344] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-, \hat{v}_{k-2}^+] / [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+], k = 16 \dots 49. \quad (4.3)$$

Результати прогнозування в порівнянні з експериментальними даними відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ на стадії метаногенезу наведено на рис.4.5.

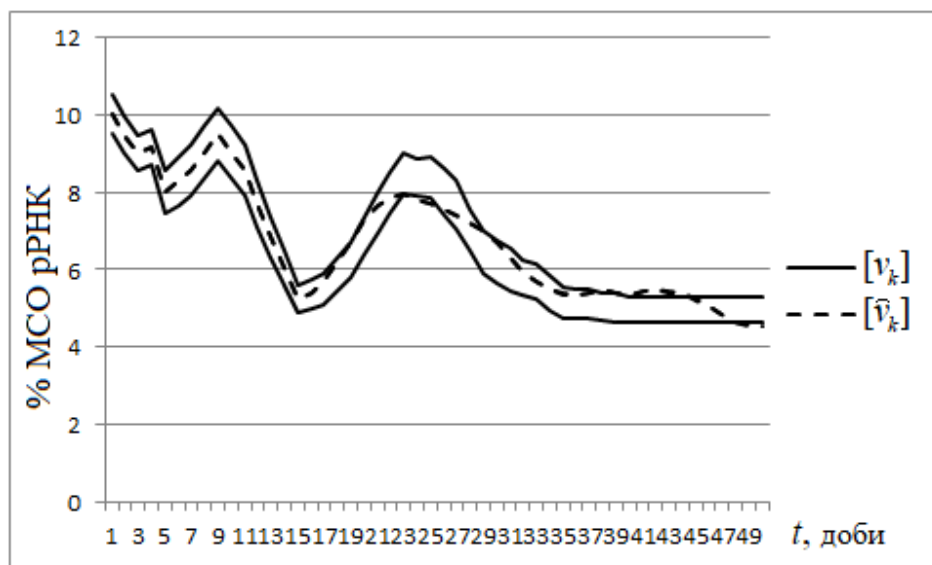


Рисунок 4.5 – Коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ

Як бачимо з рис. 4.5 коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ знаходиться в межах коридору експериментальних даних, що забезпечує адекватність математичної моделі.

Отримана модель дає можливість спрогнозувати коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ на стадії метаногенезу, яка містить такі фактори впливу як: температура середовища  $[T^-; T^+] = [35; 37]^\circ\text{C}$  і кислотність середовища  $pH = 7,2$  з відхиленням кислотності середовища на 1%.

Таким чином, користуючись моделлю, із зміною технологічних параметрів процесу можемо забезпечити на цій стадії оптимальний відсоток МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ, яка своєю чергою, визначить оптимальний розвиток популяції мікроорганізмів у процесі анаеробного мікробіологічного бродіння.

Важливим завданням при моделюванні розглянутих процесів на основі побудованих ІДДМ є вибір початкових умов. Варто зазначити, якщо в процесі ідентифікації початкові умови було сформовано в інтервальному вигляді, то вибір початкових умов в межах цих інтервалів завжди гарантує прогнозування характеристик в межах заданої точності. Водночас, зважаючи на вище викладене, для ідентифікації отриманих ІДДМ процесів усіх трьох стадій обиралися початкові умови на інтервалах з 1% відносною похибкою від середнього значення на інтервалі вимірювань, ширина якого задана 5% похибкою. Тому в дисертаційній роботі проведено дослідження впливу вибору початкових умов на зміну характеру модельованих процесів на стадії метагенезу. При цьому у кожному дослідженні за початкові умови обрано значення, що знаходяться в інтервалі експериментальних даних. Унаслідок прогнозування відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій, що зображений на рис.4.5, за початкові умови обирали середнє значення інтервалу експериментальних даних з певним відхиленням від центру інтервалу.

На рис. 4.6 та 4.7 показано результати ряду обчислювальних експериментів на стадії метаногенезу процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, де за початкові умови взято різні дані (див. табл. 4.8), відмінні від початкових умов процесу, які використано для ідентифікації моделі і обрано для прогнозування процесу, характер якого графічно відображено на рис. 4.5.

Таблиця 4.8

Набір початкових даних для моделювання прогнозованої характеристики

Номер рисунок	Початкові умови
1	2
Рис. 4.6 а)	$[\hat{v}_0^-, \hat{v}_0^+] = [9,832;9,834]$ , $[\hat{v}_1^-, \hat{v}_1^+] = [9,316;9,318]$ , $[\hat{v}_2^-, \hat{v}_2^+] = [8,850;8,851]$ , $[\hat{v}_3^-, \hat{v}_3^+] = [8,999;9,001]$ , $[\hat{v}_4^-, \hat{v}_4^+] = [7,813;7,814]$ , $[\hat{v}_5^-, \hat{v}_5^+] = [8,083;8,084]$ , $[\hat{v}_6^-, \hat{v}_6^+] = [8,336;8,338]$ , $[\hat{v}_7^-, \hat{v}_7^+] = [8,813;8,814]$ , $[\hat{v}_8^-, \hat{v}_8^+] = [9,277;9,279]$ , $[\hat{v}_9^-, \hat{v}_9^+] = [8,813;8,814]$ , $[\hat{v}_{10}^-, \hat{v}_{10}^+] = [8,336;8,338]$ , $[\hat{v}_{11}^-, \hat{v}_{11}^+] = [7,503;7,504]$ , $[\hat{v}_{12}^-, \hat{v}_{12}^+] = [6,664;6,665]$ , $[\hat{v}_{13}^-, \hat{v}_{13}^+] = [5,906;5,907]$ , $[\hat{v}_{14}^-, \hat{v}_{14}^+] = [5,127;5,128]$ , $[\hat{v}_{15}^-, \hat{v}_{15}^+] = [5,249;5,251]$ ;
Рис. 4.6 б)	$[\hat{v}_0^-, \hat{v}_0^+] = [9,599;9,601]$ , $[\hat{v}_1^-, \hat{v}_1^+] = [9,699;9,701]$ , $[\hat{v}_2^-, \hat{v}_2^+] = [8,849;8,851]$ , $[\hat{v}_3^-, \hat{v}_3^+] = [8,799;8,801]$ , $[\hat{v}_4^-, \hat{v}_4^+] = [7,749;7,751]$ , $[\hat{v}_5^-, \hat{v}_5^+] = [8,799;8,801]$ , $[\hat{v}_6^-, \hat{v}_6^+] = [8,999;9,001]$ , $[\hat{v}_7^-, \hat{v}_7^+] = [9,199;9,201]$ , $[\hat{v}_8^-, \hat{v}_8^+] = [8,899;8,901]$ , $[\hat{v}_9^-, \hat{v}_9^+] = [8,599;8,601]$ , $[\hat{v}_{10}^-, \hat{v}_{10}^+] = [8,399;8,401]$ , $[\hat{v}_{11}^-, \hat{v}_{11}^+] = [7,499;7,501]$ , $[\hat{v}_{12}^-, \hat{v}_{12}^+] = [6,4994;6,501]$ , $[\hat{v}_{13}^-, \hat{v}_{13}^+] = [5,699;5,701]$ , $[\hat{v}_{14}^-, \hat{v}_{14}^+] = [5,399;5,401]$ , $[\hat{v}_{15}^-, \hat{v}_{15}^+] = [5,249;5,251]$ ;
Рис. 4.6 в)	$[\hat{v}_0^-, \hat{v}_0^+] = [9,784;9,883]$ , $[\hat{v}_1^-, \hat{v}_1^+] = [9,270;9,363]$ , $[\hat{v}_2^-, \hat{v}_2^+] = [8,806;8,894]$ , $[\hat{v}_3^-, \hat{v}_3^+] = [8,955;9,045]$ , $[\hat{v}_4^-, \hat{v}_4^+] = [7,774;7,852]$ , $[\hat{v}_5^-, \hat{v}_5^+] = [8,043;8,124]$ , $[\hat{v}_6^-, \hat{v}_6^+] = [8,295;8,378]$ , $[\hat{v}_7^-, \hat{v}_7^+] = [8,769;8,857]$ ,

1	2
	$[\widehat{v}_8^-, \widehat{v}_8^+] = [9,232;9,325], [\widehat{v}_9^-, \widehat{v}_9^+] = [8,769;8,857],$ $[\widehat{v}_{10}^-, \widehat{v}_{10}^+] = [8,295;8,378], [\widehat{v}_{11}^-, \widehat{v}_{11}^+] = [7,466;7,541],$ $[\widehat{v}_{12}^-, \widehat{v}_{12}^+] = [6,631;6,698], [\widehat{v}_{13}^-, \widehat{v}_{13}^+] = [5,877;5,936],$ $[\widehat{v}_{14}^-, \widehat{v}_{14}^+] = [5,102;5,153], [\widehat{v}_{15}^-, \widehat{v}_{15}^+] = [5,224;5,276];$
Рис. 4.6 г)	$[\widehat{v}_0^-, \widehat{v}_0^+] = [9,900;10,100], [\widehat{v}_1^-, \widehat{v}_1^+] = [9,224;9,410],$ $[\widehat{v}_2^-, \widehat{v}_2^+] = [8,762;8,939], [\widehat{v}_3^-, \widehat{v}_3^+] = [8,910;9,090],$ $[\widehat{v}_4^-, \widehat{v}_4^+] = [7,735;7,892], [\widehat{v}_5^-, \widehat{v}_5^+] = [8,003;8,164],$ $[\widehat{v}_6^-, \widehat{v}_6^+] = [8,253;8,420], [\widehat{v}_7^-, \widehat{v}_7^+] = [8,725;8,902],$ $[\widehat{v}_8^-, \widehat{v}_8^+] = [9,186;9,371], [\widehat{v}_9^-, \widehat{v}_9^+] = [8,725;8,9024],$ $[\widehat{v}_{10}^-, \widehat{v}_{10}^+] = [8,253;8,420], [\widehat{v}_{11}^-, \widehat{v}_{11}^+] = [7,428;7,578],$ $[\widehat{v}_{12}^-, \widehat{v}_{12}^+] = [6,598;6,731], [\widehat{v}_{13}^-, \widehat{v}_{13}^+] = [5,848;5,966],$ $[\widehat{v}_{14}^-, \widehat{v}_{14}^+] = [5,076;5,179], [\widehat{v}_{15}^-, \widehat{v}_{15}^+] = [5,198;5,303];$
Рис 4.7 а)	$[\widehat{v}_0^-, \widehat{v}_0^+] = [10,166;10,168], [\widehat{v}_1^-, \widehat{v}_1^+] = [9,632;9,634],$ $[\widehat{v}_2^-, \widehat{v}_2^+] = [9,149;9,151], [\widehat{v}_3^-, \widehat{v}_3^+] = [9,299;9,301],$ $[\widehat{v}_4^-, \widehat{v}_4^+] = [8,186;8,188], [\widehat{v}_5^-, \widehat{v}_5^+] = [8,496;8,498],$ $[\widehat{v}_6^-, \widehat{v}_6^+] = [8,783;8,784], [\widehat{v}_7^-, \widehat{v}_7^+] = [9,256;9,258],$ $[\widehat{v}_8^-, \widehat{v}_8^+] = [9,721;9,723], [\widehat{v}_9^-, \widehat{v}_9^+] = [9,256;9,258],$ $[\widehat{v}_{10}^-, \widehat{v}_{10}^+] = [8,783;8,784], [\widehat{v}_{11}^-, \widehat{v}_{11}^+] = [7,896;7,899],$ $[\widehat{v}_{12}^-, \widehat{v}_{12}^+] = [7,005;7,006], [\widehat{v}_{13}^-, \widehat{v}_{13}^+] = [6,193;6,194],$ $[\widehat{v}_{14}^-, \widehat{v}_{14}^+] = [5,372;5,373], [\widehat{v}_{15}^-, \widehat{v}_{15}^+] = [5,499;5,501];$
Рис. 4.7 б)	$[\widehat{v}_0^-, \widehat{v}_0^+] = [10,157;10,177], [\widehat{v}_1^-, \widehat{v}_1^+] = [9,624;9,643],$ $[\widehat{v}_2^-, \widehat{v}_2^+] = [9,141;9,159], [\widehat{v}_3^-, \widehat{v}_3^+] = [9,291;9,309],$ $[\widehat{v}_4^-, \widehat{v}_4^+] = [8,179;8,195], [\widehat{v}_5^-, \widehat{v}_5^+] = [8,488;8,505],$ $[\widehat{v}_6^-, \widehat{v}_6^+] = [8,775;792], [\widehat{v}_7^-, \widehat{v}_7^+] = [9,247;9,266],$ $[\widehat{v}_8^-, \widehat{v}_8^+] = [9,712;9,731], [\widehat{v}_9^-, \widehat{v}_9^+] = [9,247;9,66],$ $[\widehat{v}_{10}^-, \widehat{v}_{10}^+] = [8,775;8,792], [\widehat{v}_{11}^-, \widehat{v}_{11}^+] = [7,889;7,905],$ $[\widehat{v}_{12}^-, \widehat{v}_{12}^+] = [6,998;7,012], [\widehat{v}_{13}^-, \widehat{v}_{13}^+] = [6,187;6,199],$ $[\widehat{v}_{14}^-, \widehat{v}_{14}^+] = [5,367;5,378], [\widehat{v}_{15}^-, \widehat{v}_{15}^+] = [5,495;5,506].$



що зображено на рис. 4.5. При розширенні інтервалу заданих початкових даних, збільшується і ширина прогнозованого коридору.

Водночас на рис. 4.7 видно, що при заданні початкових умов в межах вимірних інтервалів, але у верхній частині цих інтервалів, тобто при значному відхиленні від центру, характер процесу якісно змінюється у порівнянні з коридором експериментальних даних відсотка МСО рРНК метаноутворюючих бактерій у БГУ. Це означає, що отримана ІДДМ динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій втрачає стійкість при не правильному виборі початкових умов.

Унаслідок проведених досліджень встановлено, що розширення інтервалів для вибору початкових умов збільшує часову складність реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації. Крім того, при достатньо широких інтервалах для початкових умов втрачається стійкість поточної структури моделі, а бо її взагалі не можливо встановити.

#### **4.4. Порівняльний аналіз ефективності методів структурної ідентифікації з модифікованими операторами**

Важливим питанням є верифікація проведеного удосконалення алгоритму структурної ідентифікації. У третьому розділі наведено таблицю, яка показує ефективність запропонованих удосконалень з точки зору зниження часової складності реалізації методу структурної ідентифікації.

У цьому підрозділі наведено конкретний приклад структурної ідентифікації математичної моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, для якого використано різні способи задання нелінійності оператора для визначення кількості «структур-нащадків», які згенеровано навколо поточної «структури- предка», яку характеризує значення функції мети.

Дослідження ефективності застосування запропонованих виразів (3.12), (3.13) та відомого (3.14) для цього оператора, проводилися на прикладі

побудови моделі концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння за умов, які наведено вище для побудови цієї моделі.

Результати вимірювань концентрації ацетату для заданих технологічних чинників взято з таблиці 4.1 [18].

Для синтезу структури ІДДМ за допомогою методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії було згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=9$ . Унаслідок отримано табл. 4.3 – упорядковану множину структурних елементів.

Вхідні параметри обчислювальної схеми методу задаємо наступним чином:  $MCN=100$ ,  $Limit=3$ ,  $S=15$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}] = [3; 7]$ .

У процесі досліджень було проведено 5 обчислювальних експериментів із однаковими заданими початковими умовами. Зауважимо, що у кожному з них дослідження проводилися паралельно із застосуванням формул (3.12), (3.13) та (3.14).

Зауважимо, що найскладнішою процедурою в методі структурної ідентифікації є процедура обчислення значення функції мети –  $\delta(\lambda_s)$ . Саме тому ефективність використання виразів (3.12), (3.13) та (3.14) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІДДМ оцінюватимемо на основі необхідної кількості обчислень значень показника  $\delta(\lambda_s)$  для знаходження адекватної структури ІДДМ.

Порівняння обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації, який побудовано на поведінкових моделях бджолоїної колонії із застосуванням виразів (3.12), (3.13) та (3.14) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації моделі динаміки концентрації ацетату на стадії ацидогенезу анаеробного мікробіологічного бродіння подано у табл. 4.9.



Таблиця 4.9

Порівняння ефективності застосування лінійного, квадратичного та кубічного операторів для обчислення показника  $R_s$

Номер обчислювального експерименту	Кількість обчислень значень функції мети, при реалізації відомого методу (із використанням лінійної залежності )	Кількість обчислень значень функції мети, при реалізації відомого методу (із використанням квадратичної залежності )	Кількість обчислень значень функції мети, при реалізації відомого методу (із використанням кубічної залежності)
1	4 564 016	4 251 322	5 741 124
2	3 897 144	3 703 571	4 008 522
3	4 700 102	4 398 780	4 561 098
4	5 204 320	4 823 119	5 321 632
5	4 112 864	3 826 193	4 678 561

Як видно із табл. 4.9, найефективніше виявлення ділянок простору розв'язків задачі структурної ідентифікації ІДДМ з глобальними мінімумами відбувається при реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, із використанням квадратичної залежності (3.13) – кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ «структур-нащадків» від значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Зокрема зниження обчислювальної складності, в залежності від проведених експериментів коливається від 5% до 8%.

Також, як показано в третьому розділі на тестових прикладах, зниження обчислювальної складності завдяки використанню квадратичної залежності досягається мінімум на 5% для простих моделей та до 50% - для більш складних.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Уперше отримано комплекс адекватних математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Отримані ДДМ ураховують розкид технологічних параметрів, кислотності середовища та температури, а також похибки в результатах спостережень, що забезпечує можливість коригування протікання процесу після кожної стадії процесу в біогазових установках. Зазначені ІДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння забезпечують гарантовані прогностичні властивості для різних умов анаеробного мікробіологічного бродіння та якісно адекватно описують динаміку відповідних процесів навіть у випадку незначної зміни початкових умов за межами інтервалів, які використано як початкові умови для ідентифікації цих моделей .

2. Важливим завданням при моделюванні розглянутих процесів на основі побудованих ІДДМ є вибір початкових умов. У дисертаційній роботі проведено дослідження впливу вибору початкових умов на зміну характеру модельованих процесів на стадії метагенезу. Унаслідок проведених досліджень встановлено, що розширення інтервалів для вибору початкових умов збільшує часову складність реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації. Крім того, при достатньо широких інтервалах для початкових умов втрачається стійкість поточної структури моделі, а бо її взагалі не можливо встановити. Заразом суттєве звуження інтервалів для початкових умов не дасть можливості при використанні моделі урахувати реальні можливі розкиди технологічних параметрів процесу, а при відхиленні від цих інтервалів суттєвим чином змінюється характер прогнозованого процесу.

3. Унаслідок експериментальних досліджень підтверджено вибір квадратичної залежності між значенням функції мети в задачі структурної ідентифікації, обчисленого для «структури-предка» та кількістю «структур-

нащадків», які згенеровано з цієї «структури-предка». Застосування цієї залежності в методі структурної ідентифікації ІДДМ дозволяє знизити обчислювальну складність методу не менш, ніж на 5%. Варто зазначити, що ефективність застосування такого підходу буде збільшуватися пропорційно розмірності задачі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розробки комплексу ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях шляхом розробки та застосування методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолоїної колонії.

При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. За результатами аналізу існуючих моделей процесів у біогазових установках встановлено їх два класи: перші ґрунтуються на біохімічних перетвореннях та є детермінованими; другі є математичними моделями у вигляді ДДМ, які побудовано на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів і ураховують їх стохастичність. Показано, що обидва класи моделей не враховують можливі зміни протікання процесу бродіння на будь-якій стадії та технологічні відхилення його змінних. Запропоновано враховувати розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень із застосуванням методів аналізу інтервальних даних.

2. Проаналізовано методи структурної та параметричної ідентифікації ДДМ. Установлено, що більшість із них не придатна для використання у випадку інтервального представлення результатів експерименту. Обґрунтовано використання поведінкових моделей бджолоїної колонії для структурної ідентифікації ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння. Показано, що існуючі методи мають високу обчислювальну складність і зорієнтовані на знаходження однієї моделі без урахування множинності оцінок параметрів завдяки невизначеності. Для урахування невизначеності запропоновано та обґрунтовано побудову інтервальних оцінок параметрів ДДМ.

3. Уперше запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів. Метод забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

4. Уперше отримано комплекс адекватних математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Отримані ДДМ ураховують розкид технологічних параметрів, кислотності середовища та температури, а також похибки в результатах спостережень, що забезпечує можливість коригування протікання процесу після кожної стадії процесу в біогазових установках.

5. Удосконалено метод структурної ідентифікації ДДМ на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолиної колонії. У запропонованому методі використано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і таким чином знизити обчислювальну складність його реалізації. На тестових прикладах показано зниження обчислювальної складності мінімум на 5% для простих моделей та до 50% для більш складних.

6. Створено програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями внаслідок уведення в існуючий комплекс програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у програмному модулі структурної ідентифікації.

7. Із застосуванням зазначеного програмного комплексу підтверджено достовірність отриманих наукових результатів на тестових прикладах та при побудові комплексу математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та

метаногенезу. Розроблений програмний комплекс упроваджено в навчальний процес, а побудовані математичні моделі – безпосередньо на біогазовій установці на базі лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту та на базі комунального підприємства «Тернопільміськтеплокомуненерго» в м. Тернополі.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Aiba S. Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation / S. Aiba, M. Shoda, M. Nagatani // *Biotechnology and Bioengineering*. – 1968. – Vol. 10, No. 6. – P. 845 – 864.
2. Akaike H. A new look at the statistical model identification / *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1974. – Vol. 19, no. 6. – P. 716-723.
3. Alefeld G. Interval analysis: theory and applications / G. Alefeld, G. Mayer // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2000. – № 121. – P. 421-464.
4. Beba A. Mathematical models for methane production in batch fermenters/ A. Beba, F. S. Atalay // *Biomass*. – 1986 – Vol. 11. – P. 173 – 184.
5. Biswas J. Kinetic studies of biogas generation using municipal waste as feed stock / J. Biswas, R. Chowdhury, P. Bhattacharya // *Enzyme and Microbial Technology*. – 2006 – Vol. 38. – P. 493 – 503.
6. Blum Ch. Hybrid metaheuristics. An emerging approach to optimization / Ch. Blum, M. J. B. Aguilera, A. Roli. – Berlin: Springer-Verlag. – 2008. – 289 p.
7. Camazine S. A model of collective nectar source by honey bees: selforganization through simple rules / S. Camazine, J. Sneyd // *Journal of Theoretical Biology*. – 1991. – № 149. – P. 547–571.
8. Chen Y. R. Kinetics of methane fermentation / Y. R. Chen, A. G. Hashimoto // *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. – 1978. – No. 8. – P. 269 – 282.
9. Contois D.E. Kinetics of bacterial growth: relationship between Population density and specific growth rate of continuous cultures / D. E. Contois // *Journal of General Microbiology*. – 1959. – Vol. 21. – P.40 – 50.
10. Dekhtiar I. Features of biogas production process and methods of its modeling / I. Dekhtiar, T. Dyvak, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in

Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 19-23 February 2013. – P.66-68.

11. Dyvak M. Features of identification of interval differential operator [Electronic resource] / M. Dyvak, I. Voytyuk, I. Spivak // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science: Proc. of the Xth Intern. Conf. TCSET’2010. – Lviv, 2010. – Section 6, 2.

12. Fujimoto Y. Kinetics of microbial growth and substrate consumption / Y. Fujimoto // Journal of Theoretical Biology. – 1963. – Vol. 5. – P. 171 – 191.

13. Grady C. P. Effects of the growth rate and influent substrate concentration on effluent quality from chemostats containing bacteria in pure and mixed culture / C. P. Grady, L. J. Harlow, R. R. Riesing // Biotechnology and Bioengineering. – 1972. – Vol. 14. – P. 391 – 410.

14. Hadjihassan S. Quality improvement via optimization of tolerance intervals during the design stage / S. Hadjihassan, E. Walter, L. Pronzato // Applications of Interval Computatons. – Dordrecht: Kluwer. – 1996. – P.91–131.

15. Han K. Extended Monod kinetics for substrate, product, and cell inhibition / K. Han, O. Levenspiel // Biotechnology and Bioengineering. – 1988. – Vol. 32, No. 4. – P. 430–437.

16. Hill D. T. A dynamic model for simulation of animal waste digestion / D. T. Hill, C. L. Barth // Journal of Water Pollution Control Federation. – 1977. – Vol. 10. – P. 2129–2143.

17. Hill D. T. Simplified monod kinetics of methane fermentation of animal wastes, agricultural wastes. – 1983. – Vol. 5. – P. 1 – 16.

18. Hural I. Analysis of biochemical processes as a basis for building macro models of dynamic processes at biogas plants / I. Hural, I. Voytyuk, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science” Lviv-Slavske, UKRAINE February 25 – March 1, 2014. – P. 750–751.

19. Hural I. Autonomous systems modification of mono`s differential equations to non-autonomous systems in the tasks of modeling processes problems



at biogas plants / I. Hural, M. Dyvak, Yu. Pigovsky, V. Spilchuk // 13-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 24-27 February 2015. – P. 93-96.

20. Hural I. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage/ I. Hural, M. Dyvak, P. Stakhiv // Journal of Applied Computer Science. – 2016. – P.17–36.

21. Hural I. Modeling the processes of dynamics at biogas plants on the acetogenesis stage / I. Hural, M. Dyvak, P. Lipinski // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Conference (CPEE' 2016). – Sandomierz, Poland. – 2016. – P.101–104.

22. Gerber M. An analysis of available mathematical model for anaerobic digestion of organic substances for production of biogas / M. Gerber, R. Span // International Gas Union Research conference, Paris. – 2008. – P. 5–7.

23. Griffin M. E. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids / M. E. Griffin, K. D. McMahon, R. I. Mackie, L. Raskin // Biotechnology and Bioengineering. – 1998 – Vol. 57, no. 3. – P. 342–355.

24. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: Techn. rep. – TR06. –Erciyes: Erciyes Univ. Press, 2005. – 10 p.

25. Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39. – P. 459–471.

26. Kinghtes C. D. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for Monod biodegradation kinetics using bivariate data / C. D. Kinghtes, C. A. Peters // Biotechnology and Bioengineering. – 2000. – Vol. 69, № 2. – P. 160–170.

27. Ljung L. Theory and practice of recursive identification // L. Ljung, T. Soderstrom / Theory – Cambr., Mass: MIT Press, 1983.–529 p.

28. Mitsdörffer R. Charakteristika der zweistufigen thermophilen mesophilen schlammfäulung unter berücksichtigung kinetischer ansätze / R. Mitsdörffer // Berichte aus wassergüte und abfallwirtschaft. – Technische Universität München, 1991. – No. 109. – 410p.
29. Monod J. The Growth of Bacterial Cultures / J. Monod // Annual Reviews of Microbiology. – 1949. –Vol. 3. – P. 371-394
30. Monod J. The technique of continuous culture theory and applications. – Ann. Inst. Pasteur, 1950. – Vol. 79. – P. 390-410.
31. Moore R. E. Interval analysis. – Englewood Cliffs: Prentice Hall. – 1966. – 145 p.
32. Moore R. E. Interval methods for nonlinear systems / R. E. Moore // Fundamentals of numerical computation (computer-oriented numerical analysis). Computing Supplement. – Wienn: Spring Verlag, 1980. – P. 113–120.
33. Moore R. E. Methods and Applications of Interval Analysis / R. E. Moore. – Philadelphia: SIAM, 1979. – 190 p.
34. Moser H. The dynamics of bacterial populations maintained in the chemostat. Carnegie Institution of Washington Publication. – 1958. – 614 p.
35. Ocheretnyuk N. Structure identification of interval difference operator for control the production process of drywall / N. Ocheretnyuk, M. Dyvak, T. Dyvak, I. Voytyuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. – Lviv, 2013. – P. 262-264.
36. Pfeffer J. T. Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse / J. T. Pfeffer // Biotechnology and Bioengineering. – 1974. – Vol. 16. – P. 771 – 787.
37. Porplytsya N. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve / N. Porplytsya, M. Dyvak // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 16th International Conference (CPEE' 2015). – Lviv, 2015. – P. 156-158.

38. Porplytsya N. Features of structure identification of models of distributed parameters objects based on the artificial bee colony algorithm / N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak, T. Dyvak // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 419-420.
39. Porplytsya N. Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning / N. Porplytsya, M. Dyvak, T. Dyvak // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 4, №2. – P. 57-68.
40. Powell E. O. The growth rate of microorganisms as a function of substrate concentration / E. O. Powell // Microbial Physiology and Continuous Culture. 3rd International Symposium, Salisbury. – Edited by: Powell E.O.; Evans C. G. T.; Strange R. E.; Tempest D. W. – London, 1967. – P. 34 – 56.
41. Riley J. R. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance / J. R. Riley, U. Greggers, A. D. Smith, D. R. Reynolds, R. Menzel // NATURE: International weekly journal of science – 2005.–Vol. 435. – P. 205-207.
42. Rohn J. Input-output model with interval data / J. Rohn // Econometrica. – 1980. – Vol. 48. – P. 767–769.
43. Shary S. P. Solving the linear interval tolerance problem / S. P. Shary // Mathematics and Computer in Simulation. – 1995. – V. 39. – P. 53–85.
44. Voytyuk I. Identification the interval difference operators based on artificial bee colony algorithm in task of modeling the air pollution from vehicular traffic / I. Voytyuk, N. Porplytsya, A. Pukas, T. Dyvak // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017) : Proc. of the XIVth Intern. Conf. – Lviv, 2017. – P. 58-62.
45. Wolf K.-H. Kinetik in der bioverfahrenstechnik. – Behr, Hamburg. – 1991. ISBN 3925673-90-3

46. Wu B. Three-dimensional numerical simulation model of biogas production for anaerobic digesters / B.Wu, E. L.Bibeau, K. G. Gebremedhin // Canadian biosystems engineering. – 2009. –Vol. 51. – P. 81-87.
47. Zaino N. Kinetics of Biogas Production from Banana Stem Waste, Biogas, Dr. Sunil Kumar (Ed.). – 2012 – P. 395-408. – ISBN: 978-953-51-0204-5, InTech.
48. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер – М.: – Мир, 1987. – 360 с.
49. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика. / Б. Баадер, М. Доне Брендерфер; Пер. с нем. М. И. Серебрянного – М. : Колос, 1982. – 148 с.
50. Бакан Г. М. Аналитический синтез алгоритмов гарантированного оценивания состояний динамических процессов / Г. М. Бакан // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 3. – С. 38–55.
51. Бакан Г. М. Размытые эллипсоидальные множества в задачах нестохастического оценивания / Г. М. Бакан, Н. Н. КуССуль // Автоматика. – 1989. – №5. – С. 11–17.
52. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман – М.: Издво иностр. лит., 1960. – 400 с.
53. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы / Дж. Д. Биркгоф – 2002. – 406 с.
54. Боглаєнко Д. В. Біомаса як альтернативне джерело енергії / Д. В. Боглаєнко, Б. І. Адамчук, В. П. Шапорев // І-й Всеукраїнський з'їзд екологів: міжнар. наук.-техн. конф., 4–7 жовтня 2006 р.: тези допов. – Вінниця, 2006. – С. 215.
55. Боднар А. М. Перший крок до екологічного майбутнього – сортування сміття. – Тернопіль, 2013. – 12 с.
56. Боровська Т. М. Моделювання і оптимізація систем виробництва біогазу / Т. М. Боровська, П. В. Северілов //Наукові праці ВНТУ. – 2009. – Вип 2. – С.1–9.

57. Бойлс Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки. / Д. Бойлс; Пер. з англ. – М.: Агропромиздат, 1987. – 152 с.
58. Бочков А. Ф. Интервальные модели в задачах идентификации статистических объектов с неопределенностью / А. Ф. Бочков, М. В. Милевский. – Красноярск, 1990 (Препринт // ВЦ СО АН СССР, №17). – С. 7–10.
59. Бочков А. Ф. Интервальный анализ как альтернатива регрессионному анализу / А. Ф. Бочков, А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров // Заводская лаборатория. – 1990. – №7. – С. 76–81.
60. Бочков А. Ф. Оценивание параметров модели для объектов с интервальной неопределенностью в выходных параметрах / А. Ф. Бочков, М. В. Милевский. – Москва, 1988. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ, № 926 – В88.
61. Волосов В. В. Исследование одного вида нестохастических алгоритмов идентификации с помощью прямого метода Ляпунова / В. В. Волосов, А. С. Калита, Е. А. Нижниченко // Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 34–42.
62. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 111 с.
63. Вошинин А. П. Решение задач оптимизации по интервальным оценкам критерия / А. П. Вошинин // Заводская лаборатория. – 1987. – №7. – С. 68–71.
64. Вошинин А. П. Интервальный анализ: развитие и перспективы / А. П. Вошинин // Заводская лаборатория. – 2002. – №1. – С. 118–126.
65. Вошинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности. / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров – М.: МЭИ – София: Техника, 1989. – 224 с.
66. Вошинин А. П. Планирование оптимального насыщенного эксперимента в задачах построения интервальных моделей / А. П. Вошинин, Н. П. Дывак // Заводская лаборатория. – 1993. – №1. – С. 56–59.

67. Гелетуха Г. Г. Біогаз зі звалищ. Перспективи використання в Україні/ Г. Г. Гелетуха, К. О. Копейкін // Зелена енергетика. – 2002. – №1. – С. 13–16. – ISSN 1684-2294.

68. Глонь О. В. Моделювання систем керування в умовах невизначеностей / О. В. Глонь, В. М. Дубовой – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 169 с.

69. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 302 с.

70. Гураль І. В. Аналіз інтервальних даних в задачі оцінювання щодобового виходу метану під час анаеробного мікробіологічного бродіння // IV Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2014): матеріали. – Тернопіль, 2014.-С.16-18.

71. Гураль І. В. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромоделювання процесів виробництва біогазу / І. В. Гураль, М. П. Дивак // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2014 – С.152-158.

72. Гураль І. В. Модель неавтономної системи виробництва біогазу та метод її ідентифікації / Гураль І. В., Дивак М. П., Піговський Ю. Р. // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С.129–136.

73. Гураль І. В. Макромоделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових відходів на стадіях ацидогенезу та метаногенезу / І. В. Гураль, М. П. Дивак, Н. П. Порплиця // Індуктивне моделювання складних систем. – 2017. – Вип. 9. – С. 50-68.

74. Гураль І. В. Макромоделювання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових

установках // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці і технологіях» – 2016. –С.23-30.

75. Гураль І. В. Моделювання динаміки процесів у біогазових установках на стадії метаногенезу // VI Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2016): матеріали. - Тернопіль, 2016.-С.35-36.

76. Гураль І. В. Неавтономна модель динаміки об'єму залишкової маси бананових відходів та ідентифікація її параметрів / Гураль І. В., Піговський Ю. Р. // V Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2015): матеріали. - Тернопіль, 2015.-С.16-18.

77. Гураль І. В. Програмний комплекс для моделювання процесів бродіння в біогазових установках / І. В. Гураль, Н. П. Порплиця // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2016. – С.152-158.

78. Дехтяр І. В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках // III Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2013): матеріали. – Тернопіль, 2013. – С.21–22.

79. Дивак М. П. Багатокритеріальний підхід структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем / М. П. Дивак, В. І. Манжула // Міжнародний науково-технічний журнал “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”. – 2005. – №2. – С. 37 – 44.

80. Дивак М. П. Використання насиченого експерименту для оцінювання параметрів інтервальної моделі при аналізі інтервальних даних / М. П. Дивак // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 1999. – №2(5). – С. 33–36.

81. Дивак М. П. Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів / М. П. Дивак // Комп'ютинг. – 2002. – Т. 1. – №1. – С.108 – 114.

82. Дивак М. П. Дослідження цільової функції в задачах параметричної ідентифікації інтервального різницевого оператора із заданою точністю/ М. П. Дивак, Т. М. Дивак, П. Г. Стахів // Міжнародний науковий журнал "Комп'ютинг". – 2011. – Том 10. – Вип. 2. – С. 162-171р.

83. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними / М. П. Дивак – Тернопіль – Економічна думка, 2011.- 216 с.

84. Дивак М. П. Ідентифікація моделей об'єктів в умовах інтервальної невизначеності на основі методів аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, П. Г. Стахів // Пр. міжн. конф. з управління "АВТОМАТИКА – 2000", Львів 11–15 вересня 2000: В 7–ми томах. – Львів: Держ. НДІ інформ. інфраструкт., 2000.–Т. 2. – С. 90–97.

85. Дивак М. П. Ідентифікація дискретних динамічних моделей процесів з інтервальною невизначеністю у біогазових установках переробки органічного сміття / М. П. Дивак, Є. О. Марценюк, Ю. Р. Піговський, Т. М. Дивак // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2010. Вип 11 (164). – С.181–188.

86. Дивак М. П. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках [Електронний ресурс] / М. П. Дивак, І. В. Гураль // Індуктивне моделювання складних систем. – 2014. – Вип. 6. – С. 55-68.

87. Дивак М. П. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак, І. Ф. Войтюк // Відбір і обробка інформації: міжвід. зб. наук. пр. – Вип. 34 (110). – 2011. – С. 86–94.



88. Дивак М. П. Критерії оптимальності структури інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк І. Ф. // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: Матер. проблем.-наук. міжгалуз. конф. SPIC–2009, 19–22 травня 2009 р. – Бучач, 2009. – Т. 1., № 5. – С. 220–224.

89. Дивак М. П. Критерії структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк І. Ф. // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління: Матер. міжнар. проблем. - наук. міжгалуз. конф. (ПНМК–2010), 1–4 червня 2010 р. – Бучач, 2010. – Т. 1., № 6. – С. 280–283.

90. Дивак М. П. Обчислювальні аспекти методів локалізації розв'язків задач параметричного оцінювання в умовах обмежених похибок / М. П. Дивак // Відбір та обробка інформації. – 2002. – №16 (92) – С. 43–47.

91. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В. С. Степашко. – Київ : МННЦ ІТС, 2009. – Вип. 1. – 236 с. – С. 35–43.

92. Дивак М. П. Проблеми ідентифікації динамічних систем в умовах інтервальної невизначеності / М. П. Дивак, В. П. Кобернюк, Ю. П. Франко, І. Р. Пітух, В. П. Цимбалій // Вимірювання та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. праць.– 2001. – Вип. 8 – С. 307–310.

93. Дивак М. П. Структурна ідентифікація інтервальних різницевих операторів / М. П. Дивак, І. Ф. Войтюк, В. І. Манжула // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2010. – Т. 15, № 4. – С. 154–160.

94. Дивак М. П. Теоретичні засади побудови моделей "вхід–вихід" статичних систем методами аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак //

Дис. доктора технічних наук. – Тернопіль: Тернопільська академія народного господарства, 2003. – 304 с.

95. Дивак Т. М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння / Т. М. Дивак // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3. – С. 79-85.

96. Заде Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний / Л. Заде, Ч. Дезоер. – М.: Наука, 1970.

97. Захаров А. В. Синтез систем управления при интервальной неопределённости параметров их математических моделей / А. В. Захаров, Ю. И. Шокин // Докл. АН СССР. – 1988, № 2. – С. 292–295.

98. Ивахненко А. Г. Численное исследование помехоустойчивости многокритериальной селекции моделей / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко // Автоматика. – 1982. – № 4. – С. 26-36.

99. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко // – Київ: Наукова думка, 1981. – 296 с.

100. Ивахненко А. Г. Объективный выбор оптимальной кластеризации выборки данных при компенсации неробастных помех / А. Г. Ивахненко, С. А. Петухова, В. М. Юдин // Автоматика. – 1993. – №3. – С. 46-58.

101. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко // – К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.

102. Ивахненко А. Г. Регуляризация решающих функций в методе группового учета аргументов / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа // Автоматика. – 1970. – №2. – С. 19 – 23.

103. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А. Г. Ивахненко, Й. А. Мюллер – К.: Техника. – 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник. – 1984. – 223 с.

104. Калман Р. Идентификация систем с шумами / Р. Калман // Успехи матем. наук, 1985 – Вып. 4. – С. 27–41.

105. Калмыков С. А. Методы интервального анализа / С. А. Калмыков, Ю. И. Шокин, З. Х. Юлдашев – Новосибирск: Наука, 1986. – 222с.
106. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л. В. Канторович // Сибирский матем. Журнал. – 1962. – Т. 3, №5. – С. 701–709.
107. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446с.
108. Коддингтон Э. А. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений / Э. А. Коддингтон, Н. Левинсон// Пер. с англ., Изд. 2. – 2007. – 472 с.
109. Крищук В. М. Інтервальні методи оптимізації допусків / В. М. Грищук, Г. М. Шило, М. П. Гапоненко // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування: Теорія і практика. – 1999. – № 373. – С. 196-201.
110. Кунцевич В. М. Об оптимальном и адаптивном управлении динамическими объектами в условиях неопределенности / В. М. Кунцевич, М. М. Лычак // Автоматика и телемеханика. – 1979. – №1. – С. 79 – 88.
111. Кунцевич В. М. Решение одной оптимальной задачи управления в условиях неопределенности / В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 3. – С. 85–100.
112. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности (синтез адаптивных систем управления) / В. М. Кунцевич, М. М. Лычак // Автоматика.– 1987. – №5. – С. 16–26.
113. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы: Монография. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 242 с.
114. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А. Б. Куржанский – М.: Наука, 1977. – 392 с.

115. Лакеев А. В. О множестве решений линейного уравнения с интервально заданными оператором и правой частью / А. В. Лакеев, С. И. Носков // Сиб. математ. журнал. – 1994. – Т. 35 – №5. – С. 1074–1084.
116. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях / Лебедев А. Н. – М: Радио и связь, 1989. – 224с.
117. Лисенков А. Н. О методах идентификации и управления в условиях неопределенности / А. Н. Лисенков // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ – 92: Сб. тр. – Москва, 1992. – Т.1. – С. 92-96.
118. Лычак М. М. Идентификация и оценивание состояния объектов управления на основе множественного подхода / М. М. Лычак // Проблемы управления и информатики. – 1999. – №5. – С. 34–41.
119. Лычак М. М. Синтез дискретных адаптивных систем управления на основе теоретико-множественных моделей неопределенности / М. М. Лычак // Дис. докт. физ.-мат. наук.– Киев : Ин-т киб., 1995.
120. Лычак М. М. Решение задачи линейного программирования на основе множественного подхода / М. М. Лычак, В. Н. Шевченко, Н. П. Царук // Проблемы управления и информатики. – 2005. – №4. – С. 103–111.
121. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина // Л. Льюнг – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
122. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем / Л. Льюнг // Известия АН. Техническая кибернетика, №6. – М.: Наука, 1992. – С. 55–64.
123. Любін М. В. Аналіз, класифікація та використання простих біогазових установок / М. В. Любін, О. А. Токарчук, В. С. Любин, С. В. Смалківський // Збірник наукових праць. – Вінниця, 2011, №8.-С.69-77.
124. Марков С. М. Некоторые задачи интерполяции, идентификации и оценивания для интервальных данных / С. М. Марков // Межд. конф. по

интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ – 92: Сб. тр. – Москва, 1992.– Т.1.– С. 103.

125. Матвійчук Я. М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія і практика/ Я. М. Матвійчук. – Л.: Вид-во ЛНУ, 2000. – 214 с.

126. Мороз О. Г. Огляд гібридних структур МГУА-подібних нейронних мереж та генетичних алгоритмів / О. Г. Мороз, В. С. Степашко // Індуктивне модельовання складних систем. – 2015. – Вип.7. – С. 75-93.

127. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов – М.: Наука, 1971.– 207 с.

128. Опейда Й. Глосарій термінів з хімії / Й. Опейда, О. Швайка // Інститутт фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет – Донецьк: «Вебер», 2008. – 758 с.

129. Очеретнюк Н. П. Структурна ідентифікація інтервальної моделі процесу сушіння гіпсокартону / Н. П. Очеретнюк, М. П. Дивак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : Міжнар. наук.-техн. журнал. – 2013. – № 2. – С. 211-217.

130. Пляцук Л. Д. Альтернативні методи використання відходів тваринництва на прикладі підсобного господарства синівського аграрного ліцею / Л. Д. Пляцук, Р. А. Васькін, В. О. Соляник // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 4. – Частина 1. –С.147-150.

131. Порплиця Н. П. Ідентифікація інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії: дис. канд. техн. наук: 01.05.02 / Н. П. Порплиця – Т.,2016. – 159 с.

132. Порплиця Н. П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії / Н. П. Порплиця, І. В. Гураль, М. П. Дивак // Науковий вісник НЛТУ України, 2017, т. 27, № 1 – С.215-221.

133. Порплиця Н. П. Особливості програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі

алгоритму бджолоїної колонії // Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак/ Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2015) : Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2015. – С. 32-35.

134. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та "бджолоїного" алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 1. – С. 55–67.

135. Порплиця Н. П. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії / Н. П. Порплиця, М. П. Дивак // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 4(93). – С. 34-40.

136. Порплиця Н. П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолоїної колонії / Н. П. Порплиця, М. П. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. – 2013. – Вип. 5. – С. 256-269.

137. Растрингін Л. А. Адаптація складних систем / Л. А. Растрингін – Рига: Зинатне, 1981,- 359 с.

138. Сейдж А. Ідентифікація систем / А. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Наука, 1976. – 495с.

139. Сиволоб А. В. Генетика / А. В. Сиволоб, С. Р. Рушковський, С. С. Кир'яченко та ін. – К: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. – С. 56-60.

140. Степашко В. С. Гібридні алгоритми самоорганізації моделей для прогнозування складних процесів / В. С. Степашко, О. С. Булгакова, В. В. Зосімов // Індуктивне моделювання складних систем. – Вип. 2. – 2010. – С. 236- 246.

141. Степашко В. С. Элементы теории индуктивного моделирования. – Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.
142. Степашко В. С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов // В. С. Степашко, О. С. Булгакова / Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 5-17.
143. Степашко В. С. Комп'ютерний експеримент в індуктивному моделюванні / В. С. Степашко, С. М. Єфіменко, Є. А. Савченко– Київ: Наукова думка, 2014. – 222 с.
144. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин – М.: Наука, 1979. – 288 с.
145. Тихонов А. Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев // Уч. пособие – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1988. – 174 с.
146. Томашевський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашевський – К: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.
147. Фриш К. Из жизни пчёл / И. А. Халифман. (отв.ред.) — Москва: Мир, 1980. — 216 с.
148. Цой Ю. Р. Генетический алгоритм / Ю. Р. Цой, В. Г. Спицын // Представление знаний в информационных системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 146 с.
149. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин – М.: Наука, 1995. – 336 с.
150. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф. Л. Черноусько – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. – 320 с.
151. Шарая И. А. О максимальной внутренней оценке множеств решений интервальных линейных систем / И. А. Шарая // Вычислительные технологии. – 1998. – Т. 3 – № 2. – С. 55–66.

152. Шарый С. П. Алгебраический подход во "внешней задаче" для интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. – 1998. – Т. 3, №2. – С. 67–114.

153. Шарый С. П. Анализ чувствительности интервальных линейных статических систем / С. П. Шарый // Труды XI международной Байкальской школы-семинара "Методы оптимизации и их приложения", Иркутск, Байкал, 5-12 июля 1998 г., секция 4. – Иркутск ИСЭМ, 1998. – С. 187–190.

154. Шарый С. П. Внешнее оценивание обобщенных множеств решений интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. – 1999. – Т. 4, №4. – С. 82–110.

155. Шарый С. П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение / С. П. Шарый // Дис. доктора физ.-математ. наук. – Новосибирск: Ин-т вычисл. технологий СО РАН, 2000. – 322 с.

156. Шарый С. П. Интервальный анализ: прошлое, настоящее и будущее / С. П. Шарый // Наука в Сибири. – 1997. – №41 (2127). – С. 3-12

157. Шарый С. П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной определённой в данных / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. – 1997. – Т. 2. – №1. – С. 84-102.

158. Швед О. В. Екологічна біотехнологія / О. В. Швед, О. Б. Миколів, О. З. Комаровська-Порохнявець, В. П. Новіков: Навч. посіб. у 2 кн. — Львів: Львівська політехніка, 2010.

159. Шокин Ю. И. Интервальный анализ / Ю. И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 1981. – 116 с.

160. Яковлев А. Г. Интервальные вычисления – предмет исследований и полезный инструмент / А. Г. Яковлев // Интервальные вычисления. – 1991. – №1. – С. 10–26.



## Додаток А

Акти про використання результатів дисертаційного дослідження



УКРАЇНА

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ВІДОКРЕМЛЕНИЙ ПІДРОЗДІЛ НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
«БЕРЕЖАНСЬКИЙ АГРОТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

47501, Тернопільська обл., м. Бережани, вул. Академічна, 20, тел. (03548) 2-18-10, факс (03548) 2-11-59, E-mail: office@bati.ber.te.ua,  
Код ЄДРПОУ 34492201

04.06.2017 № 211

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Гураль Ірини Володимирівни**

«Інтервальне моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної та параметричної невизначеності»

Ми, Захарів Орест Ярославович та Хома Юлія Андріївна, склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Гураль Ірини Володимирівни, впроваджено на діючій біогазовій установці на базі лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту. Зокрема, під час оптимізації параметрів технологічного процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазовій установці було використано такі результати дисертаційного дослідження:

1. Інтервальні дискретні динамічні моделі, якими описані процеси анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу. Запропоновані математичні моделі враховують можливість управління процесом бродіння на усіх його стадіях, забезпечують гарантовані прогностичні властивості характеристик процесу і враховують технологічні відхилення керованих змінних процесу – температури та кислотності середовища.

2. Методи структурної та параметричної ідентифікації зазначених інтервальних дискретних динамічних моделей.

3. Програмний комплекс, який забезпечує процеси імітаційного моделювання з метою вибору оптимальних параметрів технологічного процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на усіх його стадіях.

На основі отриманих в дисертаційній роботі І. В. Гураль нових наукових і практичних результатів в подальшому передбачається створення інформаційної технології для адаптивного налаштування параметрів процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках для випадків зміни структури біосировини і впровадження цієї технології на діючій установці Бережанського агротехнічного інституту.

В. о. директора., професор

Завідувач науково-дослідного відділу  
д. с.-г. н., професорЗавідувач лабораторії  
«Технологія виробництва біогазу»

Р. М. Горбатюк

О. Я. Захарів

Ю. А. Хома

Виконавець: Русиняк М.О.  
Тел: (03548) 2-54-25  
Файл:

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор КП «Тернопільськтеплокомуненерго» \_\_\_\_\_

Чумак А.К.

\_\_\_\_\_ 2018 р.



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
**Гураль Ірини Володимирівни**  
**«Інтервальне моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах  
 структурної та параметричної невизначеності»**

Результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Гураль Ірини Володимирівни використано в КП «Тернопільськтеплокомуненерго» при розробці проекту модернізації централізованого теплопостачання в Україні «Техніко-економічне обґрунтування модернізації системи централізованого теплопостачання м. Тернопіль», який виконується згідно гранту з Фонду Східноєвропейського партнерства з енергоефективності та довкілля. Проектом передбачено розробку концепції створення та впровадження біогазової установки, яка функціонує на біосировині різної структури. Зокрема при розробці зазначеного проекту використано такі наукові результати дисертаційного дослідження:

- Інтервальні дискретні динамічні моделі, якими описані процеси анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу, а також методи їх структурної та параметричної ідентифікації. Запропоновані математичні моделі враховують можливість управління процесом бродіння на усіх його стадіях, прогнозують з гарантованою точністю характеристики процесів, а також враховують технологічні відхилення керованих змінних процесу.

В межах стратегічної довготермінової інвестиційної програми планується будівництво і впровадження біогазової установки, застосування за результатами дисертаційної роботи Гураль І. В. методів ідентифікації моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в складі інформаційної технології для адаптивного налаштування параметрів процесів, а також створення спільно з Тернопільським національним економічним університетом та іншими вищими навчальними закладами центру з підготовки фахівців-технологів для роботи на установках з виробництва біогазу.

Начальник відділу  
проекування



П.В. Святенький

Головний інженер



В.М. Грубенюк



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
економічного університету  
д.е.н., проф. Задорожний З.-М. В.

*[Signature]*  
травня 2018р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
**Гураль Ірини Володимирівни**  
«Інтервальне моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної та параметричної невизначеності»

Комісія у складі голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, керівника науково-дослідної роботи, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів – в.о. директора науково-дослідного інституту інноваційного розвитку та державотворення Письменного В.І. і начальника планово-фінансового відділу Кушніра О.Р., склали даний акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Гураль І.В. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій з безпосередньою участю автора, а саме:

- держбюджетної прикладної розробки на тему «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміну стану складних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0114U000569), у якій автором побудовано інтервальні дискретні динамічні моделі, якими описані процеси анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу. Запропоновані математичні моделі враховують можливість управління процесом анаеробного мікробіологічного бродіння на усіх його стадіях, забезпечують гарантовані прогностичні властивості характеристик процесу та враховують технологічні відхилення керованих змінних процесу;

- науково-дослідної роботи «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (державний реєстраційний номер 0111U010356), зокрема у розділі «Макромодельовання стаціонарних та нестаціонарних різницевих операторів в умовах структурної невизначеності» автором розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення процесів імітаційного моделювання з метою вибору оптимальних параметрів технологічного процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на усіх його стадіях;

- держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507), зокрема у розділі «Метод структурної ідентифікації динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту у вигляді інтервальних різницевих операторів» автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі алгоритму бджолоїної колонії.

**Голова комісії**

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
керівник НДР, д.т.н., проф.

М. П. Дивак

**Члени комісії**

В. о. директора НДІ ІРД

В. І. Письменний

Начальник ПФ відділу

О. Р. Кушнір



## Додаток Б

## Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Гураль І.В. Модель неавтономної системи виробництва біогазу та метод її ідентифікації / І.В. Гураль, М.П. Дивак, Ю.Р. Піговський // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С.129-136.
2. Порплиця Н.П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолиної колонії / Н.П. Порплиця, І.В. Гураль, М.П. Дивак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – т. 27, № 1 – С.215-221.
3. Гураль І.В. Макромоделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових відходів на стадіях ацидогенезу та метаногенезу / І.В. Гураль, М.П. Дивак, Н.П. Порплиця, // Індуктивне моделювання складних систем. – 2017. – Вип. 9. – С. 50-68.
4. Hural I. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage/ I. Hural, M. Dyvak, P. Stakhiv // Journal of Applied Computer Science. – 2016. – P. 17-36.
5. Гураль І.В. Макромоделювання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових установках // Вісник національного технічного університету «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці і технологіях» – 2016. – С.23-30.
6. Гураль І.В. Програмний комплекс для моделювання процесів бродіння в біогазових установках / І.В. Гураль, Н.П. Порплиця // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2016. – С.152-158.
7. Гураль І.В. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромоделювання процесів виробництва біогазу / І.В. Гураль, М.П. Дивак // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». –

Хмельницький, 2014 – С.152-158.

8. Дивак М.П. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках / М.П. Дивак, І.В. Гураль // Індуктивне моделювання складних систем. – 2014. – Вип. 6. – С. 55-68.

9. Dyvak M. Modeling the processes of dynamics at biogas plants on the acetogenesis stage / M. Dyvak, I. Hural, P. Lipinski // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Conference (CPEE' 2016). – Sandomierz, Poland, 2016. – P. 101-104.

10. Гураль І.В. Моделювання динаміки процесів у біогазових установках на стадії метаногенезу // VI Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2016): матеріали. - Тернопіль, 2016.-С.35-36.

11. Гураль І.В. Неавтономна модель динаміки об'єму залишкової маси бананових відходів та ідентифікація її параметрів / І.В. Гураль, Ю.Р. Піговський // V Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2015): матеріали. - Тернопіль, 2015.-С.16-18.

12. Hural I. Autonomous Systems Modification of Mono`s Differential Equations to Non-autonomous Systems in the Tasks of Modeling Processes Problems at Biogas Plants / I. Hural, M. Dyvak, Yu. Pigovsky, V. Spilchuk // 13-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 24-27 February 2015. – P. 93-96.

13. Гураль І.В. Аналіз інтервальних даних в задачі оцінювання щодобового виходу метану під час анаеробного мікробіологічного бродіння // IV Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2014): матеріали. - Тернопіль, 2014.-С.16-18.

14. Hural I. Analysis of biochemical processes as a basis for building macro models of dynamic processes at biogas plants / I. Hural, I. Voytyuk,

Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science” Lviv-Slavske, UKRAINE February 25 - March 1, 2014. – P. 750-751.

15. Dekhtiar I. Features of biogas production process and methods of its modeling / I. Dekhtiar, T. Dyvak, Ye. Martsenyuk // 12-th International Conference “The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattya) UKRAINE 19-23 February 2013. – P.66-68.

16. Дехтяр І.В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках // III Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2013): матеріали. - Тернопіль, 2013.-С.21-22.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах: XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці» CADSM (Львів – Поляна, 2013, 2015); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET (Львів – Славсько, 2014); 17-й Міжнародній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» СРЕЕ (Польща – Сандомеж, 2016); III, IV, V та VI Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» АСІТ (Тернопіль, 2013, 2014, 2015, 2016); Міжнародних школах-семінарах для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування» (с. Жукін Київської обл., 2014, 2016); наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2013-2018).