

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**НЕСТЕРУК АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 004.94:661.152.012(043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ  
МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ**

126 – інформаційні системи і технології  
12 – інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ А.О. Нестерук

Науковий керівник – Корнієнко Богдан Ярославович, доктор технічних наук,  
професор

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

Нестерук А.О. Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи і технології» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена створенню теоретичних та прикладних результатів з розробки інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив з урахуванням вимог зменшення енерговитрат та забезпечення заданої якості готового продукту.

Пріоритетом інформаційної технології є забезпечення зменшення енерговитрат для досягнення заданої якості кінцевого продукту. Значна увага приділяється системі управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі, дослідженню створення та управління хаосу для підвищення інтенсивності тепло- та масообміну.

Аналіз результатів існуючих досліджень в галузі управління виробництвом мінеральних добрив свідчить про відсутність на даний час комплексного підходу, який враховував би специфіку управління технологічними процесами виробництва мінеральних добрив.

Тому існує нагальна потреба в подальшому дослідженні математичних моделей та систем управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з метою їх удосконалення. А розробка інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив є надзвичайно актуальною на сьогоднішній день. Таким чином, усе це і зумовило необхідність вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності виробництва мінеральних добрив, шляхом побудови математичних моделей та систем управління виробництвом мінеральних добрив з урахуванням вимог зменшення енерговитрат та забезпечення заданої якості готового продукту.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та основні завдання дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з наукою темою. Подано анотацію отриманих в дисертації результатів, висвітлено їх наукову новизну і практичну значимість, відзначено особистий внесок здобувача у спільних публікаціях, наведено кількісні показники стосовно опублікованих наукових праць, структури та обсягу дисертації.

У першому розділі проведено дослідження розвитку математичних моделей та систем управління процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, що показує відсутність розгляду ряду особливостей процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі в комплексі.

Проведено аналіз підходів до математичного моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Визначено параметри, що мають найбільший вплив на поведінку технологічного процесу. Існуючі математичні моделі не враховують розсіювання енергії при зіткненні та передачу кінетичної енергії від твердої фази до рідкої. Також в даних моделях недостатньо врахована хаотичність процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Основним інструментом для підвищення ефективності процесу виробництва мінеральних добрив є вибір системи управління. Узагальнено основні існуючі підходи до побудови системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Розглянуті основні методи забезпечення функціональної безпеки на хімічних підприємствах, що є важливою складовою інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

Результатом огляду результатів досліджень та літературних джерел стали сформульовані задачі, які необхідно виконати для створення ефективної інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

Другий розділ присвячений створенню трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та математичної моделі гранулометричного складу.

Розроблено трьохфазну математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, яка враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок, розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої. Дана математична модель може використовуватися для розробки систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі. За допомогою реалізації створеної моделі в програмному пакеті MATLAB одержано перехідні характеристики температури процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Розроблено математичну модель гранулометричного складу для процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив, яка враховує, що умови для росту частинок виконуються лише в зоні холодного змочування під соплом, в зоні змочування температура підвищується від центру до боків, в ізотермічній зоні температура повітря рівномірна, в зоні теплообміну температура гарячого повітря різко падає, зростання частинок визначатиметься розміром змочувальної активної зони та швидкістю перенесення частинок до цієї частини псевдозрідженого шару, в зоні змочування відбувається агломерація. Дана математична модель дозволяє одержати розподіл гранул за розміром в двох реакторах, що дає змогу оцінити якість кінцевого продукту.

В *третьому розділі* виконано дослідження хаосу в процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та створена система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром, що дозволяє збільшити хаотичність процесу грануляції у псевдозрідженому шарі для підвищення інтенсивності тепло- та масообміну.

Реалізовані системи управління з MPC, PID, LQR та Fuzzy Logic-регуляторами на основі трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Також створена система управління з MPC-регулятором на основі математичної моделі гранулометричного складу, яка прискорює утворення гранул заданого розміру під час процесу гранулювання у псевдозрідженму шарі.

*Четвертий розділ* починається зі створення системи захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив з розділенням виробництва на зони, від відділеної зони з доступом через демілітаризовану зону до обмеженої зони для найкритичніших ресурсів. Система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив забезпечує контрольований доступ і мінімізує можливість загроз для критичних ресурсів.

Запропонована математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів, завдяки якій можна розрахувати імовірності знаходження в одному з шести станів: стан спокою; надійшла загроза 1, але не реалізована; надійшла загроза 2, але не реалізована; загроза 1 реалізована; загроза 2 реалізована; загроза відбита.

Розроблено інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив, основними компонентами якої є наступні технічні, програмні та організаційно-методичні засоби: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив та математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів. Використання інформаційної технології виробництва мінеральних добрив дозволило знизити енерговитрати на 7% за рахунок розробки системи управління хаосом, що збільшила інтенсивність тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі.

Розроблено методику використання інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

У *висновках* подані основні результати дисертаційного дослідження, що відображають результати виконання завдань, що поставлені для формування інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

#### *Наукова новизна отриманих результатів*

На підставі теоретичних і практичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі:

*вперше*

- розроблено трьохфазну математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок, розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої для перевірки наявності детермінованого хаосу;
- розроблено систему управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з визначенням часу прогнозування для забезпечення ефективного тепло- та масообміну;

*отримала подальший розвиток*

- математична модель гранулометричного складу, яка враховує умови для росту частинок, підвищення температури від центру до боків в зоні змочування, рівномірність температури теплоносія в ізотермічній зоні, різке падіння температура теплоносія у зоні теплообміну, агломерацію частинок;

*удосконалено*

- математичну модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів, яка враховує можливість надходження до системи двох загроз для налаштування системи захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив;
- інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив, основними компонентами якої є наступні засоби: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив, математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.

*Практичне значення отриманих результатів*

Розроблені в дисертаційній роботі математичні моделі та системи управління стали основою для створення інформаційної технології управління виробництвом

мінеральних добрив, що забезпечує зниження енерговитрат за рахунок розробки системи управління хаосом, що збільшила інтенсивність тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі.

Практично вагомими вважаються такі результати:

- трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром;
- інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив.

Результати дисертаційної роботи апробовано і використано у таких організаціях та установах:

- у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час викладання дисциплін «Програмування. Частина 2. Структура даних та алгоритми», «Алгоритми та математичні методи захисту інформації»;
- результати виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Інформаційна технологія захисту критичних ресурсів» (№ 0121U110809) у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час викладання дисциплін «Проектування інформаційних систем», «Управління проєктами»;
- у Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України для впровадження в інформаційно-аналітичну систему «АГРОТЕП».

Дані про впровадження підтверджено відповідними документами.

*Ключові слова:* інформаційна технологія, математична модель, моделювання, модель, система управління, оптимальне керування, система, керування, регулятори, маніпулятори, мультиплікація сили, багатокритеріальність, система захисту інформації, захист інформації, параметри.

## ANNOTATION

Nesteruk A.O. information technology for managing the production of mineral fertilizers. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Doctor of Philosophy on a specialty 126 "Information systems and technologies" – National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2025.

The dissertation is dedicated to developing theoretical and applied results for the creation of an information technology for managing the production of mineral fertilizers, considering the requirements for reducing energy consumption and ensuring the specified quality of the final product.

The priority of the information technology lies in reducing energy consumption while achieving the desired quality of the end product. Significant attention is given to the control system of the granulation process in a fluidized bed, as well as to the study of chaos creation and management to enhance the intensity of heat and mass transfer processes.

An analysis of existing research results on the state of critical resource protection in mineral fertilizer production indicates the current absence of a comprehensive approach that would take into account the specificities of managing technological processes in mineral fertilizer production.

Therefore, there is an urgent need for further research on mathematical models and control systems for mineral fertilizer production in a fluidized bed granulator to improve their efficiency. The development of information technology for managing mineral fertilizer production is particularly relevant today. Thus, all these factors have determined the necessity of addressing a pressing scientific and technical problem: enhancing the efficiency of mineral fertilizer production through the development of mathematical models, a control system, and the creation and implementation of new information technology.

*The introduction* substantiates the relevance of the dissertation, formulates the objectives and main tasks of the research, and provides information on the connection of the work with the scientific theme. It includes an annotation of the results obtained in the



dissertation, highlights their scientific novelty and practical significance, emphasizes the author's personal contribution to joint publications, and presents quantitative indicators regarding published scientific works, as well as the structure and volume of the dissertation.

*The first chapter* examines the development of mathematical models and control systems for the granulation process in a fluidized bed, revealing the absence of a comprehensive consideration of several specific features of the granulation process in a fluidized bed.

An analysis of approaches to the mathematical modeling of the granulation process in a fluidized bed is conducted. The parameters that have the greatest impact on the behavior of the technological process are identified. Existing mathematical models do not account for energy dissipation during collisions and the transfer of kinetic energy from the solid phase to the liquid phase. Additionally, these models insufficiently consider the chaotic nature of the granulation process in a fluidized bed.

The primary tool for improving the efficiency of the mineral fertilizer production process is the choice of a control system. The main existing approaches to designing a control system for the granulation process in a fluidized bed are summarized.

Key methods for ensuring functional safety at chemical enterprises, which are an important component of the information technology for managing mineral fertilizer production, are reviewed.

The result of the review of research findings and literary sources is the formulation of tasks necessary for creating an effective information technology for managing mineral fertilizer production.

*The second chapter* is devoted to the creation of a three-phase mathematical model of the granulation process in a fluidized bed and a mathematical model of granulometric composition.

A three-phase mathematical model of the granulation process in a fluidized bed has been developed, which takes into account the hydrodynamics of the fluidized bed, the transfer of kinetic energy, energy dissipation, compression of droplets with particles, their adhesion to the surface, the kinetics of solution drying on the surface of the particles,

energy dissipation during collisions, and the transfer of kinetic energy from the solid phase to the liquid phase. This mathematical model can be used to design control systems for the granulation process in a fluidized bed. By implementing the developed model in the MATLAB software package, transient characteristics of the temperature in the granulation process in a fluidized bed have been obtained.

A mathematical model of granulometric composition for the production process of granular mineral fertilizers has also been developed. This model accounts for the fact that particle growth conditions are met only in the cold wetting zone under the nozzle, where the temperature increases from the center to the sides. In the isothermal zone, the air temperature is uniform, while in the heat exchange zone, the temperature of the hot air drops sharply. Particle growth is determined by the size of the active wetting zone and the rate of particle transfer to this part of the fluidized bed, with agglomeration occurring in the wetting zone. This mathematical model allows the determination of the granule size distribution in two reactors, enabling the assessment of the final product quality.

*The third chapter* focuses on the study of chaos in the granulation process within a fluidized bed and the creation of a chaos control system for the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator. This system increases the chaotic behavior of the system to enhance the intensity of heat and mass transfer.

Control systems based on MPC, PID, LQR, and Fuzzy Logic regulators have been implemented using the three-phase mathematical model of the granulation process in a fluidized bed. Additionally, a control system with an MPC regulator has been developed based on the granulometric composition mathematical model. This system accelerates the formation of granules of the specified size during the granulation process in the fluidized bed.

*The fourth chapter* begins with the development of a protection system for critical resources in mineral fertilizer production, which divides the production process into zones: from a segregated zone with access through a demilitarized zone to a restricted zone for the most critical resources. The system ensures controlled access and minimizes potential threats to critical resources.

A mathematical model for countering threats within the critical resource protection system has been proposed. This model allows calculating the probabilities of the system being in one of six states: a state of calm; threat 1 received but not realized; threat 2 received but not realized; threat 1 realized; threat 2 realized; threat neutralized.

An information technology system for managing mineral fertilizer production has been developed. Its main components include the following technical, software, and organizational-methodological tools: mathematical models of the mineral fertilizer production process, production management systems, a protection system for critical resources, and a mathematical model for countering threats in the critical resource protection system. The application of this information technology in mineral fertilizer production has resulted in a 7% reduction in energy consumption due to the development of a chaos management system, which increased the intensity of heat and mass transfer in the fluidized bed.

A methodology for applying the information technology system to manage mineral fertilizer production has also been developed.

*The conclusions* summarize the main results of the dissertation research, reflecting the achievement of the tasks set for the creation of the information technology system for managing mineral fertilizer production.

*Scientific novelty of the obtained results*

Based on the theoretical and practical research conducted in the dissertation:  
*for the first time*

- a three-phase mathematical model of the granulation process in a fluidized bed was developed, taking into account the hydrodynamics of the fluidized bed, transfer of kinetic energy, energy dissipation, compression of droplets with particles, their adhesion to the surface, kinetics of drying of the solution on the surface of particles, dissipation of energy during collision and transfer of kinetic energy from the solid phase to liquid to check the presence of deterministic chaos;
  - a chaos control system for the granulation process in a fluidized bed with prediction time determination to ensure effective heat and mass exchange was developed;
- received further developed*

- the mathematical model of granulometric composition, which now accounts for the conditions for particle growth, temperature increase from the center to the edges in the wetting zone, uniformity of the heat carrier temperature in the isothermal zone, a sharp drop in heat carrier temperature in the heat exchange zone, and particle agglomeration;

*improved*

- a mathematical model of countermeasures against threats in the system of protection of critical resources, which takes into account the possibility of two threats entering the system for setting up the system of protection of critical resources of mineral fertilizer production;
- information technology of mineral fertilizer production management, the main components of which are the following tools: mathematical models of the mineral fertilizer production process, mineral fertilizer production management systems, a system for protecting critical resources of mineral fertilizer production, a mathematical model for countering threats in the critical resource protection system.

*The practical significance of the results*

The mathematical models and management systems developed in this dissertation formed the foundation for creating an information technology system for managing mineral fertilizer production. This system ensures reduced energy consumption by implementing a chaos management system that increases the intensity of heat and mass transfer in the fluidized bed.

The following results are considered practically significant:

- a three-phase mathematical model of the granulation process in a fluidized bed;
- a chaos management system for the mineral fertilizer production process in a fluidized bed granulator;
- an information technology system for managing mineral fertilizer production.

The results of the dissertation were tested and utilized in the following organizations and institutions:

- in the educational process of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" during the teaching of courses such as *"Programming. Part 2. Data Structures and Algorithms"* and *"Algorithms and Mathematical Methods of Information Security"*;
- as part of the state-funded research project *"Information Technology for Critical Resource Protection"* (No. 0121U110809) in the educational process at the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" during the teaching of courses such as *"Information System Design"* and *"Project Management"*;
- at the V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine for integration into the "AGROTEP" information-analytical system.

The implementation of these results has been confirmed by relevant documentation.

**Keywords:** information technology, mathematical model, modeling, model, control system, optimal control, system, control, regulators, manipulators, force multiplication, multicriteria, information protection system, information protection, parameters.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus)

1. B.Y. Korniyenko, L.R. Ladieva, V.G. Pisarenko, J.V. Pisarenko, A.O. Nesteruk. Control systems for the granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 60. No 5. 2024. pp. 726-735. ISSN: 1573-8337. DOI: 10.1007/s10559-024-00710-6.

*Особистий внесок автора: розроблена та обрахована система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром та пояснений вибір MPC регулятора для використання в системі управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром.*

2. Korniyenko B., Nesteruk A. Mathematical Model of the Process of Production of Mineral Fertilizers in a Fluidized Bed Granulator. *Advances in Artificial Systems for Logistics Engineering III*. 2023. pp. 55-64. ISSN: 2367-4520. ISBN: 978-3-031-36115-9. DOI: 10.1007/978-3-031-36115-9.

*Особистий внесок автора: розроблена та обрахована трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.*

#### **Публікації у наукових фахових виданнях України**

3. Корнієнко Б.Я., Нестерук А.О. Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Новітні технології*. 2022. №1(13). С. 47-65.

*Особистий внесок автора: проаналізовані методи управління процесом грануляції у псевдозрідженому шарі з використанням регуляторів.*

4. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. №3(5). С. 20-28.

*Особистий внесок автора: проаналізовано методи математичного моделювання процесу гранулювання процесу у псевдозрідженому шарі.*

5. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Системи управління процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. №1(7). С. 50-58.

*Особистий внесок автора: розроблені та обраховані системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором, LQR-регулятором, PID-регулятором та Fuzzy Logic-регулятором.*

6. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. №2(8). С. 51-61.

*Особистий внесок автора: запропоновано врахування розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої під час математичного моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому стані.*

7. Корнієнко Б.Я., Нестерук А.О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34(73), №5. С. 133-139.

*Особистий внесок автора: розроблена та обрахована система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором.*

#### **Публікації у збірниках матеріалів конференцій**

8. B. Korniyenko, L. Ladieva, L. Galata, O. Yakovenko, A. Nesteruk and V. Ivannikova. Web Application Critical Resources Protection. 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2021. pp. 256-261. DOI: 10.1109/ATIT54053.2021.9678541.

*Особистий внесок автора: проаналізовані методи захисту критичних ресурсів на основі веб застосунків.*

9. B. Korniyenko, L. Ladieva, L. Galata, A. Nesteruk and O. Matviichuk-Yudina. Information Control System for the Production of Mineral Fertilizers in the Granulator with a Fluidized Bed. 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2021. pp. 250-255. DOI: 10.1109/ATIT54053.2021.9678801.

*Особистий внесок автора: проаналізовані методи управління виробництвом мінеральних добрив з використанням регуляторів.*

10. A. Zhuchenko, L. Yaroshchuk, L. Ladieva, B. Korniyenko, A. Istomin and A. Nesteruk. Information System for Optimal Control of the Vacuum Membrane Distillation Process. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2022. pp. 225-229. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024175.

*Особистий внесок автора: проаналізовані методи управління виробництвом мінеральних добрив з використанням регуляторів.*

11. Korniyenko B., Ladieva L., Nesteruk A., Bereziianko K. Control System for the Production of Granular Mineral Fertilizers in a Fluidized Bed. The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing

Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2023. pp. 38-41. ISSN: 2770-4254. ISBN: 979-8-3503-5804-9.

*Особистий внесок автора: розроблена та обрахована математична модель гранулометричного складу та система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженням шаром з MPC-регулятором.*

12. Korniyenko B., Nesteruk A. Systems of information security in web applications. 10th International Scientific and Practical Conference “International Forum: Problems and Scientific Solutions” (June 26-28, 2022; Melbourne, Australia), 2022, pp. 365-372.

*Особистий внесок автора: проаналізовані методи забезпечення безпеки інформаційних системах.*

13. Korniyenko B., Nesteruk A. Functional safety standards for chemical production. 10th International Scientific and Practical Conference “Global and Regional Aspects of Sustainable Development” (May 26-28, 2024; Copenhagen, Denmark), 2024, pp. 385-391.

*Особистий внесок автора: аналіз вимог до функціональної безпеки в хімічній промисловості.*

14. Korniyenko B., Nesteruk A. Functional safety based on the IEC 61508 standard. 13th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (June 6-8, 2024; Melbourne, Australia), 2024, pp. 366-373.

*Особистий внесок автора: аналіз вимог до функціональної безпеки в виробництві згідно стандарту IEC-61508.*



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ, МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ ...	26
1.1. Процес виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром.....	28
1.2. Моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. ....	32
1.3. Системи управління режимом псевдозрідження та гранулометричним складом у грануляторі з псевдозрідженим шаром. ....	38
1.5. Постановка задач дослідження .....	46
1.6. Висновки до розділу 1 .....	48
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ГРАНУЛЯТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ .....	50
2.1. Трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі .....	50
2.2. Математична модель гранулометричного складу .....	61
2.3. Висновки до 2 розділу .....	67
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ .....	69
3.1. Дослідження показників Ляпунова та атрактора для трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.....	70
3.2. Система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром.....	78
3.3. Системи управління з різними регуляторами процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі .....	87

3.4. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регулятором .....	110
3.5. Висновки до розділу 3 .....	114
РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ .....	115
4.1. Система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив.	120
4.2. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів .....	128
4.3. Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив	135
4.4. Висновки до 4 розділу .....	139
ВИСНОВКИ .....	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	146
ДОДАТОК 1. Програмна реалізація трьохфазної математичної моделі гранулювання у псевдозрідженому шарі, програмна реалізація системи управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, програмна реалізація математичної моделі захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив .....	159
ДОДАТОК 2. Список публікацій здобувача, відомості про апробацію та впровадження результатів дисертації .....	168

## ВСТУП

### Актуальність теми

Інтенсивне ускладнення і збільшення масштабів промислового виробництва, розвиток математичних методів управління, впровадження інформаційних технологій в усі сфери діяльності людини, якісно змінили формулу управління, значно підвищили його ефективність. Переваги інформаційних технологій управління процесами виробництва мінеральних добрив яскраво проявляються під час збирання та обробки значної кількості інформації, реалізації складних законів управління. Для спрощення управління виробництвом мінеральних добрив необхідно побудувати ефективну інформаційну технологію, що включає функції управління та аналізу.

Розвиток сучасних інформаційних технологій дозволяє значно підвищити ефективність процесів виробництва мінеральних добрив. Зниження собівартості гранульованих мінеральних добрив реалізується шляхом підвищення якості готового продукту, зниження енерговитрат – за рахунок забезпечення підвищення інтенсивності тепло- та масообміну у системі управління хаосом та побудови нової інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

Складність технологічних процесів гранулювання у псевдозрідженому шарі під час виробництва мінеральних добрив зумовлює потребу дослідження різних математичних моделей, які б описували як підтримку температури у псевдозрідженому шарі так і гранулометричний склад, та використовувались для задач управління.

При створенні єдиної системи обробки інформації необхідно забезпечити цілісність, використовуючи для цього систему захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив. Властивість цілісності полягає у створенні нових функцій, що притаманні виробництву мінеральних добрив. Застосування інформаційної технології управління дало змогу подати у формалізованому вигляді, придатному для практичного використання, концентроване вираження сучасних наукових знань і практичного досвіду для реалізації та організації управління процесом виробництва мінеральних добрив. Тому інформаційна

технологія управління відіграє важливу стратегічну роль у виробництві мінеральних добрив, яка постійно зростає.

Значний внесок у розвиток теорії інформаційних технологій зроблено у працях вітчизняних вчених, таких як Палагін О.В., Теленик С.Ф., Корнага Я.І., Ролік О.І., Жураковський Б.Ю., Поліщук М.М., Савченко А.С., Корнієнко Б.Я. та інші. Серед закордонних дослідників заслуговують уваги роботи Д. Гідаспова, Т. Шефера, М. Ханслоу та А. Времана, які описують математичні моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Найбільш вагомих результатів у напрямку побудови систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі досягнуто закордонними дослідниками М. Хальстенсенем, С. Ватано, Х. Вангом. В працях Толюпи С.В., Юдіна О.К., Бучика С. С. отримано вагомні результати з питань математичного моделювання систем захисту інформації.

Разом з тим, розглянуті роботи не вирішують завдань комплексного підходу та не враховують специфіку управління технологічними процесами виробництва мінеральних добрив.

Тому існує нагальна потреба в подальшому дослідженні математичних моделей та систем управління виробництвом мінеральних добрив з метою їх удосконалення. А розробка інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив є надзвичайно актуальною на сьогоднішній день. Таким чином, усе це і зумовило необхідність вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності виробництва мінеральних добрив, шляхом побудови математичних моделей та систем управління виробництвом мінеральних добрив з урахуванням вимог зменшення енерговитрат та забезпечення заданої якості готового продукту.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота пов'язана з планами науково-дослідної та навчальної роботи і відповідає тематичній спрямованості наукових розробок, що здійснювалися у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», та, зокрема кафедри інформаційних систем та технологій, а саме в рамках держбюджетної науково-

дослідної роботи: у 2021–2024 рр. «Інформаційна технологія захисту критичних ресурсів» (№ 0121U110809); автор дисертації брав участь у якості виконавця.

### **Мета і задачі дослідження**

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності виробництва мінеральних добрив, шляхом побудови математичних моделей та систем управління виробництвом мінеральних добрив з урахуванням вимог зменшення енерговитрат та забезпечення заданої якості готового продукту.

Досягнення поставленої мети передбачає розв’язання таких задач:

- оглянути існуючі математичні моделі та системи управління процесом виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром;
- розробити математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок;
- побудувати та дослідити системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- дослідити наявності детермінованого хаосу у процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- побудувати систему управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдошрідженим шаром;
- розробити математичну модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів;
- створити інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив на основі розроблених моделей та систем управління.

**Об’єкт дослідження** – інформаційні процеси виробництва мінеральних добрив шляхом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

**Предмет дослідження** – моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, системи управління, системи захисту критичних інформаційних ресурсів для виробництва мінеральних добрив.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених задач у дисертаційній роботі використовувались методи математичного моделювання (при розробці трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, математичної моделі гранулометричного складу, математичної моделі протидії загрозам в системі захисту критичних ресурсів), числові методи розв'язку диференціальних рівнянь (при розрахунку трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, математичної моделі гранулометричного складу, математичної моделі протидії загрозам в системі захисту критичних ресурсів), методи управління (при розробці системи управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі з MPC, LQR, PID та Fuzzy Logic-регуляторами).

### **Наукова новизна отриманих результатів**

На підставі теоретичних і практичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі:

*вперше*

- розроблено трьохфазну математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок, розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої для перевірки наявності детермінованого хаосу;
- розроблено систему управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з визначенням часу прогнозування для забезпечення ефективного тепло- та масообміну;

*отримала подальший розвиток*

- математична модель гранулометричного складу, яка враховує умови для росту частинок, підвищення температури від центру до боків в зоні змочування, рівномірність температури теплоносія в ізотермічній зоні, різке падіння температура теплоносія у зоні теплообміну, агломерацію частинок;

*удосконалено*

- математичну модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів, яка враховує можливість надходження до системи двох загроз для налаштування системи захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив;
- інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив, основними компонентами якої є наступні засоби: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив, математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Розроблені в дисертаційній роботі математичні моделі та системи управління стали основою для створення інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив, що забезпечує зниження енерговитрат за рахунок розробки системи управління хаосом, що збільшила інтенсивність тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі.

Практично вагомими вважаються такі результати:

- трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром;
- інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив.

Результати дисертаційної роботи апробовано і використано у таких організаціях та установах:

- у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час викладання дисциплін «Програмування. Частина 2. Структура даних та алгоритми», «Алгоритми та математичні методи захисту інформації»;

- результати виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Інформаційна технологія захисту критичних ресурсів» (№ 0121U110809) у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час викладання дисциплін «Проектування інформаційних систем», «Управління проєктами»;
- у Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України для впровадження в інформаційно-аналітичну систему «АГРОТЕП».

Дані про впровадження підтверджено відповідними документами.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора полягає в наступному: в [1, 5, 7] розроблено та реалізовано трьохфазну математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі; в [2, 8] розроблено та реалізовано систему управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регулятором; в [3] розроблено та реалізовано систему управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром; в [4, 6] реалізовані системи управління з різними регуляторами процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні наукові положення, результати, рекомендації та висновки дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) (м. Київ, грудень 2021 року); 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) (м. Київ, грудень 2022 року); 10th International Scientific and Practical Conference “International Forum: Problems and Scientific Solutions” (м. Мельбурн, червень 2022 року); 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (м. Дортмунд, вересень 2023 року); 10th International Scientific and Practical Conference “Global and Regional Aspects of Sustainable Development” (м. Копенгаген, травень



2024 року); 13th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (м. Мельбурн, червень 2024 року).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 14 наукових публікаціях, серед них 2 публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus); 5 публікацій у наукових фахових виданнях України; 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 173 сторінки, з них 127 – основного тексту, 44 рисунки, 3 таблиці, 2 додатки, список літературних джерел налічує 121 найменування.

## **РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ, МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ**

На сучасному етапі розвитку промисловості та аграрного сектору важливим завданням є забезпечення високоефективного виробництва мінеральних добрив, що виступають ключовим елементом у вирішенні проблеми продовольчої безпеки. Виробництво мінеральних добрив передбачає складні технологічні процеси, потребує системного підходу до управління, що дозволяє оптимізувати ресурси, підвищити продуктивність та забезпечити високу якість продукції. Інформаційні технології є основою для досягнення цих цілей, оскільки вони дозволяють автоматизувати ключові аспекти управління виробництвом, забезпечувати моніторинг технологічних процесів у реальному часі та приймати оптимальні рішення на основі аналізу великих обсягів даних.

Інформаційні технології управління виробництвом мінеральних добрив базуються на інтеграції сучасних цифрових інструментів, таких як математичне моделювання, автоматизовані системи управління, засоби збору та обробки даних, а також алгоритми оптимізації технологічних процесів. Вони спрямовані на вирішення таких завдань, як зниження енерго- та ресурсоспоживання, підвищення ефективності роботи обладнання, забезпечення стабільності технологічних процесів і відповідності готового продукту заданим стандартам якості. Особливого значення набувають інформаційні технології у контексті автоматизації роботи грануляторів з псевдозрідженим шаром, які є основними елементами у виробництві мінеральних добрив.

Сучасні системи управління дозволяють швидко відстежувати зміну технологічних параметрів, таких як температура гранул і теплоносія, вологовміст, швидкість потоку та інші показники, які впливають на якість продукту. Завдяки використанню інформаційних технологій можна зменшити людський фактор, автоматизувати складні обчислення, що забезпечує підвищення точності

управління технологічними процесами. Це особливо важливо для виробництва мінеральних добрив, яке відрізняється високою енергоємністю, складністю обладнання та вимогами до стабільності параметрів виробництва.

Водночас виробництво мінеральних добрив стикається з низкою проблем, які стримують впровадження ефективних інформаційних технологій. Серед основних можна виділити: недостатню інтеграцію інформаційних систем із технологічними лініями, високий рівень енерговитрат через застарілі методи моделювання та оптимізації, а також складність адаптації технологічних процесів до нових умов ринку. Наприклад, наявні математичні моделі технологічних процесів гранулювання у псевдозрідженому шарі часто не враховують такі важливі параметри, як динаміка вологовмісту гранул чи взаємозв'язок теплоти кристалізації та пароутворення. Це призводить до зниження точності управління, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту.

Ще однією актуальною проблемою є складність забезпечення функціональної безпеки виробничих систем, які повинні працювати стабільно за різних умов експлуатації. Функціональна безпека передбачає здатність системи виконувати всі необхідні функції в рамках заданих параметрів, що є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям, особливо на об'єктах підвищеної небезпеки, до яких належить виробництво мінеральних добрив.

З огляду на складність сучасних виробничих процесів, основними напрямками розвитку інформаційних технологій у цій сфері є створення нових математичних моделей, розробка адаптивних систем управління, а також впровадження технологій Інтернету речей (IoT), які дозволяють інтегрувати в єдину систему різні елементи технологічного процесу. Використання сучасних інформаційних технологій також сприяє оптимізації виробничих витрат, скороченню енергоспоживання та мінімізації відходів, що має важливе значення для підвищення економічної ефективності виробництва.

Інформаційні технології управління виробництвом мінеральних добрив є не лише важливим інструментом для забезпечення стабільної роботи технологічних процесів, але й потужним засобом для досягнення конкурентних переваг на ринку.

Їх ефективне впровадження дозволяє вирішувати завдання оптимізації виробництва, підвищення якості продукції, зниження собівартості та зменшення впливу на довкілля. Інтеграція новітніх інформаційних рішень у виробничі процеси стає визначальним фактором сталого розвитку галузі.

### **1.1. Процес виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром.**

Гранулювання частинок широко застосовується в різних галузях промисловості, зокрема в хімічній та фармацевтичній сферах, оскільки воно значно покращує якість кінцевого продукту. Цей процес забезпечує підвищення механічної міцності частинок, захист від мікроорганізмів і зовнішніх фізичних впливів, таких як надмірна температура, вологість та світло. До того ж, збільшення розміру та щільності частинок покращує умови їх обробки.

Стабільність псевдозрідженого шару відіграє ключову роль у процесах нанесення покриттів і гранулювання. Під час сушіння можуть виникати зони бездіяльності, що спричиняє агломерацію частинок та зниження коефіцієнтів тепло- і масообміну. Це може призвести до зупинки процесу на короткий час, а в критичних ситуаціях – до повного руйнування шару. Вологість і розмір частинок є критично важливими параметрами, які впливають на стабільність псевдозрідження, тому вони мають ретельно контролюватися та регулюватися.

Гранулювання є однією з ключових операцій у виробництві мінеральних добрив і безпосередньо визначає якість продукції. У результаті гранулювання фізико-механічні властивості добрив значно покращуються: вони не утворюють пилу під час внесення, мінімізуються втрати при транспортуванні, зберіганні та внесенні у ґрунт, підвищується розсипчастість, знижується ризик злежування, забезпечується рівномірний гранулометричний склад із мінімальним вмістом дрібнодисперсної фракції. Завдяки цим характеристикам добрива стають простішими у транспортуванні, зберіганні, дозуванні та пакуванні, а виробничі процеси можна легко автоматизувати та механізувати.

Для утворення твердих частинок із рідкого вихідного матеріалу, такого як розчини, емульсії чи суспензії, застосовуються технології кристалізації, гранулювання та розпилювального сушіння. Ці процеси є складними динамічними системами, які включають взаємодію рідкої та твердої фаз, а також тепло- і масообмін між ними [9-13]. Рідка сировина перетворюється на сипучі частинки без пилу за рахунок розпилення в технологічній камері. У псевдозрідженому шарі, сушеному гарячим повітрям, рідина випаровується, а тверда речовина формує новий шар на частинках, створюючи кінцевий продукт.

Гранулювання методом розпилення може здійснюватися як періодично, так і безперервно. При цьому процеси фарбування та формування частинок можуть поєднуватися і виконуватися одночасно в одному пристрої (рис. 1.1). Завдяки простій конструкції гранулятора з псевдозрідженим шаром, а також високим показникам тепло- та масообміну, можливо проєктувати компактні установки, які перевершують інші технології за ефективністю [14-18]. Однак у промислових масштабах цей процес є енергоємним, оскільки вимагає значних ресурсів природного газу для нагрівання повітря в технологічній камері [19].

Під час гранулювання розчинів методом зневоднення основною умовою є забезпечення чітко визначеного гранулометричного складу кінцевого продукту. Процес зростання гранул визначається фізико-хімічними властивостями вихідних матеріалів, параметрами технологічного режиму та іншими факторами, які впливають на взаємодію між диспергованими рідкою та твердою фазами.

Результати численних досліджень підтверджують, що на якість кінцевого продукту, ключовим показником якої є еквівалентний діаметр частинок, найбільше впливає температура псевдозрідженого шару, у якому формуються гранули (рис. 1.1). У грануляторі 1 з псевдозрідженим шаром розчин подається за допомогою виконавчого пристрою 2, а центри гранулювання – за допомогою виконавчого пристрою 3. Нагріте повітря, яке слугує теплоносієм, подається знизу догори. Готові гранули вивантажуються через виконавчий пристрій 4.

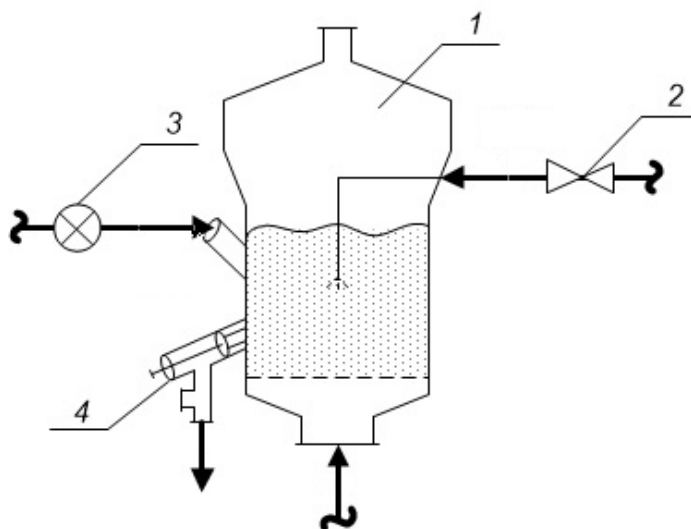


Рис. 1.1. Апарат для гранулювання термолабільних речовин у псевдозрідженому шарі: 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення початкового розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готової продукції.

Псевдозріджений шар часто розглядається як повністю перемішаний завдяки інтенсивному перемішуванню гранул. У верхній частині шару розпилюється розчин, утворюючи активну зону, де відбувається осадження спрею на гранули та випаровування розчинника.

У грануляторах із псевдозрідженим шаром процес кристалізації речовини відбувається під час формування гранул. Цей механізм реалізується як у псевдозріджених апаратах, так і в пристроях із падаючим шаром, у яких шар зволожується дисперсною рідиною та інтенсивно перемішується.

Тверда речовина, що вводиться в суспензійний шар у рідкій фазі, частково осідає на поверхні частинок шару, а частина утворює нові центри гранулювання. Ймовірність росту гранул на поверхні залежить від сили зчеплення краплі рідини з твердими частинками. Клейкість рідини визначається твердістю гранул та властивостями самої рідини, зокрема співвідношенням рідкої та твердої фаз у краплі.

Нові гранули можуть утворюватися також через механічне або термічне дроблення. У термічному випадку частинки більшого розміру, що циркулюють між зоною активного теплообміну та основним об'ємом шару з нижчою температурою, зазнають термічних напруг, які можуть розколоти гранулу. Інший варіант руйнування пов'язаний із температурою шару, що значно перевищує температуру кипіння рідини: при контакті з гранулою рідина інтенсивно кипить, утворюючи пар, що створює тиск і розриває плівку твердої речовини.

Наявні гранули під час процесу також можуть збільшуватися у розмірах. Це відбувається, коли частинки речовини з рідини осідають на поверхню гранул. Ще один спосіб росту – злиття гранул, що можливе за умов значних сил зчеплення між частинками, які виникають завдяки рідкій фазі. Надлишок рідини на поверхні частинок (через високу місцеву вологість чи температуру матеріалу) підсилює сили поверхневого натягу, що сприяють злипленню.

Практичне застосування процесу гранулювання супроводжується труднощами, такими як неоднорідність частинок за розміром, формою та кольором, що призводить до розподілу властивостей продукту. Вироблений продукт має відповідати специфікаціям, затвердженим замовником.

Для гранулювання у псевдозрідженому шарі застосовують апарати різної конструкції. Корпуси грануляторів бувають циліндричними, конічними з малим (до  $20^\circ$ ) або великим ( $30-60^\circ$ ) кутом розкриття стінок, циліндроконічними, прямокутними або квадратними. Гідродинамічні особливості апаратів залежать від їхньої форми. Наприклад, у пристроях з кутом розкриття до  $20^\circ$  псевдозрідження рівномірне по всьому перерізу. При більшому куті з'являється розріджене центральне ядро, а більш щільний шар ковзає біля стінок, спричиняючи фонтанування. Деякі пристрої мають зони локального фонтанування [11, 18, 20-27].

У циліндричних апаратах часто відсутній шар твердих частинок у циліндричній частині. Прямокутні пристрої використовуються для спрямованого переміщення частинок із поперечним потоком теплоносія, а квадратні – оптимальні для промислового застосування та проектування високопродуктивних пристроїв.

## 1.2. Моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Під час гранулювання розчинів методом зневоднення головною вимогою є отримання продукту з заданим гранулометричним складом. Загалом механізм росту гранул залежить від властивостей використовуваних матеріалів, параметрів процесу та інших чинників, що впливають на взаємодію рідкої та твердої фаз у дисперсному стані.

Для опису змін у розподілі розмірів частинок під час гранулювання в псевдозрідженому шарі застосовують модель балансу [11, 27].

Загальне рівняння балансу на основі довжини в пакетному режимі, яке описує швидкість зміни функції щільності числа частинок  $n(t, L)$  задається таким чином [18]:

$$\frac{\partial n(t, L)}{\partial t} = B(t, L) \quad (1.1)$$

$$- \frac{\partial}{\partial L} (G(t, L)n(t, L)) \quad (1.2)$$

$$+ \frac{L^2}{2} \int_0^{\frac{1}{(L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}}} \frac{\beta(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}, \lambda)}{2} n(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}) n(t, \lambda) d\lambda - n(t, L) \int_0^{\infty} \beta(t, L, \lambda) n(t, \lambda) d\lambda \quad (1.3)$$

$$+ \int_L^{\infty} S(t, \lambda) b(t, L | \lambda) n(t, \lambda) d\lambda - S(t, L) n(t, L) \quad (1.4)$$

де (1.1) – зародження, (1.2) – зростання, (1.3) – агрегація, (1.4) – розламування,  $n(t, L)$  – функція щільності в термінах діаметра частинок  $L$ ,  $\beta(t, L, \lambda)$  – ядро агрегації на основі довжини, яке описує частоту, яку частинки діаметром  $L$  та  $\lambda$  стикають, утворюючи частинку об'ємом  $L^3 + \lambda^3$ ,  $b(t, L/\lambda)$ , є функція розподілу фрагментів, що описує частоту утворення частинок діаметром  $L$  від розпаду частинки діаметром  $\lambda$ ,  $S(t, L)$ , засноване на довжині розриву швидкості вибору, яка є частотою руйнування частинки діаметром  $L$ ,  $B(t, L)$  є швидкістю зародження і  $G(t, L)$  є швидкістю росту.



У псевдозрідженому шарі зростання частинок здебільшого відбувається через механізм нашарування. Однак агрегація частинок часто домінує, тоді як процеси росту частинок недостатньо досліджені та рідко враховуються у моделях балансу. Для моделювання зростання частинок у псевдозрідженому шарі використовується спрощене ядро балансу [27]:

$$G = \frac{2(1-b)\Phi}{\pi \int_0^{\infty} nL^2 dL} \quad (1.5)$$

де  $b$  – фракція розпилення, яка сприяє зародженню,  $\Phi$  – розпилена розчинена речовина,  $L$  – діаметр частинок.

У дискретному підході рівняння моделі балансу розв’язується для кожного окремого інтервалу розмірів частинок. Основною перевагою цього методу є можливість отримання точного розподілу частинок за розміром. Проте для досягнення високої точності необхідно використовувати велику кількість інтервалів, що призводить до значних обчислювальних витрат, особливо для систем із широким розподілом частинок за розміром.

Метод моментів є підходом до розв’язання моделі балансу, який базується на використанні моментів – інтегральних характеристик розподілу частинок. Моменти визначаються за формулою:

$$m_k(t) = \int_0^{+\infty} n(L;t) L^k dL \quad (1.6)$$

де  $k$  — порядок моменту,  $n$  — чисельна щільність довжини,  $L$  - розмір частинок.

На відміну від традиційного підходу, в якому популяція частинок описується через розподіл щільності чисельності  $n(L)$ , метод моментів використовує інтегральні характеристики, пов’язані із середніми або загальними значеннями параметрів, таких як поверхня чи об’єм частинок. Основна перевага цього методу полягає в тому, що для його реалізації потрібно менше обчислювальних ресурсів порівняно з чисельними моделями балансу.

З появою високопродуктивних комп’ютерів було запропоновано модель гідродинаміки, яка має великий потенціал у дослідженні складної динаміки потоків

газо-твердих середовищ [28]. Існують дві основні категорії таких моделей: Ейлерова та Лагранжова.

У моделі Ейлера кожна фаза вважається взаємопроникним континуумом, де обсяг фаз не може перекриватися, а їхні об'ємні частки сумуються до одиниці. Об'ємна частка для фази  $q$  визначається рівнянням:

$$\sum_{q=1}^{n_p} a_q = 1 \quad (1.7)$$

де  $n_p$  позначає загальну кількість фаз і являє собою об'ємну частку кожної фази  $q$  ( $q=g$ , газова фаза і  $q=s$ , тверда фаза).

Ефективна густина фази  $q$  визначається:

$$\hat{\rho}_q = a_q \rho_q \quad (1.8)$$

де  $\rho_q$  - фізична густина фази  $q$ .

Модель Ейлера дозволяє включати декілька вторинних твердих тіл фази. Збереження маси та імпульсу виконуються відповідно для кожної фази. Таким чином, модель Ейлера вирішує набір з  $n$  рівнянь безперервності та імпульсу, що змушує цей підхід бути одним із найбільш складних багатозфазних моделей.

Рівняння збереження маси для фази  $q$  є:

$$\frac{\partial(a_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (a_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^{n_p} (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1.9)$$

де  $n_p$  - кількість фаз і  $\dot{m}_{pq}$  характеризує фазу масообміну  $\rho$  у фазу  $q$ , і  $\dot{m}_{qp}$  характеризує масообмін від фази  $q$  до фази  $\rho$ ,  $S_q$  означає термін джерела маси для фази  $q$ , який за замовчуванням дорівнює нулю.

Рівняння збереження імпульсу для газової фази можна записати так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(a_g \rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (a_g \rho_g \vec{v}_g) = & -a_g \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g + a_g \rho_g \vec{g} + \\ & + \sum_{s=1}^{n_s} (K_{gs}(\vec{v}_s - \vec{v}_g) + \dot{m}_{sg} \vec{v}_{sg} - \dot{m}_{gs} \vec{v}_{gs}) + (\vec{F}_g + \vec{F}_{lift,g} + \vec{F}_{vm,g}) \end{aligned} \quad (1.10)$$

де  $n_s$  позначає кількість твердих фаз. Перший доданок у лівій частині рівняння (1.10) означає нестационарне прискорення, а другий доданок представляє конвективне прискорення потоку.

Рівняння перенесення гранульованої температури для  $s$ -ої твердої фази пропорційне кінетичній енергії випадкового руху частинок. Отримане рівняння транспорту з кінетичної теорії за моделлю Дінга і Гідаспова [29-30] виглядає так:

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial(a_s \rho_s \Theta_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (a_s \rho_s \vec{v}_s \Theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s - \nabla \cdot (k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s) - \gamma_{\Theta_s} + \phi_{ps} \quad (1.11)$$

де  $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$  - генерація енергії твердим тензором напружень,  $k_{\Theta_s} \nabla \Theta_s$  являє собою дифузію енергії з коефіцієнтом дифузії для гранульованої енергії  $k_{\Theta_s}$ .

Модель багатофазного потоку, заснована на підході Ейлера-Ейлера, трактує кожну фазу як окремий взаємопроникний і взаємодіючий континуум у межах загальної обчислювальної області. У межах цієї моделі застосовується модифіковане рівняння Нав'є-Стокса, яке забезпечує умову, що об'єм однієї фази не може займати інша фаза. У даному підході тверді частинки, як правило, розглядаються як ідентичні з певним репрезентативним діаметром і щільністю. Взаємодії між фазами враховуються через додаткові члени в рівняннях, що описують динаміку кожної окремої фази. Основна перевага цієї методики полягає в можливості повномасштабного моделювання процесу. Застосування методу обчислювальної гідродинаміки, побудованого на основі моделі Ейлера-Ейлера, є визнаним і ефективним підходом для вивчення багатофазного потоку газо-твердих тіл у грануляторі з псевдозрідженим шаром [31–35].

Модель Лагранжа відстежує рух кожної частинки, враховуючи сили зіткнення між частинками та вплив газового середовища. Це дозволяє врахувати вплив індивідуальних властивостей частинок на динаміку процесу [31, 36-38]. Проте через обмеження обчислювальної потужності модель Лагранжа не може ефективно обробляти великі системи з мільйонами частинок [39-43]. У таких випадках доцільніше застосовувати модель Ейлера-Ейлера.

Модель Лагранжа-Ейлера описує газові бульбашки як дискретні частинки, що можуть зіштовхуватися, зливатися та змінювати свої розміри. Вона застосовується для дослідження взаємодії газу та твердих частинок у псевдозрідженому шарі [44-47].

Багатомасштабний підхід дозволяє поєднувати моделі меншого масштабу, що враховують взаємодії частинка-частинка та газ-частинка, для розробки законів взаємодії у великомасштабних моделях. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність цього підходу у моделюванні потоків [44-47].

Для врахування явищ агломерації модель балансу поєднується із рівняннями переносу Нав'є-Стокса, що забезпечує можливість моделювати такі процеси, як ріст, агрегація та руйнування частинок. Цей підхід дозволяє уточнювати характеристики газо-твердих потоків у межах моделі багатофазного потоку [48–52]. Після розв'язання рівнянь балансу отримані результати застосовуються для обчислення середнього діаметра частинок. Ці дані використовуються для подальшого уточнення параметрів взаємодії між газовою і твердою фазами в моделі багатофазного потоку, а також для оновлення інформації про розподіл часток, їх швидкість і температуру в межах моделі балансу.

Аналіз показує, що обчислювальна гідродинаміка має значні переваги для прогнозування поведінки багатофазного потоку в процесі гранулювання із псевдозрідженим шаром. Проте ключовими проблемами залишаються висока обчислювальна складність і відсутність безперервного виходу моделі, що є важливим для систем керування, заснованих на моделюванні. У цьому контексті багатокамерна модель балансу є ефективним рішенням, оскільки дозволяє зменшити обчислювальні витрати та використовується для управління процесами, враховуючи локальну гідродинаміку різних зон гранулятора. У цій моделі гранулятор поділяється на окремі регіони, виходячи з досліджень динаміки газо-твердої рідини. Кожен регіон вважається однорідним, що дозволяє застосовувати одновимірну модель балансу для прогнозування локального росту частинок і зміни їх розподілу за розмірами. При цьому враховується обмін частинками між

сусідніми регіонами. Кількість таких зон визначається експериментальними даними, гідродинамічним моделюванням або емпіричними методами.

У багатьох хіміко-технологічних процесах, що залучають тверду фазу, відбувається зміна розміру дисперсних частинок. До таких процесів належать кристалізація, розчинення, сушіння, горіння, піроліз, газифікація, стирання тощо. Ці зміни можуть значно впливати на процеси через різні механізми, наприклад, зміну кінетики, площі міжфазової поверхні чи характеристик руху фаз у робочому об'ємі. Часто цей вплив настільки значний, що його неможливо ігнорувати під час проєктування промислових систем. Наприклад, у процесах спалювання, піролізу та газифікації розмір частинок може змінюватися багаторазово, що важливо враховувати для забезпечення гідродинамічної стабільності, особливо в апаратах із псевдозрідженим шаром.

У випадках таких процесів, як гранулювання чи подрібнення, зміна дисперсного складу твердих частинок є основною метою технології, яка вирішує конкретні завдання. Наприклад, гранулювання дозволяє переробляти дрібнодисперсні частинки (пил) у готову продукцію, як це відбувається у виробництві мінеральних добрив. У галузі очищення стічних вод гранулювання активного мулу із псевдозрідженим шаром дозволяє отримувати органічні добрива.

Дослідження показують ефективність методу Монте-Карло для аналізу агломераційних процесів. Окрім того, розроблені математичні моделі, засновані на рівняннях балансу, які точніше відображають фізичну природу змін у дисперсному складі частинок. Однак такі моделі мають обмежений характер і зазвичай використовуються лише для специфічних технологічних процесів.

Для кількісного опису змін у дисперсному складі частинок, які обумовлені одночасною дією кількох процесів різної природи, застосовується принцип суперпозиції. У цьому підході швидкість зміни функції розподілу частинок за масою розглядається як сума швидкостей, що генеруються окремими процесами. Такий підхід математично відображений у формулі (1.12).

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial F}{\partial t} \right)_i \quad (1.12)$$

Цей підхід до математичного моделювання, заснований на використанні лінійних, квазілінійних диференціальних та інтегро-диференціальних рівнянь, дозволяє детально описати складні процеси через кінетичні рівняння, що відповідають окремим складовим процесу.

У загальному випадку зміни дисперсного складу твердої фази, що відбуваються в безперервних або періодичних апаратах, описуються рівнянням наступного виду:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \text{div}(\bar{w} - D_p \bar{\nabla})f + \frac{\partial}{\partial m}(u - \frac{\partial}{\partial m} D_m)f = I^+ - I^- \quad (1.13)$$

У формулі (1.13) визначено, що  $f(\vec{r}, m, t)$  є функцією розподілу частинок за розміром  $m$ . Відповідно до визначення функції розподілу, вираз  $f(\vec{r}, m, t)dm$  являє собою кількість частинок з масами в діапазоні  $(m, m + dm)$  на одиницю робочого об'єму апарата в околі точки з радіус-вектором  $\vec{r}$  у момент часу  $t$ . У рівнянні (1.13)  $\bar{w}$  – середня швидкість твердої фази,  $D_p$  – коефіцієнт змішування твердої фази (передбачається, що він однаковий для всіх напрямків), а також  $u(\vec{r}, m, t)$  – загальна середня швидкість безперервного росту частинок, яка може виникати як внаслідок злипання дрібних частинок з великими, так і внаслідок осадження на їх поверхні твердої фази з розчинів. Коефіцієнт  $D_m$  (коефіцієнт дифузії в масовому просторі) враховує варіації швидкості росту окремих частинок. Члени  $I^+$  і  $I^-$  в правій частині рівняння відповідають за зміну розміру частинок внаслідок коагуляції та дроблення відповідно.

### **1.3. Системи управління режимом псевдозрідження та гранулометричним складом у грануляторі з псевдозрідженим шаром.**

Стабільний режим псевдозрідження відіграє ключову роль у забезпеченні високої ефективності процесів, які включають покриття та гранулювання твердих частинок. У цьому режимі значно підвищуються інтенсивність теплопередачі та масообміну між твердою та рідкою фазами, що дозволяє досягати контрольованого збільшення розміру частинок. Однак, у залежності від умов у шарі, при контакті

вологих частинок можуть утворюватися рідкі з'єднання. Якщо вологість перевищує допустимі межі, це може спричинити агломерацію частинок і зневоднення шару, що негативно впливає на процес [53].

На сьогоднішній день практично реалізовані системи управління в основному орієнтовані на регулювання процесу тепло- та масо-обміну (наприклад, вологості і температури продукту) і інтегральних величин (наприклад, загальної маси продукту) або середніх величин (наприклад, середнього розміру частинок). Хоча схеми контролю загалом задовольняють встановлені вимоги, вони не можуть гарантувати, що розподіл властивостей загалом відповідає специфікаціям. Це означає, що в реальності зростаючої жорсткості специфікацій продукції система контролю виробництва потребує вдосконалення.

Саме ж виробництво мінеральних добрив є складним процесом з динамічною зміною показників. Для отримання кінцевого продукту використовуються хімічний розчин, який розпилюється на частинки в технологічній камері, в якій відбувається їх сушіння, тобто псевдозрідження, теплоносієм [54-66]. На рис. 1.2 зображена розширена схема процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, яка окрім самого апарату для гранулювання включає в себе і систему управління, яка регулює рівень надходження теплоносія та розчину. Завдяки регулюванню стає можливим змінювати співвідношення всіх елементів процесу гранулювання, що впливає на якість кінцевого продукту.

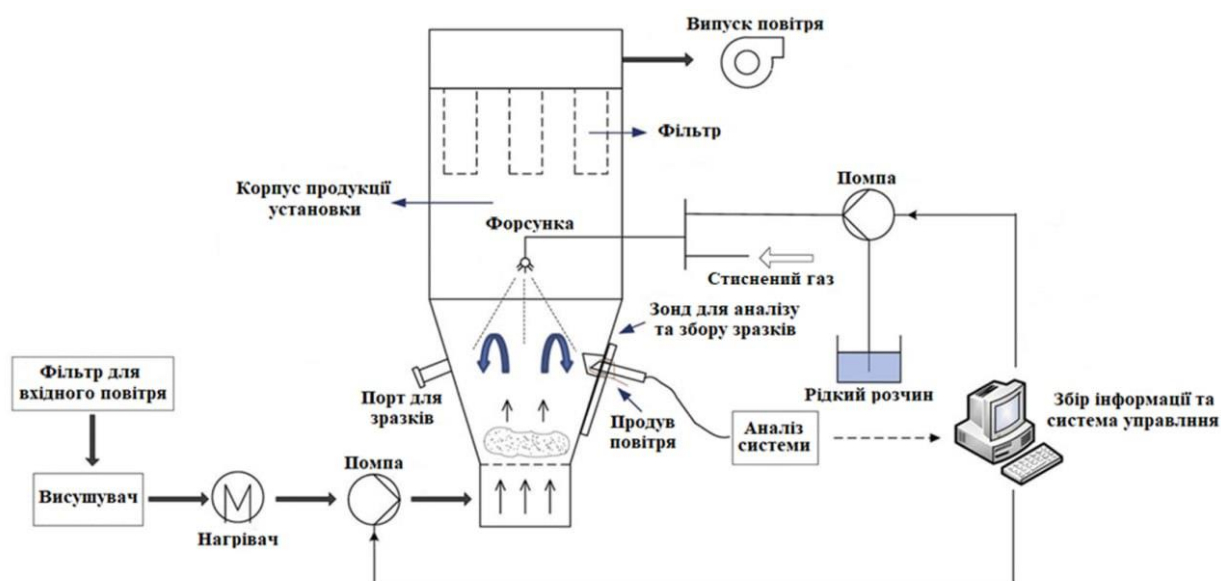


Рис. 1.2. Система управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі

Для кількісної оцінки режиму псевдозрідження, зокрема якості циркуляції частинок, було розроблено кілька підходів. До основних методів ідентифікації цього режиму належать: візуальне спостереження, аналіз осьового розподілу концентрації твердих речовин та інтерпретація коливань тиску в шарі [67].

Забезпечення стабільного режиму псевдозрідження є критичним для ефективності процесів, що включають покриття та гранулювання частинок. У стабільному режимі значно посилюються процеси тепло- та масообміну між твердою та рідкою фазами, що дозволяє контролювати зростання частинок. Проте, якщо в шарі виникає надмірна вологість, це може спричинити агломерацію частинок, утворення рідких з'єднань і навіть зневоднення шару [11].

Кількісний опис режимів псевдозрідження здійснюється шляхом аналізу часових рядів коливань тиску. Ефективність цього підходу залежить від точності методу вимірювання та аналізу сигналів. Сигнали тиску можуть оброблятися в часовій області (з використанням дисперсії чи стандартного відхилення), частотній області (спектральний аналіз) або на основі нелінійних часових рядів (теорія хаосу) [12]. Дані, отримані під час вимірювань тиску в шарі, відображають такі явища, як турбулентність, рух та виверження бульбашок [16].

Метод управління на основі перепаду тиску є найпростішим і найдоступнішим, тому широко використовується у виробничих процесах. Проте цей підхід має обмеження, оскільки не забезпечує раннього попередження про можливе зневоднення шару, що ускладнює його використання в автоматизованих системах [60, 63]. Незважаючи на це, існує чимало систем управління, які спрямовані на запобігання агломерації під час покриття частинок. У таких системах перепад тиску використовується як контрольована змінна, а витрата рідини для покриття – як регульована [20, 65, 66].

Іншим підходом є метод управління, заснований на аналізі споживання електроенергії системою перемішування. Він особливо ефективний для визначення кінцевої точки гранулювання [21–23]. Хоча середнє значення споживання енергії у



часовій області не виявляє рідинно-динамічних нестабільностей на початкових стадіях процесу, використання стандартного відхилення, дисперсії або спектрального аналізу сигналів енергоспоживання дозволяє отримати більш точну інформацію про гідродинамічний режим.

Процес гранулювання також досліджували за допомогою датчиків напруги для вимірювання коливань у камері обладнання з псевдозрідженим шаром. Ця камера складалася з двох концентричних циліндрів, між якими розташовувалися частинки в кільцевій області, а внутрішній циліндр обертався [57]. Для опису формування та росту гранул застосували спектральний аналіз і теорію хаосу (нелінійний аналіз із використанням реконструкції атракторів), що дозволяє здійснювати як якісний, так і кількісний аналіз.

Розроблено методологію для ідентифікації зон зневоднення шару мікрокристалічної целюлози та піску, що базується на вимірюванні сигналів коливань тиску та їх спектральному аналізі за допомогою перетворення Фур'є [28-29]. Аналіз здійснювався шляхом нелінійного підбору спектрів тиску до експоненціальної функції, схожої на Гаусову. Помітні зміни у профілях середньої частоти Гауса дозволяють точно визначати момент настання зневоднення. Середня частота Гауса разом із коефіцієнтом псевдозрідження відображають кипіння в шарі, демонструючи різні діапазони значень для різних режимів псевдозрідження, початкових етапів зневоднення та нерухомих шарів. Використання цієї методології у поєднанні з удосконаленим алгоритмом ПД-регулятора для моніторингу та управління процесами в реальному часі дозволило покращити гідродинамічні умови порівняно з неконтрольованими процесами.

Спектральний аналіз і теорія хаосу є більш точними й оперативними методами ідентифікації нестабільностей у порівнянні з моніторингом перепаду тиску та споживанням енергії у змішаному псевдозрідженому шарі. Однак спостереження спектрів потужності у частотній області або атракторів у багатовимірному просторі залишається суб'єктивним, що створює складнощі при побудові замкнутого циклу управління на основі лише аналізу спектрів потужності [59, 60]. Попри це, Гаусовий спектральний аналіз [59, 60] та статистична обробка

атракторів [58, 62] продемонстрували свою ефективність та надійність у виявленні нестабільних режимів псевдозрідження.

Прогнозування розподілу частинок за розміром для визначення кінцевої точки процесу гранулювання або виявлення небажаних агломераційних утворень під час покриття залишається складним викликом. Визначення моменту завершення процесів гранулювання чи покриття є значною проблемою. Для оцінки розміру частинок використовуються такі методи, як просіювання, обробка зображень і лазерна дифракція, які забезпечують високу точність, але не дозволяють отримувати дані в режимі реального часу безпосередньо в обладнанні для покриття або гранулювання [45, 46, 68, 69].

Вологість є ключовим параметром для контролю процесів, пов'язаних із гранулюванням у псевдозрідженому шарі. Зростаючі вимоги до якості продукції сприяли вдосконаленню методів моніторингу вологості на таких установках. Вміст води в гранулах є однією з основних змінних для підтримання стабільності режиму псевдозрідження та, разом із розміром гранул, служить важливим параметром якості, який впливає на такі характеристики, як: щільність, міцність, крихкість, тривалість розпаду, стійкість до стиснення та захист від мікроорганізмів. Для моніторингу вологості гранул у реальному часі та контролю процесу псевдозрідження застосовуються різні методи, серед яких найбільш поширеними є інфрачервона та ближня інфрачервона спектроскопія (на основі поглинання або відбиття хвиль в інфрачервоному спектрі), а також методи, що аналізують акустичні сигнали, наприклад, із використанням акустичної емісії [52, 70–76].

На процес гранулоутворення у псевдозрідженому шарі суттєво впливають такі параметри, як температура гранул, температура теплоносія та вологість гранул. Для забезпечення ефективного управління процесом пропонується контролювати ці параметри, що дозволить підвищити енергоефективність і якість кінцевої продукції. Температура теплоносія, температура гранул і їх вологість взаємопов'язані: перевищення температурного діапазону теплоносія може призвести до надмірного нагрівання гранул і критичного зменшення їх вологості. Це, у свою чергу, спричиняє надлишкове споживання енергії для нагрівання

повітря, що є енергетично неефективним. Також надмірне висушування гранул робить їх крихкими, що негативно впливає на транспортування та використання мінеральних добрив. Для побудови ефективної системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі рекомендується враховувати температури теплоносія та гранул як основні параметри управління [77–87].

#### **1.4. Функціональна безпека виробництва мінеральних добрив**

Функціональна безпека широко описана в багатьох стандартах різних організацій таких як ISO (International Organization for Standardization) 26262 [88]. Стандарт ISO 13849 також відноситься до функціональної безпеки і використовується в промисловій автоматизації [89].

Для хімічної промисловості існують стандарти ISO 45001:2018, який встановлює вимоги до систем управління ризиками та охорони праці, та ISO 14001:2015, який встановлює вимоги до систем управління навколишнім середовищем [90-91]. Про загальний підхід до управління ризиками для ідентифікації, оцінки та зменшення ризиків йдеться в стандарті ISO 31000:2018 [92]. Стандарт ISO 9001:2015 описує системи управління якістю та встановлює вимоги до систем управління якістю кінцевого продукту у хімічній промисловості [93].

Основною спеціалізацією NFPA (National Fire Protection Association) є пожежна безпека, але існує стандарт щодо функціональної безпеки електричних систем у промислових процесах – NFPA 70 [94]. Також в стандарті NFPA 79 містяться вимоги щодо електричної безпеки промислового обладнання, що тісно пов'язано з функціональною безпекою обладнання [95]. Також про функціональну безпеку йдеться в стандарті OSHA (Occupational Safety and Health Administration) 29 CFR 1910, який містить загальні правила та норми з безпеки праці, які застосовуються до всіх галузей промисловості [96]. Ще одна організація, яка займається розробкою стандартів функціональної безпеки для всіх галузей це

ANSI/ISA (American National Standards Institute / Industry Standard Architecture), а саме стандарт ANSI/ISA-84 (Functional Safety) [97].

Стандарт ІЕС (International Electrotechnical Commission) 61508 «Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems» є основним загальним стандартом функціональної безпеки, що застосовується для всіх галузей і визначає функціональну безпеку як частину загальної безпеки, що стосується систем управління та обладнання під їх контролем [98].

Центральними в стандарті є концепції імовірнісного ризику для кожної функції безпеки. Ризик є функцією частоти (або імовірності) небезпечної події та тяжкості наслідків події. Ризик знижується до прийняттого рівня шляхом застосування функцій безпеки.

Поняття функціональної безпеки може бути застосоване до систем моніторингу та управління. Такі системи збирають дані з видачею керуючого впливу, ціль якого наблизити показники до оптимальних. Структуру контуру управління можна описати як сукупність елементів, що здійснюють управління процесом або системою.

За стандартом ІЕС 61508-4, функціональна безпека – частина загальної безпеки, що зумовлена застосуванням обладнання для управління і систем управління для обладнання управління, і залежна від правильності функціонування систем, пов'язаних з безпекою, та інших засобів зниження ризику. Тобто ризик є достатньо важливим параметром, оскільки на його основі вирішується яка небезпека є більш пріоритетною.

Вимоги до документації містяться у розділі 5 ІЕС 61508-1. Основні вимоги полягають в тому, що документи мають містити достатню інформацію як для наступних стадій розробки, так і для верифікації результатів поточної стадії; достатню інформацію як для забезпечення, так і для оцінювання функціональної безпеки.

В ході оцінки функціональної безпеки проводяться періодичні аудити функціональної безпеки. Окрім цього, при проведенні сертифікації виконується оцінка процесів і продукту сертифікаційною організацією, за результатами якого

видається сертифікат відповідності. Аудит повинен проводитися відповідно до заздалегідь розробленого плану аудиту функціональної безпеки.

Модель життєвого циклу передбачає виконання послідовності етапів, починаючи від розробки концепції до валідаційного тестування. Основними етапами є формування концепції системи, створення специфікації вимог безпеки, проектування архітектури системи, розробка апаратних компонентів, аналіз ризиків та критичності відмов, проектування та написання коду програмного забезпечення, тестування окремих модулів і систем у цілому. Особлива увага приділяється інтеграційному тестуванню та валідації, що забезпечують відповідність інтегрованої системи вимогам до безпеки та функціональності.

Надійність об'єкта визначається його здатністю підтримувати параметри, необхідні для виконання заданих функцій, у встановлених межах. Вона охоплює режими експлуатації, технічне обслуговування, умови транспортування та зберігання. Одним із аспектів надійності є безвідмовність, яка вказує на здатність системи функціонувати безперервно без збоїв протягом певного часу або обсягу роботи. Безвідмовність є окремим випадком надійності для систем, які не потребують обслуговування.

Функціональна безпека, відповідно до стандарту ІЕС 61508, поєднує в собі функції безпеки та їхню цілісність. Вона тісно пов'язана з такими характеристиками, як безвідмовність, доступність і надійність. Через реалізацію функцій безпеки функціональна безпека забезпечує захист від випадкових і систематичних відмов.

Методи забезпечення функціональної безпеки спрямовані на попередження відмов апаратних компонентів, спричинених фізичним зношенням або старінням елементів, а також усунення недоліків, пов'язаних із процесами проектування, що можуть призводити до систематичних відмов. До того ж ці методи спрямовані на захист від кіберзагроз. Більшість методів є комплексними: вони одночасно адресують як випадкові, так і систематичні відмови, забезпечуючи таким чином всебічний підхід до функціональної безпеки.

До таких методів належить управління функціональною безпекою, управління проектами, управління життєвим циклом, методи розробки та тестування. Застосування методів управління проектами дозволяє забезпечити необхідний рівень безпеки, тобто утриматися у так званому трикутнику якості – цілісність, доступність, конфіденційність. Документування та управління документацією є важливим методом, що дозволяє зафіксувати всі технічні та організаційні рішення щодо розробки продукту для забезпечення безпеки. Реалізація життєвого циклу функціональної безпеки є вимогою ІЕС 61508, де особливий акцент робиться на такі аспекти, як процес розробки системи та програмного забезпечення, реалізація процесу верифікації та валідації, супровід продукту після релізу з урахуванням зворотного зв'язку за результатами експлуатації.

### **1.5. Постановка задач дослідження**

Сучасні інформаційні технології є невід'ємною складовою управління складними технологічними процесами, які використовуються в управлінні виробництвом мінеральних добрив. Особливістю такого виробництва є багатоступеневі хімічні реакції та фізичні процеси, що потребують чіткої координації та безперебійної роботи. Будь-який збій у цих процесах може призвести до зниження якості кінцевого продукту, збільшення витрат ресурсів, а в окремих випадках навіть до аварійних ситуацій. Це ставить високі вимоги до функціональної безпеки інформаційних технологій, які забезпечують роботу таких систем.

Однією з основних проблем у виробництві мінеральних добрив є складність управління процесами гранулювання, які відбуваються у псевдозрідженому шарі. Ці процеси вимагають точного дотримання технологічних параметрів, таких як температура, вологість, швидкість потоку реагентів, розподіл частинок тощо. Існуючі інформаційні технології часто є ресурсомісткими, що підвищує собівартість кінцевого продукту. Висока вартість програмно-апаратних рішень,

необхідність частого оновлення програмного забезпечення та значні витрати на енергоресурси є одними з ключових викликів сучасного виробництва.

Також важливою складовою є функціональна безпека інформаційних систем, яка забезпечує стабільну роботу автоматизованих систем управління виробництвом мінеральних добрив. У хімічному виробництві функціональна безпека означає здатність системи виконувати всі критично важливі функції в умовах нормальної роботи, аварійних ситуацій або змін у зовнішньому середовищі. Для технологічних процесів виробництва мінеральних добрив це включає забезпечення безперебійної роботи обладнання, дотримання нормативних характеристик кінцевого продукту та запобігання аварійним ситуаціям.

Процеси гранулювання у псевдозрідженому шарі характеризуються складною гідродинамікою, тепломасообміном і реакціями на молекулярному рівні, які необхідно враховувати для забезпечення оптимальних параметрів роботи. Більшість існуючих інформаційних технологій не враховують ці процеси у повній мірі, що призводить до перевитрат ресурсів, зниження ефективності процесу та втрат в якості кінцевого продукту.

Запровадження нових інформаційних технологій має базуватися на комплексному підході до вирішення завдань управління виробничими процесами. Наприклад, створення математичної моделі, яка враховує процеси на мікро- та макрорівні, дозволить оптимізувати умови гідродинаміки шару, знизити вартість переробки та підвищити ефективність виробництва. У свою чергу, автоматизація систем управління дозволить досягти стабільності у виробництві та забезпечити отримання продукції високої якості при зменшенні витрат.

### **Завдання дисертаційної роботи**

Отже, для збільшення ефективності виробництва мінеральних добрив потрібно вирішити такі задачі:

- розробити математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок;

- побудувати та дослідити системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- дослідити наявність детермінованого хаосу у процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі;
- побудувати систему управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром;
- розробити математичну модель захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив;
- створити інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив на основі розроблених моделей та систем управління.

## **1.6. Висновки до розділу 1**

1. Проведено аналіз основних підходів до математичного моделювання процесу виготовленні мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Встановлено основні параметри, склад апарату, режими роботи та технологічні особливості процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Встановлена необхідність забезпечення математичного механізму прогнозування гранулометричного складу – основного показника якості вихідного продукту.

2. Розглянуті основні підходи до побудови систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому стані. Виявлено необхідність врахування хаотичного характеру руху частинок у псевдозрідженому шарі для побудови системи управління процесом виробництва мінеральних добрив та підвищення ефективності технологічного процесу.

3. Для підвищення стану захищеності процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив від загроз порушень функціональної безпеки, які можуть вплинути на зміну критичних ресурсів, виявлена необхідність забезпечення математичного механізму протидії загрозам. Проаналізована нормативна база вимог функціональної безпеки для хімічної промисловості.



4. Сформовані задачі, які необхідні для досягнення поставленої мети дисертації. Існуючі підходи до моделювання виробничого процесу не дозволяють повною мірою врахувати вплив динаміки пов'язаних параметрів, що призводить до підвищення енергоспоживання та зниження ефективності процесу. Це зумовлює необхідність розробки нової інформаційної технології, яка базується на комплексних моделях, що враховують всі ключові параметри технологічного процесу, включаючи розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої. Така інформаційна технологія дозволить покращити управління виробництвом мінеральних добрив, забезпечивши задану якість готового продукту та зменшення енерговитрат.

## **РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ У ГРАНУЛЯТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ**

Створення математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі є одним із ключових кроків для адекватного опису технологічного процесу. Комбіновані процеси сушіння та гранулювання в одному апараті є перспективним рішенням, яке дозволяє значно знизити енерговитрати. Це усуває необхідність попереднього сушіння розчину та подальшого гранулювання отриманого порошку в окремому пристрої. У результаті комбінованого підходу на виході отримують гранульований продукт, що підвищує ефективність виробництва.

Зміна гранулометричного складу твердих частинок може бути пов'язана з різними фізичними явищами, такими як дроблення, агломерація, стирання, усадка, розчинення тощо. Для врахування фізики процесу розроблено трьохфазну математичну модель гранулювання у псевдозрідженому шарі, що описує температуру частинок, температуру крапель та температуру теплоносія.

Основним показником якості готового продукту є гранулометричний склад мінеральних добрив. Для оцінку кількості гранул заданої якості розроблено математичну модель гранулометричного складу.

### **2.1. Трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі**

Псевдозріджений шар відіграє важливу роль у сучасній техніці, завдяки своїм унікальним властивостям і широким можливостям застосування. Псевдозрідження – це процес, при якому шар сипучого матеріалу перетворюється на псевдогомогенну систему під впливом потоку газу або краплинної рідини, що виконує функцію зріджувального агента. У цьому стані тверді частинки шару поведуться так, ніби вони «зважені», подібно до рідких частинок у рідині. Псевдозріджений шар набуває властивостей рідини, таких як плинність, здатність переливатися, утворення хвиль і відсутність внутрішнього тертя. Ці унікальні

характеристики забезпечили широке поширення технологій, що використовують псевдозріджені шари.

Промислове застосування псевдозріджених шарів зумовлене їх численними перевагами [55]. Інтенсивне перемішування твердої фази в таких шарах сприяє рівномірному розподілу температур і концентрацій, що усуває ризик локального перегріву, який може негативно вплинути на якість продукту та стабільність технологічного процесу. Крім того, коефіцієнти теплопровідності та тепловіддачі між псевдозрідженим шаром і теплообмінними поверхнями є високими, порівнянними з аналогічними показниками для краплинних рідин. Це дозволяє проводити процеси з великим тепловим навантаженням та високою точністю температурного контролю.

Ще однією важливою перевагою є велика активна поверхня фазового контакту, яка наближається до сумарної поверхні частинок. Завдяки плинності псевдозрідженого шару стає можливим створення апаратів безперервної дії, що дозволяють обробляти речовини в різних агрегатних станах: порошки, пасти, розчини, суспензії тощо. Крім того, апарати з псевдозрідженим шаром мають відносно просту конструкцію, легко піддаються автоматизації та забезпечують високу ефективність процесів.

Властивості твердих частинок, що становлять шар (дисперсність, жорсткість, форма), мають великий вплив на характер псевдозрідження. Монодисперсний матеріал схильний до утворення псевдозріджених шарів із барботажем бульбашок. Полідисперсні матеріали утворюють однорідніші шари, псевдозрідження їх протікає легше. Вологі, пухкі матеріали, що злежуються, утворюють шари з каналами, по яких проходить основна частина газу. Отже, при зрідженні газами спостерігається неоднорідне псевдозрідження, для якого характерне утворення бульбашок. Запропоновано чимало теорій для пояснення цього явища, але жодну з них повністю не підтверджено.

Математичні моделі процесу гранулювання класифікуються за кількістю фаз, де "фаза" позначає область, що містить тверду речовину або газ. Перші моделі базувалися на однофазному підході, який ігнорував сегрегацію газу та твердих

частинок, а також наявність порожнин у шарі. Цей підхід виявився малоефективним, оскільки описував процес у псевдозрідженому шарі навіть гірше, ніж моделі ідеального перемішування [11].

Значного прогресу досягнуто завдяки врахуванню особливостей гідродинаміки. Наприклад, моделі Девідсона та Харрісона для гетерогенних реакцій враховують різницю між перетвореннями у фазах для апарата ідеального перемішування та двофазної системи. Ці моделі дозволяють описати процес у вигляді умовно повністю перемішаної суцільної фази [11]. Відсутність врахування газових бульбашок у однофазних моделях спричинила появу двофазних підходів, які ґрунтуються на різних припущеннях щодо розподілу фаз.

За однією з них [45] псевдозріджений шар розглядається як система, що складається з двох фаз: безперервної, якою є зважені частинки з розподіленням між ними зріджувальним агентом, і дискретної газові бульбашки. При цьому вважається, що безперервна фаза перебуває у стані початкового псевдозрідження, а весь надлишковий газ проходить крізь шар у вигляді бульбашок.

Експериментальні дослідження показали відповідність двофазної теорії дослідним даним, проте вона потребує уточнення. Одне з них полягає в тому, що в деякому діапазоні швидкостей після переходу у псевдозріджений стан шар, розширюючись, залишається однорідним, а бульбашки з'являються при подальшому збільшенні швидкості газу. Встановлено, що при збільшенні швидкості газу зростає кількість газу, що проходить через безперервну, так і дискретну фази.

У роботі [55] зазначається, що ступінь однорідності псевдозрідженого шару залежить від співвідношення сил поверхневого натягу та сил, що перешкоджають утворенню бульбашок, таких як в'язкість і інерція. У псевдозріджених системах виявлено аналог поверхневого натягу, що допомагає зрозуміти процеси агрегації дрібнодисперсних частинок. Гідродинамічний опір, який діє на частинку під час її руху, створює низький тиск у гідродинамічному сліді, що сприяє зближенню частинок і утворенню агрегатів. Падіння тиску між частинками, відповідно до закону Бернуллі, сприяє формуванню агрегатів, які перебувають у стані нестійкої

рівноваги. Це призводить до утворення флуктуацій щільності, пульсацій шару, бульбашок і переходу в неоднорідний стан.

Двофазні моделі описують процес гранулювання у псевдозрідженому шарі як взаємодію двох фаз: газової (без твердих частинок) та твердої (що містить лише частинки). Трифазні моделі додають до цього зважену дисперсію та бульбашки, які містять газ того ж складу, що й у дисперсії. У рамках цих моделей масоперенос у зваженій дисперсії описується як двоетапний процес: від емульсії до зваженої дисперсії та далі до бульбашок.

Під час створення моделі, процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі розглядався як трифазний гетерогенний процес, в якому взаємодіють три компоненти: частинки, вихідний розчин та теплоносії. Під час моделювання вважалося, що зміна параметрію псевдозрідженого шару відбувається в часі без врахування зміни висоти та радіальної складової, теплообмін між всіма компонентами процесу є конвективним, частинки є монодисперсними, пористість та агломерація відсутні, краплі мають вузький розподіл за розміром, між краплями відсутні зіткнення, злипання та налипання на стінки корпусу.

Математична модель повинна відповідати таким ключовим вимогам, які забезпечують точність та реалістичність опису роботи гранулятора:

- Температурний діапазон роботи гранулятора: модель повинна враховувати, що температура в грануляторі знаходиться в межах від 300 К до 420 К.

- Початкові умови: для початку роботи гранулятора необхідно забезпечити такі початкові значення температури:

1. Температура гранул: 300–305 К.
2. Температура крапель: 290–295 К.
3. Температура теплоносія: 390–400 К.

- Граничні умови: модель повинна гарантувати, що параметри температури залишаються в допустимих межах:

1. Температура гранул не повинна перевищувати 370–390 К.
2. Температура крапель не повинна перевищувати 380–400 К.

### 3. Температура теплоносія не повинна опускатися нижче 300 К.

Ці вимоги є критичними для забезпечення стабільності роботи гранулятора, запобігання перегріву або переохолодженню компонентів, а також для досягнення необхідної якості кінцевого продукту.

Для опису процесу теплообміну в грануляторі використана наступна система рівнянь:

- Зміна температури частинок:

$$M_p C_p \frac{d\theta_p}{dt} = a_p S_p (\theta_a - \theta_p) - M_p v_{dry} Q_{dry} + G_d x_d Q_{cryst} + M_p C_p r_p \theta_{p0} + R_{ad} M_p C_d (\theta_d - \theta_p) - \gamma_\theta - \phi_{ps} \quad (2.1)$$

де  $a_p$  – коефіцієнт теплопередачі частинок,  $Bm/(m^2 \cdot K)$ ;  $S_p$  – площа поверхні частинок,  $m^2$ ;  $\theta_a$  – температура теплоносія,  $K$ ;  $\theta_p$  – температура частинок,  $K$ ;  $M_p$  – маса частинок,  $kg$ ;  $v_{dry}$  – питома швидкість сушіння вологи на частинках чи в краплях,  $1/c$ ;  $Q_{dry}$  – питома теплота сушіння крапель,  $Dж/kg$ ;  $G_d$  – масові витрати крапель,  $kg/c$ ;  $x_d$  – концентрація крапель розчину;  $Q_{cryst}$  – питома теплота кристалізації крапель,  $Dж/kg$ ;  $M_p$  – маса частинок,  $kg$ ;  $C_p$  – питома теплоємність частинок,  $Dж/(kg \cdot K)$ ;  $r_p$  – коефіцієнт аксіальної дисперсії частинок,  $1/c$ ;  $\theta_{p0}$  – початкова температура частинок,  $K$ ;  $R_{ad}$  – питома швидкість стикання крапель з частинками,  $1/c$ ;  $C_d$  – питома теплоємність крапель,  $Dж/(kg \cdot K)$ ;  $\theta_d$  – температура крапель,  $K$ ;  $\gamma_\theta$  – розсіювання енергії при зіткненні,  $Dж/c$ ;  $\phi_{ps}$  – передача кінетичної енергії,  $Dж/c$ .

- Зміна температури крапель:

$$M_d C_d \frac{d\theta_d}{dt} = G_d C_d \theta_{d0} - R_{ad} M_p C_d (\theta_d - \theta_p) + M_p v_{dry} Q_{dry} + a_d S_d (\theta_a - \theta_d) \quad (2.2)$$

де  $G_d$  – масові витрати крапель,  $kg/c$ ;  $C_d$  – питома теплоємність крапель,  $Dж/(kg \cdot K)$ ;  $\theta_{d0}$  – початкова температура крапель,  $K$ ;  $R_{ad}$  – питома швидкість стикання крапель з частинками,  $1/c$ ;  $M_p$  – маса частинок,  $kg$ ;  $\theta_d$  – температура крапель,  $K$ ;  $\theta_p$  – температура частинок,  $K$ ;  $M_p$  – маса частинок,  $kg$ ;  $v_{dry}$  – питома швидкість сушіння вологи на частинках чи в краплях,  $1/c$ ;  $Q_{dry}$  – питома теплота сушіння крапель,

Дж/кг;  $a_d$  – коефіцієнт теплопередачі крапель,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $S_d$  – площа поверхні крапель,  $\text{м}^2$ ;  $\Theta_a$  – температура теплоносія,  $\text{К}$ .

- Зміна температури теплоносія:

$$M_a C_a \frac{d\Theta_a}{dt} = G_a (C_a \Theta_{a0} - C_a \Theta_a) - a_p S_p (\Theta_a - \Theta_p) - a_d S_d (\Theta_a - \Theta_d) \quad (2.3)$$

де  $G_a$  – масові витрати теплоносія,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $C_a$  – питома теплоємність теплоносія,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\Theta_{a0}$  – початкова температура крапель,  $\text{К}$ ;  $\Theta_a$  – температура теплоносія,  $\text{К}$ ;  $a_p$  – коефіцієнт теплопередачі частинок,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $S_p$  – площа поверхні частинок,  $\text{м}^2$ ;  $\Theta_p$  – температура частинок,  $\text{К}$ ;  $a_d$  – коефіцієнт теплопередачі крапель,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $S_d$  – площа поверхні крапель,  $\text{м}^2$ ;  $\Theta_d$  – температура крапель,  $\text{К}$ ;  $M_a$  – маса теплоносія,  $\text{кг}$ .

Розроблена математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок. Систему рівнянь розроблено з урахуванням емпіричних співвідношень для розрахунку питомої швидкості висихання, питомої швидкості осадження крапель на частинках в результаті адгезії, коефіцієнта осьового розсіювання частинок, коефіцієнтів теплопередачі, коефіцієнта для розрахунку втрат матеріалу і товщини шару покриття, а також початкові умови.

Збільшення гранул більш імовірно, якщо збільшується сила і швидкість зчеплення крапель рідини з твердими частинками. Адгезивні властивості краплі, в свою чергу, залежать від твердості поверхні гранул і властивостей речовини, що розпилюється.

Питома швидкість стикання крапель з частинками може бути розрахована за наступною формулою:

$$R_{ad} = \frac{G_d}{M_{p0}} x_d = \frac{G_d}{M_{p0}} \left( \frac{St_d}{St_d + 0.35} \right) \quad (2.4)$$

де  $M_{p0}$  – початкова маса частинок,  $\text{кг}$ ;  $G_d$  – масова витрата крапель,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $St_d$  – число Стокса для крапель, яке можна розрахувати за такою формулою:

$$St_d = \frac{\rho_d v_a d_d^2}{\mu_a d_p} \quad (2.5)$$

де  $\rho_d$  – густина крапель,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $v_a$  – швидкість руху теплоносія,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $d_d$  – діаметр крапель,  $\text{м}$ ;  $\mu_a$  – динамічна в'язкість теплоносія,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $d_p$  – діаметр частинок,  $\text{м}$ .

Розсіювання енергії при зіткненні являє собою швидкість розсіювання енергії в межах твердої фази внаслідок зіткнень між частинками. Цей явище моделюється за допомогою кореляції Луна:

$$\gamma_\Theta = \frac{12(1-e_p^2)g_0}{d_p\sqrt{\pi}} \rho_p a_p^2 \left(\frac{3k_B\Theta_p}{M_p}\right)^{1.5} S_p \quad (2.6)$$

де  $e_p$  – коефіцієнт відновлення зіткнення частинок з іншими частинками;  $g_0$  – радіальний розподіл,  $\text{м}$ ;  $d_p$  – діаметр частинок,  $\text{м}$ ;  $S_p$  – площа поверхні частинок,  $\text{м}^2$ ;  $\rho_p$  – густина частинок,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $a_p$  – коефіцієнт теплопередачі частинок;  $\Theta_p$  – температура частинок,  $\text{К}$ ;  $k_B$  – стала Больцмана,  $\text{Дж}/\text{К}$ ;  $M_p$  – маса частинок,  $\text{кг}$ .

Передача кінетичної енергії випадкових частинок від твердої фази до рідкої фази може бути обчислена за формулою:

$$\varphi_{ps} = \frac{-3K_{ps}\Theta_p}{S_p} \quad (2.7)$$

де  $K_{ps}$  – коефіцієнт сили взаємодії рідини та твердого тіла,  $\text{Вм}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $S_p$  – площа поверхні частинок,  $\text{м}^2$ ;  $\Theta_p$  – температура частинок,  $\text{К}$ .

Кількість тепла, що виділяється при видаленні вологи з поверхні крапель, можна переписати так:

$$M_p v_{dry} Q_{dry} = \beta \frac{M_{h_2o}}{R\Theta_p} \Delta P Q_{dry} \quad (2.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масопередачі,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $M_{h_2o}$  – молекулярна маса води,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;  $\Theta_p$  – температура частинок,  $\text{К}$ ;  $R$  – універсальна газова стала,  $(\text{м}^2\cdot\text{кг})/(\text{с}^2\cdot\text{К}\cdot\text{моль})$ ;  $\Delta P$  – різниця парціального тиску,  $\text{Па}$ ,  $Q_{dry}$  – питома теплота сушіння крапель,  $\text{Дж}/\text{кг}$ .

Таким чином ми зможемо розрахувати всі 3 рівняння та отримати виміри температур частинок, крапель та теплоносія в одну одиницю часу.

**Результати обчислення трьохфазної математичної моделі гранулювання у псевдозрідженому шарі.**



Для отримання динамічних результатів розробленої математичної моделі створено програму для обчислення даної математичної моделі методом Рунге-Кутта 4-го порядку на мові програмування Python (перша програма). За допомогою вбудованих математичних бібліотек проведені обрахунки та візуалізована поведінка температур частинок, крапель та теплоносія з моменту включення установки до кінця виконання процесу.

Також створена ідентична по функціоналу програма в програмному забезпеченні MATLAB (друга програма). Результати обрахунку обох програм будуть використані в подальших кроках досягнення кінцевої мети. Перша програма використана для визначення показників Ляпунова та побудови атрактора при дослідженні хаосу під час виконання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Друга програма – основа для моделювання роботи регуляторів, оскільки програмне забезпечення MATLAB містить вбудовані конструктори для моделювання регуляторів, які значно полегшать даний етап.

Метод Рунге-Кутта 4-го порядку це один з найпоширеніших методів розв’язку диференціальних рівнянь. Це ітераційний метод з обчисленням проміжних значень функції та її похідних, що використовується для отримання більш точного результату.

В підрозділі 2.1. сформульована трьохфазна математична модель гранулювання у псевдозрідженому шарі, яка складається з трьох диференціальних рівнянь (2.1), (2.2) та (2.3). Щоб розв’язати їх методом Рунге-Кутта 4-го порядку нам необхідно знайти значення функції  $y(x)$  на проміжку  $[x_0, x_n]$ . Створену модель інтерпретуємо у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку у вигляді:

$$y' = f(x, y) \quad (2.9)$$

з початковими умовами  $y(x_0) = y_0$ .

За допомогою даного методу ми можемо обчислити наступне значення  $y_{n+1}$  під час наступного кроку  $x_{n+1}$ , який можна обчислити:

$$x_{n+1} = x_n + h \quad (2.10)$$

де  $h$  – величина одного кроку. В нашому випадку це час, один крок якого рівний 0.001 секунди.

Для визначення проміжних значень потрібно обчислити значення  $k_1, k_2, k_3$  і  $k_4$  за допомогою формул:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_n, y_n) \\ k_2 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 &= hf(x_n + h, y_n + k_3) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Після обрахунку формул (2.11) стає можливим обрахувати наступне значення  $y_{n+1}$  за допомогою формули:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.12)$$

Далі, використавши наступне значення незалежної змінної – часу, яку ми можемо обчислити за допомогою формули (2.10), та щойно обчислену залежну змінну – температури частинок, крапель та теплоносія, повторюємо алгоритм спочатку до того моменту, доки ми не дійдемо до останнього значення в проміжку  $[x_0, x_n]$ . Під час програмних обрахунків даний проміжок дорівнює  $[0.001, 150]$  з кроком 0.001 секунди.

Для програмної реалізації в пакеті MATLAB використана функція *ode45()*, яка дозволяє розв'язати систему диференціальних рівнянь за допомогою комбінації метода Рунге-Кутта 4-го і 5-го порядку. Дана функція (*ode45()*) добре підходить для функцій, що не можуть різко зростати чи падати, що добре корелюється з раніше створеною математичною моделлю гранулювання у псевдозрідженому шарі, оскільки температури під час даного процесу різко не змінюються, а коливаються в невеликих межах. Активний теплообмін між частинками, краплями та теплоносієм спостерігається лише на початку даного процесу, що не вплине на точність обчислень. Теплоносії постійно нагрівається, що не дає йому надто сильно охолонути.

Очікується, що після початку виконання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, теплоносії почне активно збільшувати температуру

частинок та крапель за рахунок передачі своєї власної температури, через що його температури має знизитися. Оглядатися будуть перші 150 секунд процесу, оскільки прогнозується, що зв цей час температури повинні вийти на стабільний рівень та коливатися лише в межах невеликого проміжку, оскільки процес не є лінійним і теплообмін відбувається постійно.

Для моделювання використані наступні значення, що наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Перелік параметрів та відповідні їм позначення і розмірності

Назва	Позначення	Значення
Маса частинок	$M_p$	1.5
Маса крапель	$M_d$	2
Маса повітря	$M_a$	3.5
Маса частинок до старту	$M_{p0}$	1.53
Питома теплоємність крапель	$C_d$	1590
Питома теплоємність частинок	$C_p$	1420
Питома теплоємність повітря	$C_a$	1011
Початкова теплоємність повітря	$C_{a0}$	1015
Початкова температура частинок	$\theta_{p0}$	300
Початкова температура крапель	$\theta_{d0}$	293
Початкова температура повітря	$\theta_{a0}$	393
Коефіцієнт аксіальної дисперсії частинок	$r_p$	$1 \cdot 10^{-5}$
Питома швидкість сушіння вологи на частинках чи в краплях	$v_{dry}$	0.47
Питома теплота кристалізації крапель	$Q_{cryst}$	82300
Питома теплота сушіння крапель	$Q_{dry}$	5000
Назва	Позначення	Значення
Коефіцієнт теплопередачі частинок	$a_p$	5.57
Коефіцієнт теплопередачі крапель	$a_d$	5.535
Площа поверхні частинок	$S_p$	$7.07 \cdot 10^{-7}$

Площа теплопередачі крапель	$S_d$	$6.07 \cdot 10^{-6}$
Масові витрати крапель	$G_d$	0.7
Масові витрати повітря	$G_a$	1
Концентрація крапель розчину	$x_d$	0.37

Після проведення обрахунків отримуємо графік залежності температур частинок, крапель, теплоносія від часу, яка зображений на рисунку 2.1.

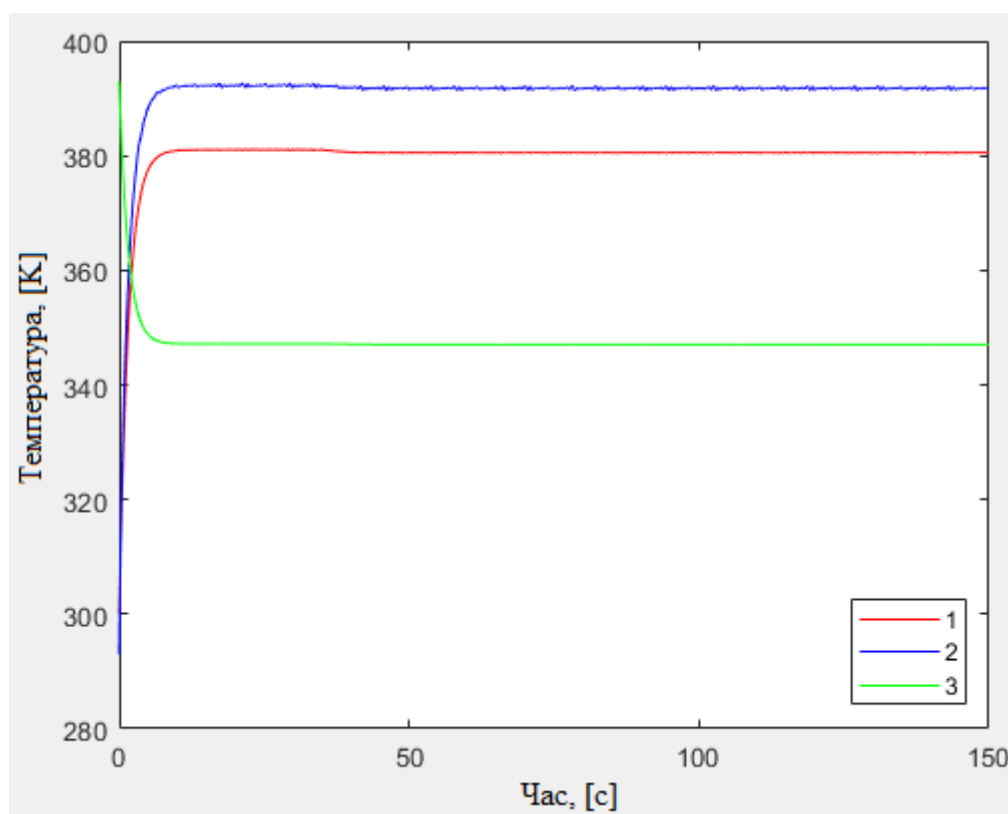


Рис. 2.1. Графік залежності температур частинок, крапель та повітря від часу (1 – частинки, 2 – краплі, 3 – теплоносії)

Отриманий графік свідчить про те, що процес відбувається коректно, температури взаємодіють між собою, як і передбачувалось, та всі 3 параметра, а саме температури частинок, крапель та теплоносія, стабілізуються на одному рівні приблизно за 40 секунд після початку процесу. До цього часу спостерігається незначне зменшення температури частинок та крапель на 1-2 кельвіна та постійне коливання всіх параметрів в невеликих межах, що свідчить про нелінійність

процесу. Також це свідчить про активне перемішування всіх компонентів під час процесу гранулювання.

Додатково перевірений проміжок [150, 2000], температури всіх компонентів поведуть себе стабільно та різкі перепади чи зміна діапазона стабілізації не спостерігаються. Температури тримаються в тому ж діапазоні коливань, на який вийшли близько 40-вої секунди моделювання процесу.

Для підтримання стабільної роботи апарату з псевдозрідженим шаром у необхідному гідродинамічному режимі всередині них потрібно розробити ефективну систему керування процесом зневоднення та гранулювання. Якість даної системи керування тісно пов'язана з точністю математичної моделі об'єкта для якого розробляється дана система керування. Отримані результати від розрахунку математичної моделі доказують, що вона може служити основою для розробки ефективної системи керування.

## **2.2. Математична модель гранулометричного складу**

При гранулюванні у псевдозрідженому шарі важливим критерієм якості є забезпечення потрібного гранулометричного складу готового продукту. Механізм росту гранул значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей вихідних матеріалів, умов експлуатації технологічного процесу та інших чинників, які визначають характер взаємодії між диспергованою рідкою фазою і твердими частинками.

Через інтенсивне перемішування частинок псевдозріджений шар часто вважають повністю змішаною системою. Розчин розпилюється у верхній частині шару, формуючи активну зону, де відбувається осідання розчину на поверхні гранул і випаровування розчинника. Дані вимірювань температури повітря в шарі з верхнім розпиленням через форсунку вказують на існування трьох чітко окреслених зон:

- Зона зволоження: Розташована поблизу розпилювальної форсунки у верхній частині шару. Тут спостерігається низька температура та висока вологість через безпосереднє осідання рідини.
- Ізотермічна зона: Знаходиться навколо зони зволоження та біля стін гранулятора. У цій зоні встановлюється баланс між тепло- та масообміном, що забезпечує рівномірну температуру повітря.
- Зона теплопередачі: Розташована над розподільником гарячого повітря. У цій області температура гарячого повітря різко знижується через передачу енергії більш холодним частинкам, що надходять із верхніх зон.

Розміри цих зон залежать від робочих параметрів і значною мірою впливають на ефективність агломерації. Зокрема, агломерація залежить від діаметра частинок і глибини проникнення рідини у шар, особливо в зоні зволоження. Ріст частинок можливий лише за умов їхньої циркуляції через зону зволоження, де частинки взаємодіють із вологим розчином та злипаються при зіткненні. Розмір цієї зони та швидкість переміщення частинок у шарі визначають темпи росту частинок і загальну ефективність агломерації.

Гранулятор із псевдозрідженим шаром моделюється як система з двох реакторів, між якими здійснюється обмін частинками (рис. 2.2).

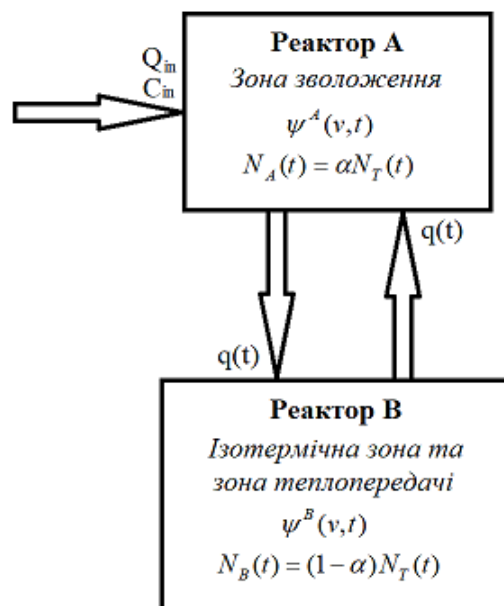


Рис. 2.2. Модель гранулятора з псевдозрідженим шаром

Математична модель повинна відповідати наступним вимогам:

- діапазон розподілу гранул в якому працює гранулятор повинен бути в межах від 0.01 мм до 3 мм;
- початкові умови функції розподілу гранул в реакторах А та В рівні нулю.

Реактор А моделює зону зволоження, тоді як реактор В відповідає ізотермічній та теплообмінній зонам. Застосування рівнянь балансу населення до цих реакторів дозволило сформулювати систему рівнянь (2.13), де перший і другий доданки характеризують обмін частинками між реакторами А і В, а також зростання шарів.

$$\begin{cases} \frac{d\psi^A(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot [\psi^B(v,t) - \psi^A(v,t)] - \frac{\partial}{\partial v} \left[ \frac{dv}{dt} \psi^A(v,t) \right] + F(v) - E(v) \\ \frac{d\psi^B(v,t)}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot [\psi^A(v,t) - \psi^B(v,t)] \end{cases} \quad (2.13)$$

У процесі дослідження сформовано систему диференціальних рівнянь, яка описує механізми гранулювання у псевдозрідженому шарі:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_i^A}{dt} = \frac{q(t)}{V_A} \cdot (\Phi_i^B - \Phi_i^A) + D_i(t) + \sum_{j,k,x_i}^{j \geq k} (1 - \frac{1}{2} \cdot \delta_{j,k}) \eta(v) \beta_{j,k} \cdot \Phi_j^A \cdot \Phi_k^A - \\ - \Phi_i^A \cdot \sum_{k=1}^N \beta_{j,k} \cdot \Phi_k^A - S \eta K_r \Phi_i^A \\ \frac{d\Phi_i^B}{dt} = \frac{q(t)}{V_B} \cdot (\Phi_i^A - \Phi_i^B) \end{cases} \quad (2.14)$$

де  $\Phi_i^A$  – функція розподілу гранул в реакторі А;  $\Phi_i^B$  – функція розподілу гранул в реакторі В;  $V_A$  – об'єм реактора А;  $V_B$  – об'єм реактора В;  $q(t)$  – швидкість обмінного потоку між реакторами А і В;  $D_i(t)$  – термін зростання дискретного нашарування;  $\beta_{j,k}$  – функція агломерації;  $i$  – клас крупності гранул;  $v$  – об'єм частинки;  $[v_i; v_i+1]$  – діапазон, де зосереджені гранули певного класу розміру.

Параметри  $\kappa$  і  $\gamma$  пов'язані з формою гранулометричного складу, а  $\beta_0$ , який описує кінетику зміни гранулометричного складу, залежить від умов експлуатації.

Під час розробки математичної моделі враховувалися такі ключові аспекти:

- Ріст частинок можливий лише в зоні змочування під форсункою, де умови для агломерації є оптимальними.
- У зоні зволоження температура зростає від центру до боків, створюючи градієнт, який впливає на процес агломерації.
- В ізотермічній зоні забезпечується рівномірність температури повітря, що сприяє стабільності тепло- та масообмінних процесів.
- У зоні теплообміну температура гарячого повітря швидко знижується через передачу тепла частинкам, що надходять з інших зон.
- Швидкість росту частинок визначається розміром змочувальної активної зони та інтенсивністю перенесення частинок у цю область псевдозрідженого шару.
- Агломерація відбувається переважно у зоні змочування, де частинки взаємодіють із рідкою фазою.

Дана математична модель також являє собою систему диференціальних рівнянь, яка може бути розв'язана за допомогою методу Рунге-Кутта 4-го порядку. При першому розв'язку рівнянь, діаметр гранул заданий 0.25 мм. Обрахунок проводився для 30 секунд.

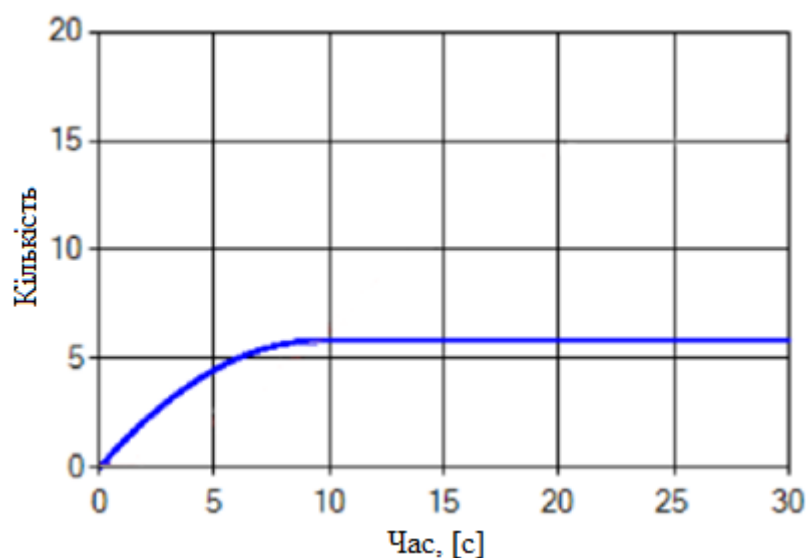


Рис. 2.3. Графік залежності кількості частинок діаметром 0.25 мм від часу гранулювання в реакторі А



З отриманого графіку видно, що кількість гранул вказаного діаметра в реакторі А досягла свого максимуму приблизно на 8 секунд процесу гранулювання. Тепер обрахуємо систему рівнянь (2.14) для кількох інших можливих діаметрів гранул.

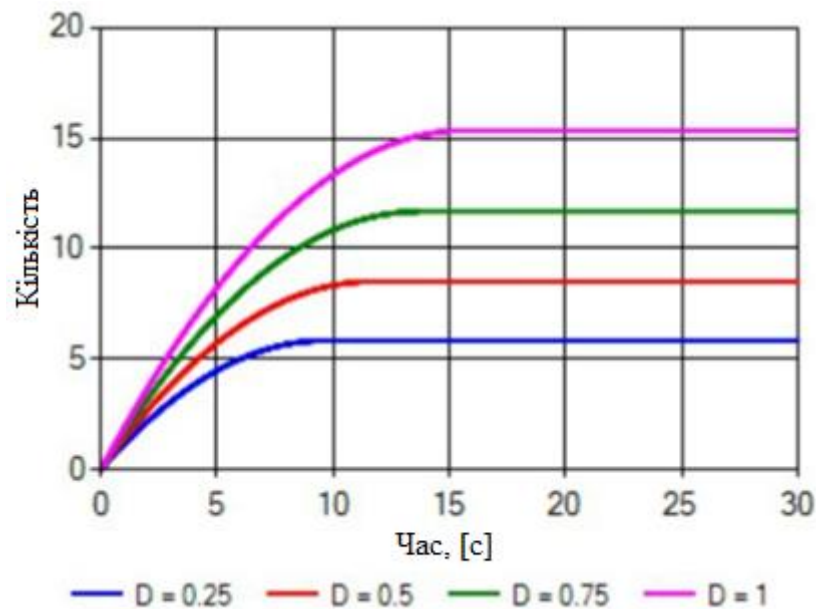


Рис. 2.4. Графік залежності кількості частинок діаметром 0.25, 0.5, 0.75 та 1 мм від часу гранулювання в реакторі А

Отже, кількість більших гранул зростає трохи швидше, але для досягнення їх максимуму потрібно більше часу. Також спостерігається, що зі збільшенням розміру гранул зростає і відрив по їх кількості відносно попереднього розміру. Також спостерігається зменшення кількості гранул, більших за 1.5 мм, що зображено на Рис. 2.5. Загалом розподіл гранул за розміром є рівномірним, тобто занадто малих гранул так само мало як і занадто великих відносно середнього значення діаметра.

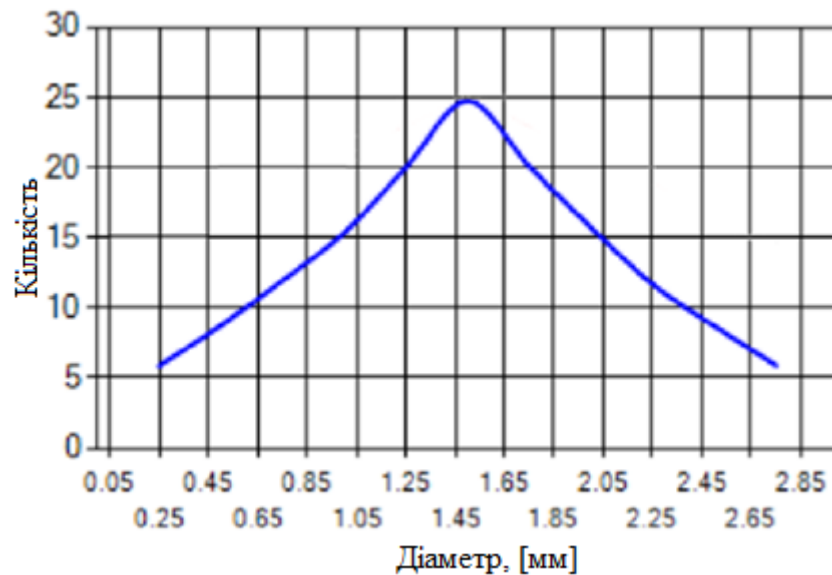


Рис. 2.5. Розподіл гранул відносно їх розміру в реакторі А

При огляді результатів обрахунку реактору В при тих же значеннях діаметру гранул спостерігається значно більша кількість дуже малих та дуже великих гранул відносно реактора А. Також кількість гранул зростає досить довго. Функція розподілу гранул досягає свого максимуму лише на 24 секунді процесу гранулювання, що також є значно довше в порівнянні з реактором А.

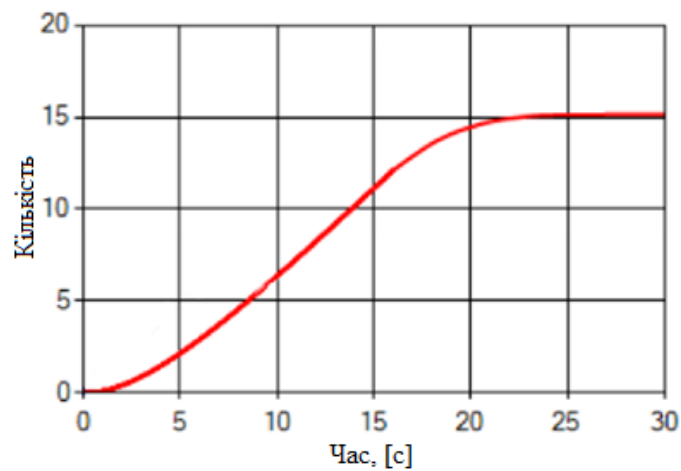


Рис. 2.6. Графік залежності кількості частинок діаметром 0.25 мм від часу гранулювання в реакторі В

Розриви в кількості гранул різного розміру менші. Тобто в загальному гранул в реакторі В знаходитиметься більше. Якщо ж в реакторі А гранули зростали досить стрімко, то в реакторі В це відбувається значно повільніше.

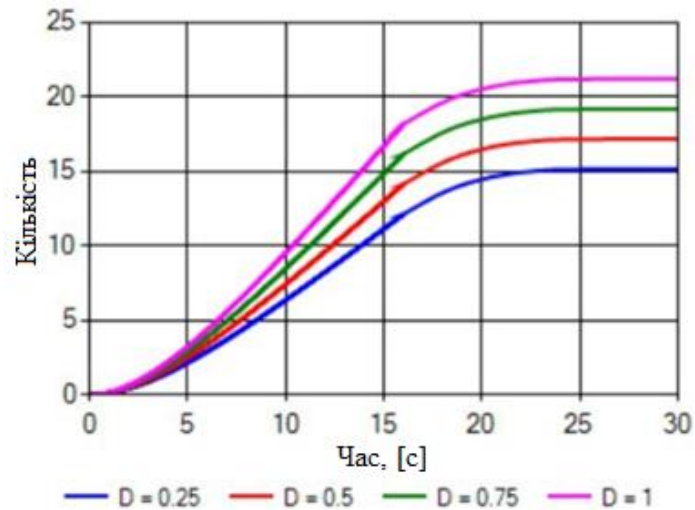


Рис. 2.7. Графік залежності кількості частинок діаметром 0.25, 0.5, 0.75 та 1 мм від часу гранулювання в реакторі В

Незважаючи на значно повільніший ріст та більшу кількість гранул загалом, кількість гранул оптимального розміру найбільша та така ж як в реакторі А. Таким чином ми отримаємо в загальному значно більше оптимальних гранул ніж занадто малих чи великих.

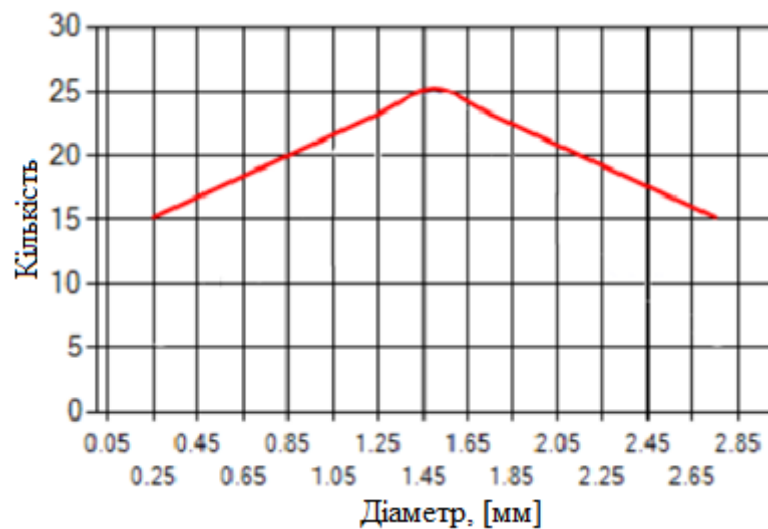


Рис. 2.8. Розподіл гранул відносно їх розміру в реакторі В

### 2.3. Висновки до 2 розділу

1. Розроблена трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, яка враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару,

передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками, їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок. Також враховані розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої. Дана математична модель може використовуватися для розробки систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Виявлено, що температури остаточно стабілізуються за 40 секунд та спостерігаються постійні нелінійні коливання.

2. Розроблена математична модель гранулометричного складу для процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив, яка базується на поділі псевдозрідженого шару на три зони – зона змочування, ізотермічна зона та зона теплообміну. Математична модель враховує, що умови для росту частинок виконуються лише в зоні холодного змочування під соплом, в зоні змочування температура підвищується від центру до боків, в ізотермічній зоні температура повітря рівномірна, в зоні теплообміну температура гарячого повітря різко падає, зростання частинок визначатиметься розміром змочувальної активної зони та швидкістю перенесення частинок до цієї частини псевдозрідженого шару, в зоні змочування відбувається агломерація. Дана математична модель також може використовуватися для розробки систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Виявлено, що розподіл, що під час процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі найбільше утворюється гранул з діаметром 1.55 мм, що є найкращим розміром. Зі збільшенням відхилення від даного показника – кількість утворених гранул значно зменшується.

### **РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ**

Ефективне управління виробництвом мінеральних добрив є важливим завданням, яке безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та економічні показники виробництва. В технологічних умовах, процес виробництва мінеральних добрив відзначається складністю, багатофакторністю та нелінійністю. Одним з ключових етапів є процес гранулювання, від якого залежить гранулометричний склад продукту, що, визначає його придатність для використання в аграрних цілях. Для того, щоб забезпечити належне функціонування процесу гранулювання, необхідно створити систему управління, яка дозволить регулювати технологічні параметри, враховуючи особливості виробництва та зовнішні впливи.

Особливу увагу в процесі дослідження приділено вивченню управління хаосом, який може мати місце в управлінні виробництвом гранульованих мінеральних добрив. Хаос ускладнює передбачуваність поведінки процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, що потребує застосування відповідних методів управління. Для аналізу хаотичних процесів доцільно використовувати параметри Ляпунова, які дозволяють визначити ступінь хаотичності, а також атрактор, що характеризує динаміку та може бути використаний для виявлення точок впливу на процес.

З метою розробки ефективної системи управління для процесу виробництва мінеральних добрив, можуть бути застосовані різноманітні підходи, такі як: управління з прогнозуванням (МРС-регулятор), пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД-регулятор) регулятори, системи нечіткого логічного управління (Fuzzy Logic-регулятор) та оптимальний лінійно-квадратичні регулятори (LQR-регулятор). Кожен із цих підходів має свої переваги і може бути застосований залежно від конкретних умов виробництва, особливостей динаміки процесу та вимог до управління.

### **3.1. Дослідження показників Ляпунова та атрактора для трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі**

Управління хаосом використовується для управління процесами, які проявляють хаотичну динаміку. Хаос – це вид динамічної поведінки, який має випадковий та непередбачуваний характер, але одночасно з цим має визначену структуру та закономірності. Основною метою управління хаосом в процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі є зміна хаотичної поведінки таким чином, щоб її коливання збільшилися зі збереженням стабільності процесу. Тобто коливання показників не повинні збільшуватися з часом, що призведе до випадку в неконтрольований непередбачуваний хаос, який вже не матиме закономірності. Таким чином стане можливим збільшити інтенсивність теплообміну та масообміну між частинками, краплями та теплоносієм. Це дозволить збільшити швидкість формування та якість кінцевого продукту.

На виробництві найчастіше застосовують метод контролю перепаду тиску для управління процесом [68-70, 99-100]. Також використовується підхід, заснований на моніторингу споживання електроенергії системою змішування [69, 101]. Основними показниками якості готового продукту залишаються вологість та розмір гранул. Саме на основі цих параметрів було розроблено низку систем управління [102-105].

Процес гранулювання значною мірою залежить від таких змінних, як температура гранул, температура теплоносія та вологість гранул. Ці параметри тісно взаємопов'язані: якщо температура теплоносія перевищує допустимі межі, гранули перегріваються, що призводить до критичного зменшення їхньої вологості. Це може негативно вплинути на якість кінцевого продукту. Тому для створення ефективної системи управління гранулятором із псевдозрідженим шаром рекомендовано орієнтуватися на моніторинг і регулювання температури теплоносія та гранул [19, 33, 106-113].

Під час процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі відбувається хаотичне перемішування частинок завдяки постійному поступанню теплоносія.

Внаслідок взаємодії частинок із теплоносієм відбувається їх коливання та зіткнення між собою. Завдяки цьому частинки можуть рівномірно покритися суспензією, що утворить якісні гранули, тому важливо досягти оптимального рівня перемішування.

Хаотичне перемішування частинок це важливий напрямок дослідження управління хаосом, який полягає в автоматичному управлінні детермінованим хаосом. Існують різні методи дослідження хаотичності, серед яких є відображення динаміки в просторі фазових змін, розрахунок показників Ляпунова, побудова атракторів, критерії Шеннона та інші.

Для визначення характеру хаотичності процесу перемішування обраховані показники Ляпунова та побудований атрактор. Показники Ляпунова вказують на чутливість до початкових умов, де високі показники свідчать про хаотичну поведінку, а невеликі зміни в початкових умовах можуть призвести до сильних змін в траєкторії.

Для кожного з вимірів фазового простору існує відповідно один показник Ляпунова. Кожному можливому стану відповідає лише одна точка простору. Зміна стану зображується рухом даної точки. Процес гранулювання з псевдозрідженим шаром складається з трьох фаз – частинки, краплі, теплоносій, відповідно обраховано 3 показники Ляпунова.

Якщо хоча б один з цих показників позитивний, тобто більший за нуль, то це може свідчити про наявність детермінованого хаосу, а від'ємні про стійкість та збіжність траєкторії. Чим вищі показники Ляпунова, тим сильніший вплив початкових умов.

Також показники Ляпунова можуть вказувати на тип атрактора. Атрактор – це множина точок у фазовому просторі, до якої збігаються фазові траєкторії при часі, що прямує до нескінченності. Тобто, якщо процес стартує з різних початкових умов, то в кінцевому підсумку він збігається до певного стану або станів.

Існують різні види атракторів:

- Точковий аттрактор, який представляє собою одну стаціонарну точку, до якої прямує процес, тобто процес стабільний і знаходиться в одному стані. На

такий тип атрактора вказують всі від'ємні показники Ляпунова при різних розмірностях фазового простору.

- Граничний цикл представляє собою циклічну траєкторію, до якої прямує процес. На такий атрактор вказує додатній показник Ляпунова при решті від'ємних показників.

- Двовимірний тор – це тип атрактора, що описує динаміку процесу в двох просторових напрямках, створюючи топологічну структуру тору. У випадку трьох фаз, на даний атрактор вказує останній від'ємний показник Ляпунова при наближених до нуля попередніх.

- Дивний атрактор – відзначається складною фрактальною геометрією. Такі атрактори часто характеризують процес, який проявляє хаотичну динаміку. Вони можуть містити траєкторії, які проявляються лише один раз і більше ніколи не повторюються. Такий атрактор характерний для трьохфазних процесів, які мають додатній, наближений до нуля та від'ємний показник Ляпунова.

Детермінований хаос – це явище, яке характеризується чутливою залежністю від початкових умов у динамічних процесах. Хоча такі процеси описуються детермінованими рівняннями, вони можуть демонструвати поведінку, яка на перший погляд виглядає як випадкова. Це створює складнощі для передбачення довготривалої динаміки процесу, але водночас надає нові можливості для її аналізу та управління. Виявлення та доведення наявності детермінованого хаосу в технологічному процесі, такому як виробництво мінеральних добрив, може бути важливим кроком для ефективного управління та контролю.

Для доведення наявності хаосу використовують досить багато різних інструментів математичного аналізу та моделювання. Одним з основних підходів є обчислення показників Ляпунова. Ці показники дозволяють визначити, наскільки сильно дві близькі траєкторії розходяться з часом. Якщо один показник Ляпунова позитивний, це є доказом того, що процес демонструє хаотичну поведінку. Також, для аналізу хаосу можуть бути використані атрактори, такі як атрактор. Цей геометричний об'єкт відображає динаміку процесу у фазовому просторі та дозволяє



виявити точки, де процес може бути особливо нестабільним або чутливим до зовнішніх впливів.

Доведення наявності детермінованого хаосу має важливе практичне значення. По-перше, це дозволяє глибше зрозуміти динаміку процесу і передбачити можливі сценарії його поведінки. Хоча хаос ускладнює довготривале прогнозування, його вивчення дає змогу виявити ключові точки впливу на процес, що дозволяє приймати більш обґрунтовані управлінські рішення. По-друге, розуміння хаотичної природи процесу дозволяє розробляти більш гнучкі та адаптивні системи управління, які здатні стабілізувати процес навіть у присутності хаотичних збурень.

Один з ключових аспектів управління хаотичними процесами полягає в контролі нестабільних періодичних орбіт, які лежать в основі хаосу. Використовуючи методи управління хаосом, такі як метод Отта-Гребоджі-Йорка (OGY), можна керувати процесом таким чином, щоб зменшити хаотичні коливання або навіть усунути їх. Наприклад, коригуючи невеликі зміни параметрів в стратегічних точках, можна стабілізувати процес і запобігти виходу на неконтрольовані траєкторії.

Доведення наявності хаосу і подальше його управління мають велике значення для технологічних процесів, таких як виробництво гранульованих мінеральних добрив. Хаос може викликати непередбачувані зміни в параметрах процесу, що призводить до погіршення якості продукту або навіть до аварійних ситуацій. Однак, управління хаосом дозволяє знизити ризики, оптимізувати процеси і забезпечити більш стабільну роботу виробництва. Наприклад, аналіз показників Ляпунова може допомогти у виборі таких параметрів, які мінімізують хаотичну поведінку і забезпечать стабільну роботу технологічного обладнання.

### **Показники Ляпунова для трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі**

Для розробленої трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі (2.1, 2.2, 2.3) показники Ляпунова обраховані за допомогою чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь у поєднанні з

рівняннями в варіаціях, що описують зміну траєкторії. Показник Ляпунова на кожній ітерації обраховується на основі нормованих векторів, логарифм з якого додається до попередньої ітерації. Метод Грама-Шмідта використаний для ортогоналізації векторів, отриманих після розв'язку системи диференціальних рівнянь.

Для реалізації алгоритму обчислення показників Ляпунова створений програмний модуль за допомогою вбудованих функцій MATLAB. Розрахунок показників Ляпунова відбувається в окремій функції, в яку подаються параметри диференціальних рівнянь трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, результатом яких є 3 вектори, які ортогоналізуються методом Грама-Шмідта, після чого нормалізуються та обраховуються поточні показники Ляпунова та вхідні дані для диференціальних рівнянь для наступної ітерації.

Під час дослідження отримано один додатний та два від'ємних показника Ляпунова (Рис. 3.1). Показники Ляпунова виду (+, -, -) свідчать про наявність детермінованого хаосу в трьохфазній математичній моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

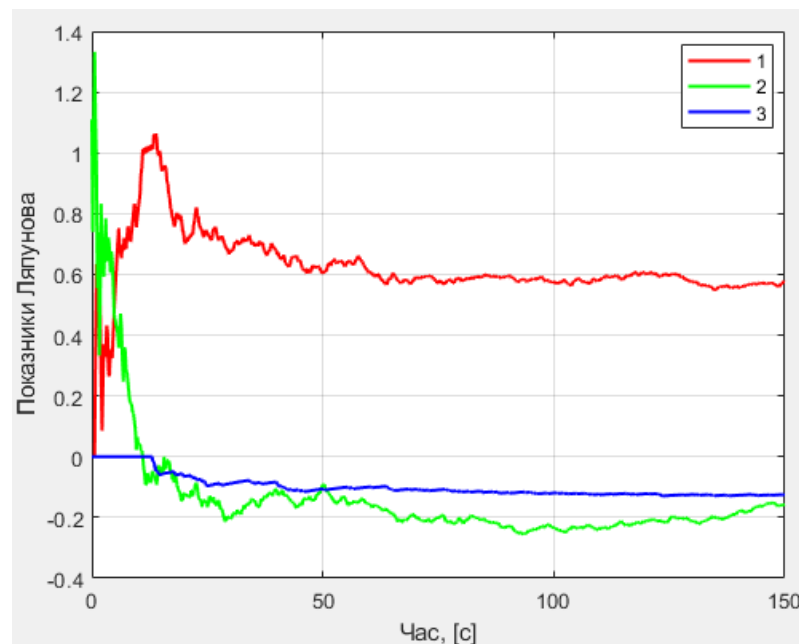


Рис. 3.1. Показники Ляпунова для трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі



коливання. Зокрема, аналіз атрактора може показати, чи є процес стабільним чи схильним до хаотичних збурень, що є визначальним для контролю параметрів технологічного процесу.

Атрактор також дозволяє більш точно визначати ключові параметри, на які слід впливати для управління процесом. У технологічних системах, таких як виробництво мінеральних добрив, хаос може виникати через внутрішні збурення або зовнішні впливи. Виявлення і аналіз атрактора допомагає виявити ці точки дестабілізації і запровадити контрольні заходи для їх уникнення. Крім того, атрактор може показати періодичні орбіти, де вплив на процес може бути найбільш ефективним.

Одним із аспектів використання атракторів в управлінні є можливість прогнозування поведінки процесу. Хоча довгострокове прогнозування є практично неможливим через чутливість до початкових умов, в короткостроковій перспективі атрактор може давати інформацію про характерні точки або напрямки, до яких наближається процес. Це відкриває можливості для проактивного контролю, коли процес управляється таким чином, щоб уникати хаотичних станів або використовувати їх для досягнення певних цілей.

Ще одним аспектом є можливість використання методів управління хаосом для стабілізації процесу. Наприклад, регулятори типу MPC (Model Predictive Control) можуть налаштоватися для врахування складних хаотичних процесів. Такі регулятори дозволяють передбачити траєкторію процесу на основі поточних умов і визначити стратегії управління для досягнення стабільності.

Атрактор може також допомогти у виявленні періодичних коливань або резонансів, що можуть бути використані для управління процесом. Наприклад, в процесі гранулювання необхідно підтримувати рівновагу між тепловим балансом і рухом частинок для досягнення заданого розміру гранул. Атрактор допомагає зрозуміти, як процес може вийти зі стану рівноваги і як це можна запобігти шляхом коригування параметрів.

Атрактор являє собою тривимірну траєкторію в системі диференціальних рівнянь, яка характеризує хаотичні властивості. Ця система диференціальних рівнянь виглядає наступним чином:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \quad (3.1)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \quad (3.2)$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z \quad (3.3)$$

де  $x, y, z$  – це змінні процесу (температура частинок крапель та теплоносія), а  $\sigma, \rho, \beta$  – параметри моделі ( $\sigma$  – ступінь розширення та стиснення траєкторії,  $\rho$  – різниця температур, що призводить до біфуркації та змін поведінки процесу,  $\beta$  – розмір атрактору та форму його траєкторії).

Отримано атрактор трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі (рис. 3.3).

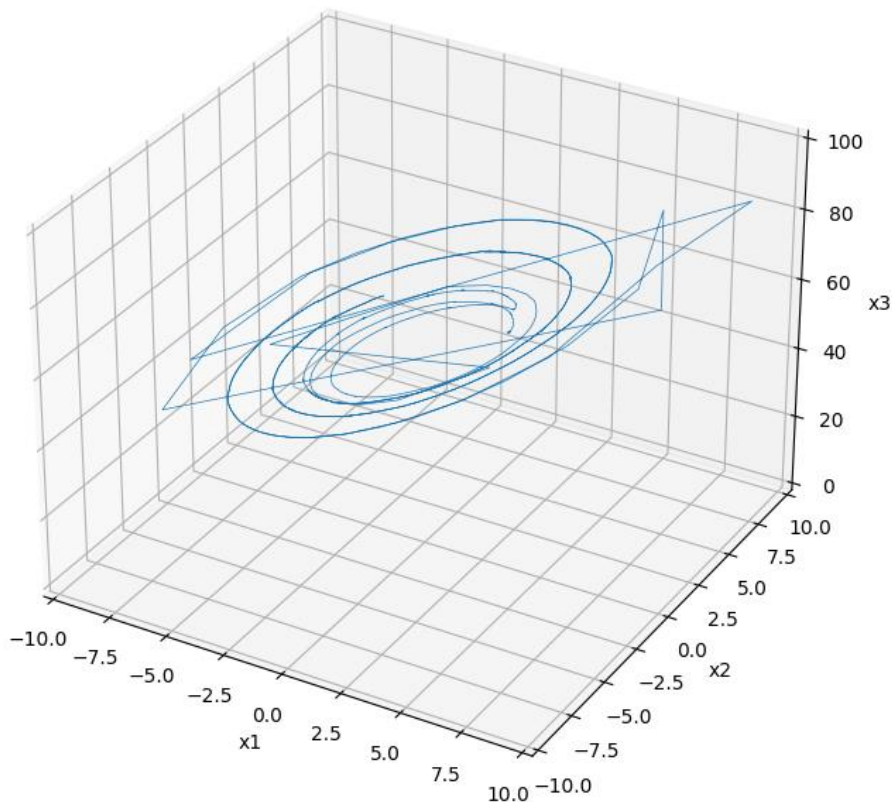


Рис. 3.3. Дивний атрактор трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Отримані результати свідчать про те, що має нестійкий граничний цикл, який являє собою незамкнену криву, що вказує на високу чутливість процесу до вхідних умов і параметрів, зміна в яких може призвести до значних змін в динаміці. Також атрактор містить непередбачувані коливання, що відбулися лише один раз, що свідчить про наявність детермінованого хаосу, що підтверджують показники Ляпунова. Загальна форма атрактора свідчить про те, що процес коливається навколо певного стану з часом, тобто процес не обмежується одним стабільним станом і містить коливання. Оскільки процес гранулювання чутливий до вхідних параметрів, то характер коливань в ній може залежати від початкових умов. Це означає, що змінюючи параметри витрат крапель та теплоносія можна управляти режимом перемішування та підтримувати активний режим перемішування.

За рахунок збільшення рівня хаотичності процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі можна покращити перемішування частинок, що підвищить швидкість та інтенсивність виконання процесу. Це можливо зробити коли процес знаходиться в стані коливань, але обмежених таким чином, щоб процес не втратив своєї стійкості.

### **3.2. Система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром**

Реалізація системи управління хаосом на основі трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі є важливим завданням для інтенсифікації тепло- масообміну при виробництві мінеральних добрив. Основна мета полягає в тому, щоб керувати складними й нелінійними динамічними системами таким чином, щоб вони працювали стабільно, навіть за умов, коли спостерігається хаотична поведінка. Хаос в технологічних системах може виникати внаслідок зміни параметрів процесу, таких як температура, швидкість потоку або тиск, і зазвичай це супроводжується непередбачуваними і нерегулярними коливаннями параметрів. Управління хаосом дозволяє забезпечити роботу при

менших чи більших коливаннях (в залежності від задачі) таким чином, щоб не втратити стабільність.

У трьохфазній математичній моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі відбувається взаємодія між твердою фазою (гранулами), газовою фазою (повітря чи інший газ, що може виступати в ролі теплоносія) і рідкою фазою (зв'язуюча речовина або волога, рідина). Ці фази взаємодіють одна з одною, що створює складну нелінійну динаміку, схильну до хаотичної поведінки. Гранули можуть хаотично переміщуватися в шарі під впливом потоку газу, що призводить до нерегулярної гранулювання, непередбачуваної зміни розміру гранул та інших параметрів процесу. Якщо не здійснювати управління цим процесом, результат може бути нестабільним і таким, що не відповідає вимогам до якості кінцевого продукту.

Управління хаосом на основі трьохфазної математичної моделі передбачає виявлення точок нестабільності (точок біфуркації), де поведінка стає хаотичною, і застосування методів для стабілізації цієї поведінки. Один із найпоширеніших підходів для управління хаосом полягає у використанні регуляторів з обмеженим зворотним зв'язком або інших типів алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори, LQR (лінійні квадратичні регулятори), Fuzzy Logic (нечітка логіка) або методи передбачувального керування на основі моделі (MPC). Ці регулятори допомагають коригувати поведінку процесу, підбираючи оптимальні параметри для кожної фази процесу (наприклад, регулюючи потік повітря або температуру), щоб зменшити нерегулярні коливання і підтримувати процес гранулювання у стабільному режимі.

Управління хаосом не означає його повне усунення, оскільки в деяких випадках невеликі хаотичні коливання можуть бути корисними і сприяти підвищенню ефективності процесу. Наприклад, в процесі гранулювання хаос може забезпечувати рівномірний розподіл частинок у псевдозрідженому шарі, що, в свою чергу, сприяє більш рівномірному утворенню гранул. Однак надмірний хаос може призвести до того, що гранули будуть утворюватися занадто великими або занадто дрібними, що негативно вплине на якість продукції. У випадку даної роботи за мету

поставлено збільшити хаотичність таким чином, щоб вона не втратила стабільність. Це дозволить збільшити перемішування частинок, що дозволить досягти кращого фінального продукту за менший час.

Управління хаосом дозволяє поліпшити контроль над параметрами гранулювання, підвищити якість продукції та зменшити витрати на виробництво за рахунок зниження кількості дефектних гранул. Використання трьохфазної моделі дає можливість враховувати взаємодію різних фаз процесу та точно прогнозувати досягнення нестабільного режиму, що дозволяє вжити своєчасних заходів для його запобігання.

### **Варіаційне дослідження трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі**

Розглянемо задачу управління хаосом для трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі (3.9), перехідна характеристика якої зображена на рис. 2.1. Для зручності замість доданків підставимо рівні їм коефіцієнти.

Коефіцієнти рівняння 2.1:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (a_p S_p) / (M_p C_p) \\
 a_2 &= (b_d e_{ps}) / (M_p C_p) \\
 a_3 &= (x_d Q_{crys}) / (M_p C_p) \\
 a_4 &= C_d / (M_p C_p) \\
 a_5 &= ((12 \times (1 - e_s^2 g_0)) / (d_p \sqrt{\pi} M_p C_p)) \times \rho_s a_p^2 \\
 a_6 &= (-3 \times K_{ps}) / (S_p M_p C_p)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Коефіцієнти рівняння 2.2:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \Theta_{d0} / M_d \\
 b_2 &= M_p / (M_{p0} M_d) \\
 b_3 &= (b_d e_{ps}) / (M_d C_d) \\
 b_4 &= (a_d S_d) / (M_d C_d)
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Коефіцієнти рівняння 2.3:

$$\begin{aligned}
 c_1 &= (C_{a0} \Theta_{a0}) / (M_a C_a) \\
 c_2 &= 1 / M_a \\
 c_3 &= (a_p S_p) / (M_a C_a) \\
 c_4 &= (a_d S_d) / (M_a C_a)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$



Коефіцієнти температур частинок, крапель та теплоносія:

$$\begin{aligned} x_1 &= \Theta_p \\ x_2 &= \Theta_d \\ x_3 &= \Theta_a \end{aligned} \quad (3.7)$$

Коефіцієнти витрат крапель та теплоносія:

$$\begin{aligned} u_1 &= G_a \\ u_2 &= G_d \end{aligned} \quad (3.8)$$

Підставивши (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) та (3.8) в систему диференціальних рівнянь трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_1(x_3 - x_1) - a_2 \frac{x_2}{x_1} + a_3 u_2 + a_4 u_2 (x_2 - x_1) - a_5 x_1^{1.5} - a_6 x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = b_1 u_2 - b_2 u_2 (x_2 - x_1) + b_3 \frac{x_2}{x_1} + b_4 (x_3 - x_2) \\ \frac{dx_3}{dt} = c_1 u_1 - c_2 u_1 x_3 - c_3 (x_3 - x_1) - c_4 (x_3 - x_2) \end{cases} \quad (3.9)$$

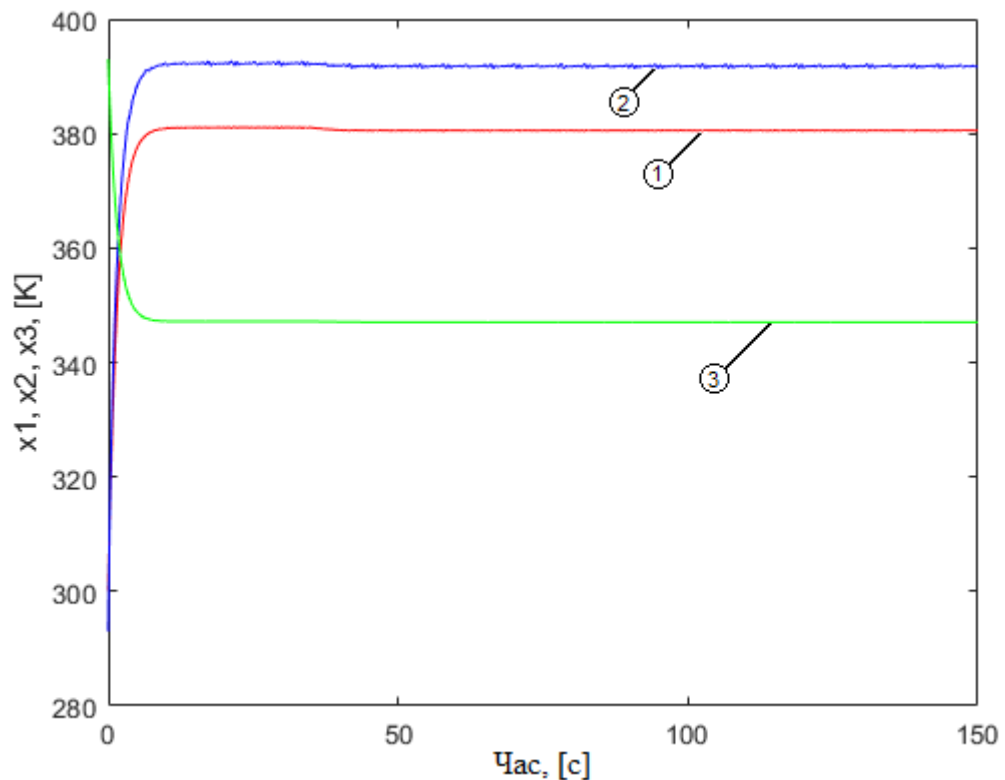


Рис. 3.4. Перехідна характеристика трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі (1 –  $x_1$ , 2 –  $x_2$ , 3 –  $x_3$ )

Поведінка температур в отриманому графіку повністю збігається з показниками температур звичайного обрахунку трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Тепер зі скороченого запису рівнянь можна отримати перхідні характеристики трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі у варіаціях (рис. 3.5).

Обрахунок трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі у варіаціях має важливе значення для дослідження та аналізу даного процесу, оскільки він дозволяє оцінити поведінку при різних умовах і параметрах. Це особливо корисно, коли процес має декілька змінних, які можуть впливати на кінцевий результат.

Завдяки обрахунку трьохфазної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі у варіаціях можна також визначити чутливість до змін параметрів, виявити потенційні точки нестабільності або критичні зони, де навіть невеликі зміни можуть призвести до суттєвих відхилень у роботі. Це дозволяє краще зрозуміти динаміку і приймати більш обґрунтовані рішення при її проектуванні чи управлінні. Якщо брати до уваги процес гранулювання у псевдозрідженому шарі, то це допомагає передбачити можливі наслідки різних варіантів управління, знайти баланс між витратами і продуктивністю, а також мінімізувати ризики виникнення хаотичних та небажаних станів.

$$\begin{cases} \frac{d\delta x_1}{dt} = (-a_1 - a_4 u_2 - a_6)\delta x_1 + (a_4 u_2)\delta x_2 + (a_1)\delta x_3 \\ \frac{d\delta x_2}{dt} = (b_2 u_2)\delta x_1 + (-b_2 u_2 - b_4)\delta x_2 + (b_4)\delta x_3 \\ \frac{d\delta x_3}{dt} = (c_3)\delta x_1 + (c_4)\delta x_2 + (-c_2 u_1 - c_3 - c_4)\delta x_3 \end{cases} \quad (3.10)$$

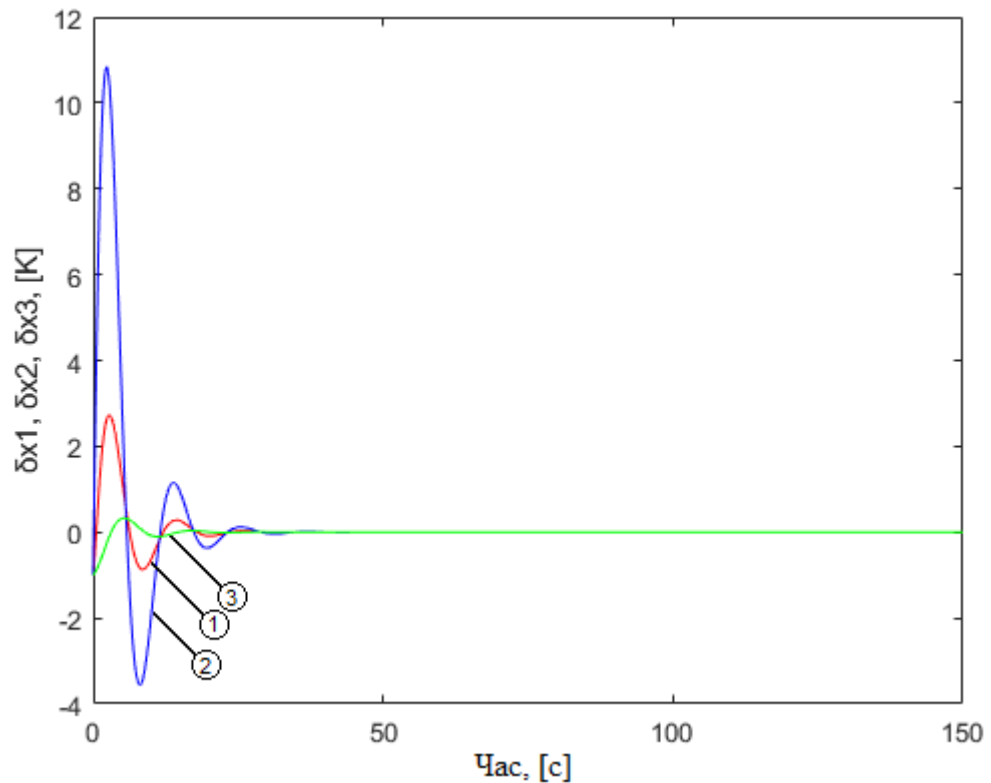


Рис. 3.5. Перехідна характеристика моделі у варіаціях (1 –  $\delta x_1$ , 2 –  $\delta x_2$ , 3 –  $\delta x_3$ )

### **Розрахунок системи управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром**

Критерій якості визначає показник, за яким можна порівняти різні можливі варіанти розв’язку. В технологічних процесах це може бути зниження собівартості продукції чи навпаки максимізація ефективності. Тобто задача критерію якості базується на досить простому принципі – мінімізація негативних показників або максимізація позитивних показників.

У випадку даної роботи мова йде про зменшення витрат ресурсів для досягнення кінцевого продукту, тобто мінімізацію критерію якості. В такому випадку наближення критерію якості до мінімуму означатиме, що система управління працює з найбільшою ефективністю.

На основі варіації параметру  $x_1$  можемо обрахувати критерій якості, який повинен прямувати до мінімуму:

$$I = -\delta x_1(t_f) \rightarrow \min \quad (3.11)$$

Далі можемо обрахувати Гамільтоніан, який описує загальну енергію, що складається з кінетичної та потенційної енергії. Це є важливою частиною аналітичної механіки і дозволяє досліджувати динаміку на основі принципу максимуму енергії. Він може бути використаний для аналізу поведінки процесу в області хаотичних режимів.

Завдяки його використанню можна краще зрозуміти, як різні енергетичні стани впливають на хаотичні процеси. Він дозволяє визначити критичні точки, де процес переходить від стабільного стану до хаотичного, та знайти способи впливу на ці точки для повернення процесу до контрольованого стану.

$$\begin{aligned}
 H = & \lambda_1((-a_1 - a_4 u_2 - a_6)\delta x_1 + (a_4 u_2)\delta x_2 + (a_1)\delta x_3) + \\
 & + \lambda_2((b_2 u_2)\delta x_1 + (-b_2 u_2 - b_4)\delta x_2 + (b_4)\delta x_3) + \\
 & + \lambda_3((c_3)\delta x_1 + (c_4)\delta x_2 + (-c_2 u_1 - c_3 - c_4)\delta x_3) - \frac{d\delta x_1(t_f)}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Умови оптимальності визначають критерії, які повинні бути виконані для того, щоб процес знаходився в оптимальному стані, тобто такому, при якому досягнеться максимум цільової функції. Оптимізація процесу управління залежить від поставленої задачі та обмежень. Для динамічних процесів, які змінюються в часі, оптимальність може розглядатися в контексті управління процесом, що передбачає максимізацію та мінімізацію витрат на певному інтервалі часу.

Принцип максимуму Понтрягіна використовується для знаходження оптимальних траєкторій у процесах з управлінням. Він заснований на твердженні, що оптимальна траєкторія повинна максимізувати Гамільтоніан на кожному етапі. Також застосовується лінійне-квадратичне управління (LQR) для процесів з квадратичною функцією витрат і лінійними диференціальними рівняннями руху. Система оптимального управління визначає контрольні дії, які максимізувати цільову функцію.

Маючи Гамільтоніан (3.12) можна розрахувати умови оптимальності:

$$\lambda_1' = -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_1)} = -\lambda_1(-a_1 - a_4 u_2 - a_6) - \lambda_2(b_2 u_2) - \lambda_3 c_3 - \frac{d\delta x_1(t_f)}{dt} \tag{3.13}$$

$$\lambda_2' = -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_2)} = -\lambda_1(a_4 u_2) - \lambda_2(-b_2 u_2 - b_4) - \lambda_3 c_4 \tag{3.14}$$

$$\lambda_3' = -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_3)} = -\lambda_1 a_1 - \lambda_2 b_4 - \lambda_3(-c_2 u_1 - c_3 - c_4) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_1} = -\lambda_3 c_2 \delta x_3 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_2} = -\lambda_1 a_1 \delta x_1 + \lambda_1 a_1 \delta x_2 + \lambda_2 b_2 \delta x_1 - \lambda_2 b_2 \delta x_2 \quad (3.17)$$

Якщо проаналізувати схему процесу виготовлення гранульованих мінеральних добрив (рис. 1.2), то система управління має вплив як на витрати теплоносія, так і на витрати розчину. Відповідно управління процесом гранулювання може відбуватися в трьох можливих варіантах – управління витратами теплоносія, розчину та одночасне управління витратами теплоносія і розчину.

В якості параметра, який впливатиме на управління трьохфазною математичною моделлю процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі обрані витрати теплоносія –  $u_1$ . Це зумовлено сильною реакцією на зміну температури теплоносія і завдяки цьому можна збільшувати її коливання шляхом постійної зміни витрат теплоносія. Також для нагріву теплоносія використовується дорогий енергоресурс – газ. Тому регулярне зменшення витрат теплоносія також дозволить і зменшити витрати газу, тобто зробити процес виготовлення гранульованих мінеральних добрив дешевшим. Тому беручи за основу похідну функції Гамільтона параметра  $u_1$  можна перейти до розрахунку управління:

$$\Delta u_1 = -\gamma \cdot \text{sign}(-\lambda_3 c_2 \delta x_3) \quad (3.18)$$

Завдяки цьому стає можливим збільшити хаотичність, контролюючи рівень витрат теплоносія. Розв'язавши рівняння (3.16) можна графічно представити зміну витрат теплоносія:

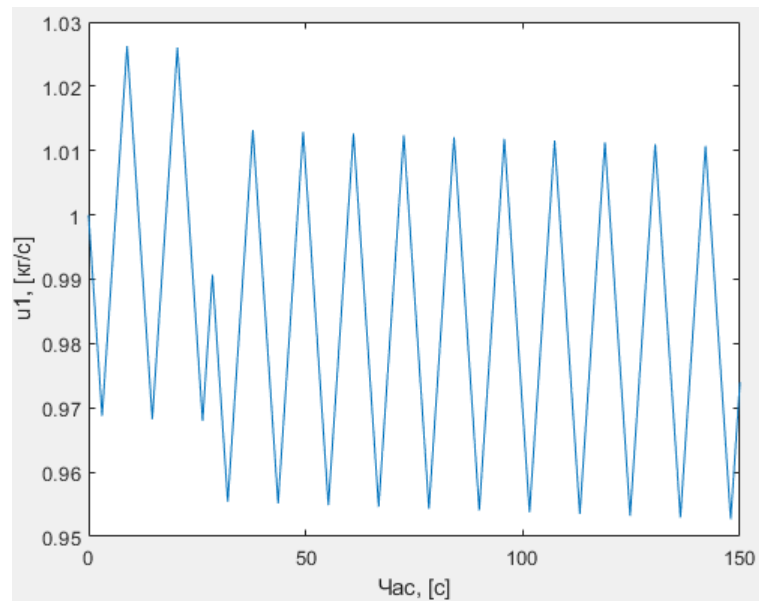


Рис. 3.6. Зміна витрат теплоносія

Підставивши змінне управління витратами теплоносія у математичну модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі можна отримати новий перехідний процес:

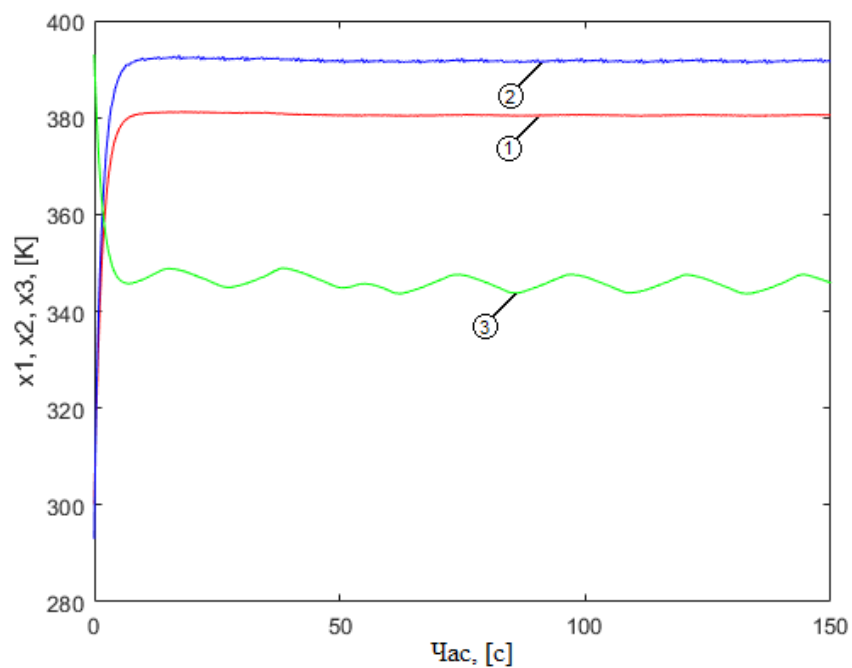


Рис. 3.7. Перехідна характеристика процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з управлінням витратами теплоносія (1 –  $x_1$ , 2 –  $x_2$ , 3 –  $x_3$ )

В результаті заміни статичних витрат теплоносія на змінне управління витратами теплоносія ми отримали збільшення хаосу, яке виражається збільшеними коливаннями температур теплоносія, крапель та частинок. Таким чином завдяки управлінню витратами теплоносія ми можемо збільшити рівень перемішування частинок під час процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та інтенсифікувати тепло- та масообмін.

Також можливо обчислити критерій якості використовуючи формулу (3.11). Отримаємо результат:

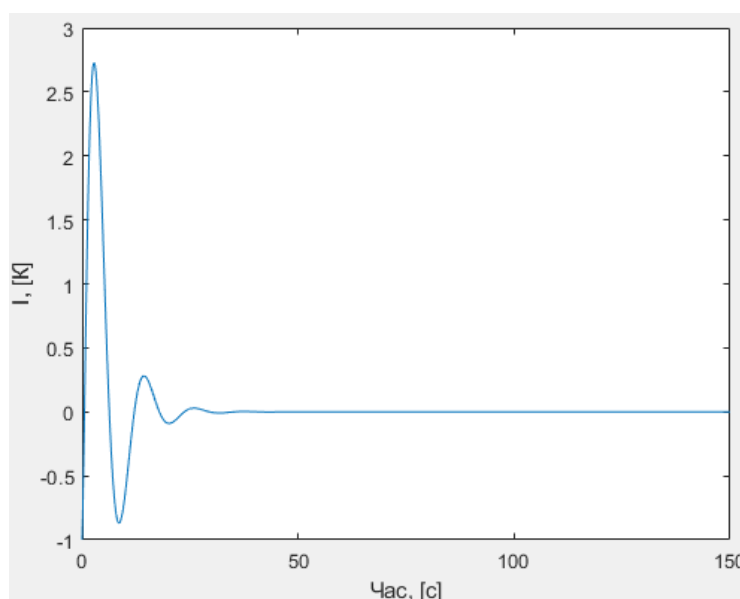


Рис. 3.8. Критерій якості

Протягом всього процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі критерій якості прямує до мінімуму та присутні згасаючі коливання протягом всього процесу. Це пов'язано з тим, що процес гранулювання у псевдозрідженому шарі знаходиться в постійному детермінованому хаосі, що спричиняє коливання.

### 3.3. Системи управління з різними регуляторами процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі

Сучасне математичне моделювання, що використовує програмні засоби, активно розвивається як перспективний напрямок, який інтегрує математику та

інформатику. Одним із провідних інструментів у цій галузі є MATLAB. Завдяки матричній орієнтації та підтримці додаткового пакета Simulink ця система здобула значну популярність. MATLAB і Simulink пропонують зручні та ефективні засоби для моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем, включаючи візуальне та об'єктно-орієнтоване програмування. Поєднання цих двох платформ забезпечує доступ до широкого спектра пакетів прикладних програм.

Для визначення передавальної функції моделі було використано пакет System Identification у MATLAB. Цей інструмент забезпечує потужний функціонал для побудови математичних моделей лінійних динамічних систем на основі аналізу вхідних і вихідних даних. Завдяки наявності інтуїтивного графічного інтерфейсу, користувач може легко впорядковувати дані та налаштовувати параметри моделювання для отримання бажаних результатів.

Однією з важливих переваг System Identification Toolbox (SIT) є його багатий набір інструментів. Він дозволяє виконувати попередню обробку даних, включаючи фільтрацію сигналів, видалення трендів і зсувів. Також є можливість вибору конкретних діапазонів даних для більш детального аналізу. Інтегровані методи авторегресії сприяють створенню високоточного математичного опису системи.

Пакет підтримує аналіз відгуків у часовій та частотній областях, надаючи можливість візуалізації ключових характеристик системи, таких як нулі та полюси передавальної функції. Крім того, у процесі тестування моделей SIT забезпечує зручні інструменти для оцінки невідповідностей і визначення оптимальних параметрів.

Гнучкість та відкритість архітектури пакета роблять його універсальним інструментом. Завдяки можливості створення спеціалізованих алгоритмів для ідентифікації, System Identification Toolbox широко використовується в наукових дослідженнях і промислових застосуваннях для вирішення найрізноманітніших задач.

Сьогодні більшість об'єктів управління оснащені мікропроцесорними системами, які забезпечують збір інформації про стан об'єкта, її обробку за



заданими алгоритмами та довготривале зберігання. Ці дані дозволяють аналізувати технологічний процес, виявляти порушення та їхні причини, а також за потреби вносити корективи до управління. Крім того, отримана інформація може використовуватись для визначення динамічних характеристик об'єкта і системи управління, тобто для проведення ідентифікації.

Для створення систем управління обраний програмний пакет MATLAB. Для цього спочатку обрахована передавальна функція процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Передавальна функція – це математична модель, яка використовується для опису динаміки, яка для управління визначає відповідь процесу на вхідний сигнал в часовій області. Вона являє собою відношення між перетвореними просторовими змінами вхідного та вихідного сигналів, і може бути представлена у вигляді дробової раціональної функції, яка наводить коефіцієнти.

Для обрахунку передавальної функції використаний модуль MATLAB System Identification (рис. 3.9), з якого отримана передавальна функція (3.19):

$$W(s) = \frac{0.5422 \cdot s + 1.514}{s^3 + 16.28 \cdot s^2 + 11.99 \cdot s + 1.563} \quad (3.19)$$

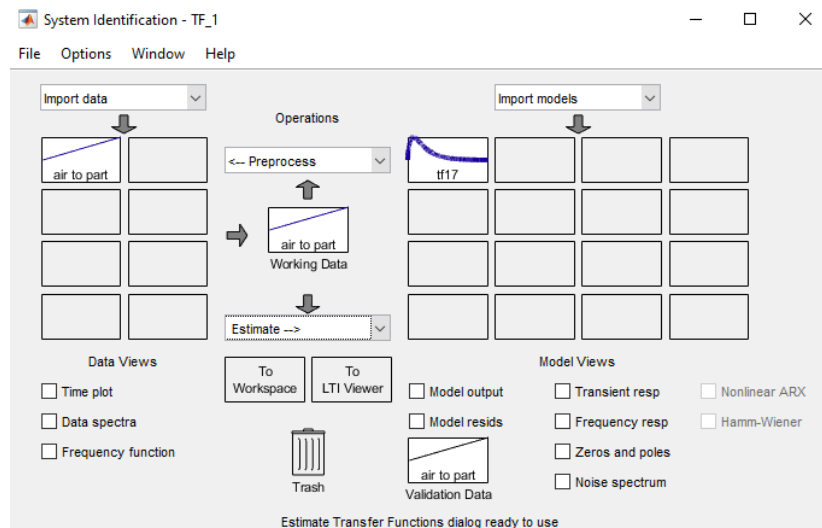


Рис. 3.9. Інтерфейс модулю MATLAB System Identification

На вхід подані показники зміни температури теплоносія, на вихід – зміна температури частинок (рис. 3.10), оскільки від зміни температури теплоносія ми очікуємо зміну температури частинок. Отримана передавальна функція збігається з показниками математичної моделі процесу на 97.27%.

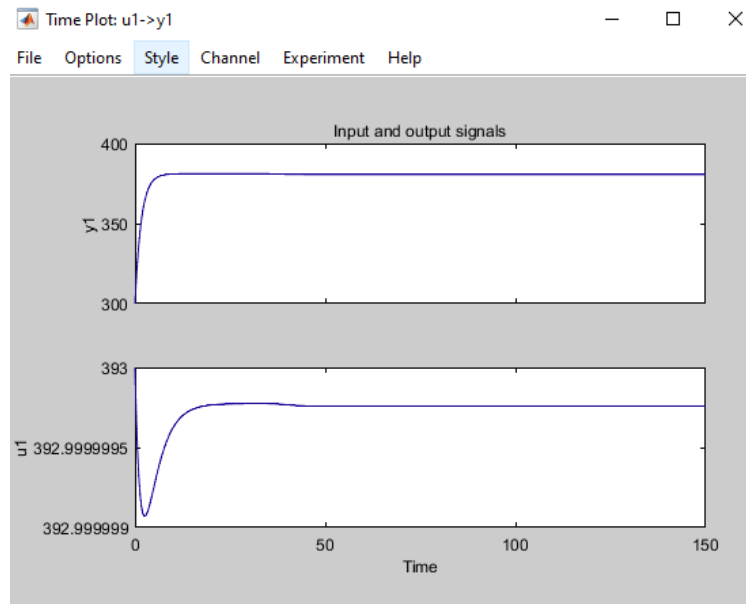


Рис. 3.10. Вхідні та вихідні дані

За допомогою отриманої передавальної функції знайдено матриці моделі, що характеризують об'єкт управління:

$$A = \begin{bmatrix} -16.2777 & -2.9980 & -0.7815 \\ 4.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5000 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$C = [0 \quad 0.1355 \quad 0.7572] \quad (3.22)$$

$$D = [0] \quad (3.23)$$

### Дослідження спостережуваності та керованості

Перед початком проектування систем управління на базі створеної передавальної функції потрібно дослідити її керованість та спостережуваність. Керованість характеризує можливість переведення керованого процесу з початкового в заданий стан за допомогою керування. Процес вважається керованою, якщо існує таке керування  $u(t)$ , що забезпечує переведення процесу з довільного початкового стану  $x_0$  в довільний заданий стан  $x_d$  протягом скінченного

часу. Дане визначення керованості сформульовано Рудольфом Калманом на основі лінійної стаціонарного процесу, яка описується за допомогою рівняння:

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) \quad (3.24)$$

де  $A$  – матриця процесу (3.20) розмірністю  $n \times n$  ( $n$  – кількість параметрів стану та кількість незалежних рівнянь математичної моделі);  $B$  – матриця входу (3.21) розмірністю  $n \times m$  ( $m$  – кількість керувань);  $X(t)$  – вектор змінних стану розмірністю  $n$ ;  $U(t)$  – вектор зовнішніх дій розмірністю  $n$ .

Також рівняння (3.24) доповнюється рівнянням зв'язку між вектором змінних стану  $X(t)$  та вектором параметрів процесу, що вимірюються,  $Y(t)$ :

$$Y(t) = C \cdot X(t) \quad (3.25)$$

де  $C$  – матриця виходу (3.22) розмірністю  $r \times n$  ( $r$  – кількість параметрів процесу).

Процес називається цілком або повністю керованою, якщо для будь-яких моментів часу  $t_0$  і  $t_1$ , де  $t_1 > t_0$  і для будь-яких заданих станів  $X_0$  і  $X_1$  існує керування  $U(t)$  ( $t_0 < t < t_1$ ), що переводить процес із початкового стану  $X(t_0) = X_0$  в кінцевий  $X(t_1) = X_1$ .

Умови повної керованості дає теорема Калмана – лінійна  $n$  – вимірна система, що описується рівнянням (3.24), є повністю керованою тоді і тільки тоді, коли блочна матриця:

$$K = [B \mid A \cdot B \mid A^2 \cdot B \mid \dots \mid A^{n-1} \cdot B] \quad (3.26)$$

розмірності  $n \times nt$  має ранг, що дорівнює  $n$ :

$$\text{rank } K = n \quad (3.27)$$

Ранг матриці дорівнює найвищому порядку мінорів матриці, що не дорівнюють нулю.  $K$  – матриця керованості, вона складається зі стовпців матриці входу  $B$  та добутків матриць процесу  $A$  та входу  $B$ :

$$B; A \cdot B; A^2 \cdot B; \dots; A^{n-1} \cdot B \quad (3.28)$$

Якщо пакетом MATLAB, то існують дві вбудовані функції для перевірки спостережуваності та керованості динамічних процесів, які описані у вигляді матричних рівнянь. Використання даних функцій дасть чітко зрозуміти чи процес можливо повністю керувати та спостерігати.

Для початку визначимо скільки станів присутні в процесі гранулювання у псевдозрідженому стані. Для цього зайдемо в інформацію передавальної функції в модулі MATLAB System Identification. В пункті «Parameterization», підпункті «Number of poles» містить показник кількості станів (рис. 3.11).

```
Name: tf17
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
  Number of poles: 3   Number of zeros: 1
  Number of free coefficients: 5
```

Рис. 3.11. Параметри передавальної функції

Функція  $ctrb(A, B)$  обчислює матрицю керованості (3.26) для заданих матриць  $A$  та  $B$ . Процес є керованим, якщо ранг матриці керованості рівний кількості станів  $n$ . Це означає, що вектори станів можуть бути досягнуті за допомогою вхідних сигналів  $U(t)$ .

Процес називається цілком або повністю спостережуваною, якщо існує таке  $t_1(t < t_1 < \infty)$ , що за відомою інформацією про вихід  $Y(\tau)$  і вхід  $U(\tau)$  процесу для інтервалу  $t \leq \tau \leq t_1$  можна визначити всі координати вектору змінних стану  $X(t)$ . При синтезі процесу зі зворотними зв'язками, вона визначається як функція змінних стану, в якій піддаються вимірюванню вектор вихідних величин  $Y(t)$  і вектор керівної дії  $U(t)$ .

Стаціонарний процес, що описується рівняннями (3.24) та (3.25), вважається повністю спостережуваною, якщо ранг матриці спостережуваності:

$$H = [C^T \mid A^T C^T \mid \dots \mid (A^T)^{n-1} C^T] \quad (3.29)$$

розмірністю  $n \times nm$  дорівнює  $n$ :

$$\text{rank } H = n \quad (3.30)$$

Функція  $obsv(A, C)$  обчислює матрицю спостережуваності (3.29) для заданих матриць  $A$  та  $C$ . По аналогії з керованістю – процес є спостережуваним, якщо ранг матриці спостережуваності дорівнює кількості станів  $n$ . І в такому випадку можна стверджувати, що всі стани можуть бути визначені через вихідні сигнали  $Y(t)$ .

Застосування даних функцій в MATLAB до матриць створеної передавальної функції  $A$  (3.20),  $B$  (3.21) та  $C$  (3.22) дозволило впевнитися, що даний процес є спостережуваним та керованим, оскільки ранги матриць спостережуваності та керованості співпадають з кількістю станів  $n$ .

```

1 sys = ss(tf17);
2 kerov = rank(ctrb(sys.A,sys.B))
3 spost = rank(observ(sys.A,sys.C))
4
Command Window
>> spot_kerov

kerov =

    3

spost =

    3

```

Рис. 3.12. Обрахунок керованості та спостережуваності

Отже, дана передавальна функція створеної математичної моделі процесу гранулювання у псевдозріженому стані є придатною для побудови систем управління на її основі.

Системи управління є важливою складовою в сучасних інформаційних системах, які забезпечують задані параметри в різних технологічних процесах. Різні регулятори, такі як ПІД (пропорційний-інтегральний-диференціальний регулятор), LQR (лінійний квадратичний регулятор), Fuzzy Logic (регулятор на основі нечіткої логіки) та MPC (регулятор на основі прогнозуючої моделі), використовують різні методики для досягнення бажаних результатів у управлінні. ПІД-регулятор використовує комбінацію пропорційного, інтегрального та диференціального параметрів для зниження помилки управління. LQR-регулятор мінімізує квадратичну функцію витрат, забезпечуючи оптимальний вихід. Fuzzy Logic регулятор оперує з нечіткими змінними та правилами, адаптуючись до змінних умов. MPC-регулятор використовує прогнозуючу модель для управління в

майбутньому. Кожен з цих регуляторів має свої переваги та обмеження, і їх вибір залежить від конкретної задачі та умов застосування.

**Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з LQR-регулятором.**

LQR (Linear Quadratic Regulator) – це оптимальний лінійний квадратичний регулятор, який мінімізує квадратичну функцію відхилення від заданого значення та зусилля управління. LQR забезпечує стабільне та оптимальне управління лінійними процесами. Цей метод базується на математичній моделі процесу та використовує матриці зважування для налаштування регулятора. Кожній змінній стану та управлінню присвоюється ваговий коефіцієнт, який відображає її важливість у контексті досягнення бажаного управління.

Для безперервних систем описуваних в просторі станів маємо:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.31)$$

де  $x(t)$  – вектор станів системи (розмірність  $n \times 1$ ),  $u(t)$  – вектор управління (розмірність  $m \times 1$ ),  $A$  – матриця системи (розмірність  $n \times n$ ),  $B$  – матриця управління (розмірність  $n \times m$ ).

Критерій якості:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (3.32)$$

де  $Q$  – симетрична позитивно визначена матриця розмірністю  $n \times n$ , яка визначає вагу для станів  $x(t)$ ,  $R$  – симетрична позитивно визначена матриця розмірністю  $m \times m$ , яка визначає вагу для зусиль управління  $u(t)$ ,  $x^T(t)Qx(t)$  – інтегральна квадратична похибка, яка відповідає за якість регулювання на інтервалі від нуля до нескінченності, якість може задаватися відповідною матрицею  $Q$ ,  $u^T(t)Ru(t)$  – характеризує енергію яка затрачена для регуляції, цей параметр задається одиничною матрицею  $R$ .

Керування, знайдене по LQR алгоритму повинно задовольняти критерій:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (3.33)$$

де  $K$  – це матриця зворотного зв'язку за станом, яка визначається як:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (3.34)$$

Матриця  $P$  знаходиться з рівняння Ріккаті:

$$AP + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (3.35)$$

де  $P$  – симетрична позитивно визначена матриця розмірністю  $n \times n$ .

Для синтезу LQR-регулятора потрібні матриці моделі  $A$ ,  $B$  та матриці при критерію якості  $Q$ ,  $R$ . Структурна схема системи управління з LQR-регулятором зображена на рис. 3.13.

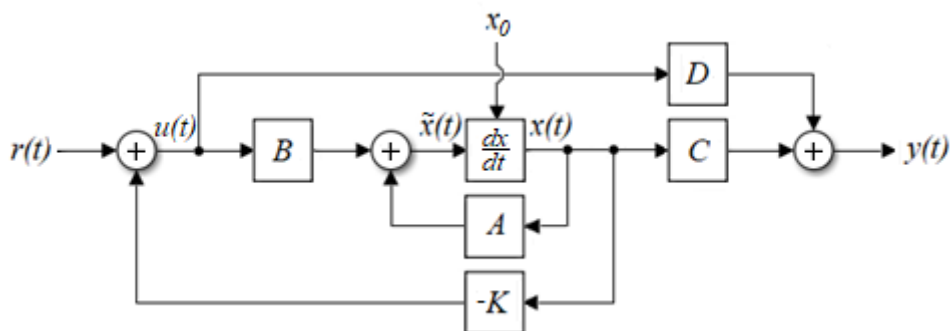


Рис. 3.13. Структурна схема системи управління з оптимальним LQR-регулятором ( $r(t)$  – вхід,  $u(t)$  – закон управління,  $\tilde{x}(t)$  – стан процесу,  $x_0$  – початковий стан процесу,  $x(t)$  – зміна стану процесу,  $y(t)$  – вихід,  $A, B, C, D$  – матриці простору,  $K$  – матриця зворотного зв'язку)

Отримавши передавальні матриці, ми можемо обрахувати роботу LQR-регулятора за допомогою вбудованих функцій математичного пакета MATLAB. Для цього використана функція  $lqr(A, B, Q, R, N)$ , за допомогою якої можливо обрахувати рішення рівняння Ріккаті, вектор коефіцієнтів та вектор коренів характеристичного полінома замкненої системи. Маючи ці параметри стає можливим отримати перехідну характеристику оптимального LQR-регулятора (рис. 3.14).

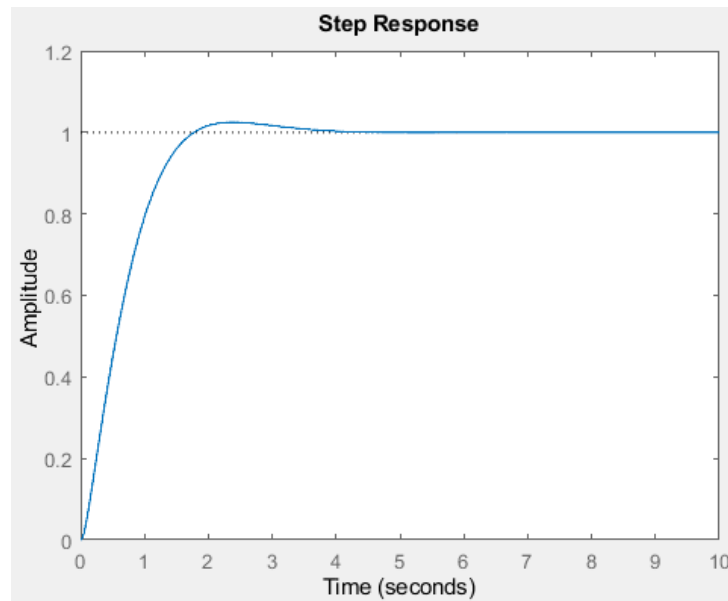


Рис. 3.14. Перехідна характеристика системи управління з оптимальним LQR-регулятором

### **Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з Fuzzy Logic-регулятором.**

Нечітка логіка (Fuzzy Logic) – це метод управління, який моделює нечіткість та неоднозначність в знаннях і приймає рішення на основі логічних правил в системах управління. Використовуючи лінгвістичні змінні та правила, регулятор на основі нечіткої логіки може працювати з нечіткими вхідними даними та приймати нечітке управління. Це дає йому здатність до адаптації до змінних умов і неоднозначних ситуацій. Він вирішує завдання на основі розмитих вхідних даних, забезпечуючи адаптивність до змін у вихідних умовах та спроможність приймати рішення навіть при обмежених або неповних даних. Використання регулятора з нечіткою логікою ефективно в умовах, коли дані або вимірювання не є абсолютно точними, а система повинна адаптуватися до різноманітних ситуацій. Цей метод дозволяє забезпечити гнучке та ефективне управління в нелінійних системах, оскільки розмитість та неоднозначність не є обмеженням в даному випадку. Структурна схема системи управління з нечіткою логікою зображена на рис. 3.15.



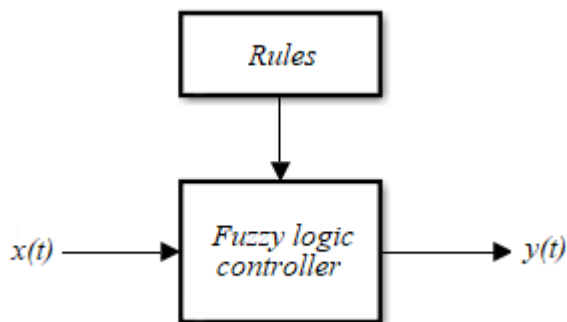


Рис. 3.15. Структура системи управління з нечіткою логікою

Управління на основі нечіткої логіки можна розділити на чотири ключових етапи: зведення до нечіткості (Fuzzification), оцінка правил (Rule Evaluation), агрегація (Aggregation) та зведення до чіткості (Defuzzification).

На етапі зведення до нечіткості чіткі входні значення перетворюються на нечіткі змінні з відповідними ступенями належності. Входні змінні містять відхилення від бажаного значення (помилку)  $e$  та зміну помилки  $\Delta e$ . Тобто, якщо  $e$  та  $\Delta e$  мають функції належності  $\mu_{x1}(e)$ ,  $\mu_{x2}(e)$  та  $\mu_{x3}(e)$  для значень температур частинок, крапель та теплоносія відповідно, то зведення до нечіткості може бути виражене як набір функцій належності для кожного входу:

$$\begin{aligned} \mu(e) &= \{\mu_{x1}(e), \mu_{x2}(e), \mu_{x3}(e)\} \\ \mu(\Delta e) &= \{\mu_{x1}(\Delta e), \mu_{x2}(\Delta e), \mu_{x3}(\Delta e)\} \end{aligned} \quad (3.36)$$

Правила визначають взаємозв'язок між нечіткими входніми значеннями  $e$  та  $\Delta e$ . Правила можна виразити математично як:

$$\text{Якщо } e \in A_i \text{ і } \Delta e \in B_i, \text{ то } u \in C_i \quad (3.37)$$

де  $A_i$ ,  $B_i$  та  $C_i$  – нечіткі множини, що відповідають різним умовам на помилку  $e$ , зміну помилки  $\Delta e$  і відповідну керуючу дію  $u$ .

Наступним кроком є визначення ступеню виконання кожного правила  $\alpha_i$ , який може визначатися по різному в залежності від методу нечіткої логіки, який використовується для управління. Наприклад може використовуватися метод множення (3.38) або метод мінімуму (3.39):

$$\alpha_i = \mu_{A_i}(e) \cdot \mu_{B_i}(\Delta e) \quad (3.38)$$

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_i}(\Delta e)) \quad (3.39)$$

Агрегація це етап, коли результати всіх правил об'єднуються для отримання однієї нечіткої множини для виходу. Нечітку множину виходу можна записати як:

$$u_f = \bigcup_i \alpha_i \cdot C_i \quad (3.40)$$

де  $\alpha_i$  – вагові коефіцієнти правил,  $C_i$  – виходи правил. Їх множення означає масштабування функції належності  $C_i$  значенням  $\alpha_i$ .

Останнім етапом є зведення до чіткості, тобто нечіткий вихід  $u_f$  перетворюється на чітке значення. Подібних методів існує кілька, найпоширенішим з них є метод центру ваги (Centroid), який обчислюється за формулою:

$$u = \frac{\int u_f \cdot u \, du}{\int u_f \, du} \quad (3.41)$$

Таким чином ми отримуємо чітку вихідну величину  $u$ . Даний керуючий сигнал обчислюється як комбінація значень, отриманих з різних правил.

Для реалізації алгоритму управління з нечіткою логікою використано інструмент Matlab Fuzzy Logic Designer (рис. 3.16). В редакторі системи використаний тип системи Mamdani Type 1, якому на вхід подаються показники зміни температури теплоносія, а на виході – показники зміни температури частинок. Отримана перехідна характеристика процесу на основі управління з нечіткою логікою (рис. 3.17).

**Create System from Data**

Name:

Input data:

Output data:

Clustering method:

**Clustering Options**

System type:

Number of clusters:

Exponent:

Maximum iterations:

Minimum improvement:

Distance metric:

Buttons: Help, OK, Cancel

Рис. 3.16. Налаштування інструмента Fuzzy Logic Designer

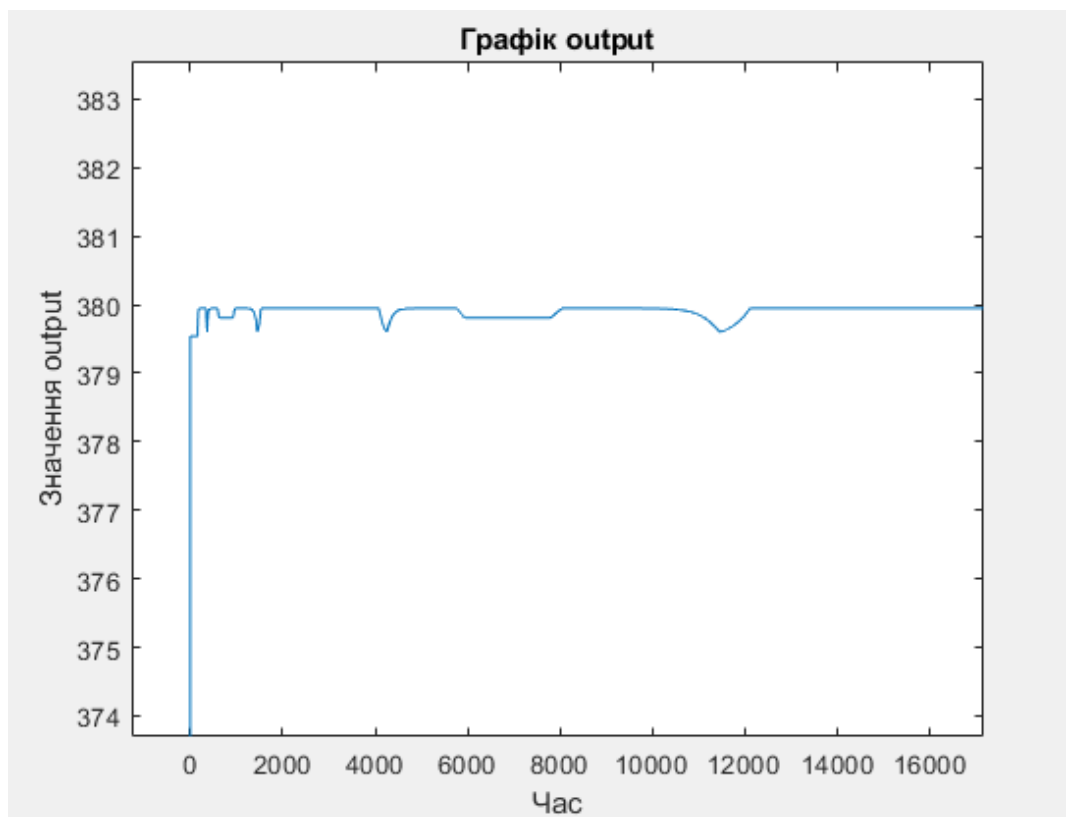


Рис. 3.17. Перехідна характеристика системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі з нечіткою логікою

### Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з ПІД-регулятором.

ПІД (Proportional-Integral-Derivative) – це класичний регулятор, який використовується для управління системами зворотного зв'язку, та є одним з найпоширеніших методів управління завдяки своїй ефективності та простоті у використанні. Він складається з трьох компонентів, які взаємодіють між собою для досягнення потрібної точності. Пропорційна частина реагує на поточне відхилення між поточним станом системи та заданим значенням, пропорційно збільшуючи величину управління при збільшенні відхилення. Інтегральна частина впроваджує корекцію на основі кумулятивної помилки, що дозволяє компенсувати дрібні постійні відхилення. Похідна частина допомагає регулятору реагувати на швидкі зміни відхилення, запобігаючи перерегулюванню та забезпечуючи плавне управління. Пропорційна частина регулятора реагує на поточну відхилення від заданого значення, інтегральна частина компенсує кумулятивну помилку, а похідна частина реагує на швидкі зміни відхилення. Структурна схема системи управління з ПІД-регулятором зображена на рис. 3.18.

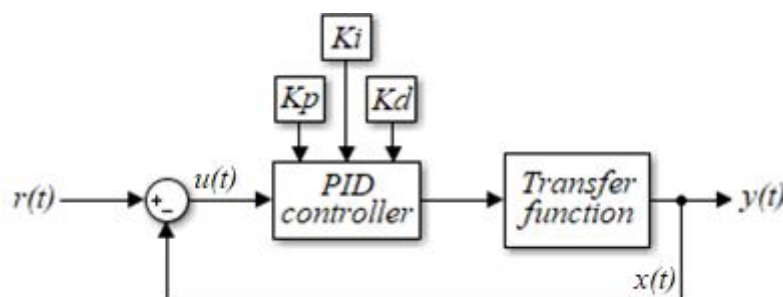


Рис. 3.18. Структурна схема системи управління з ПІД-регулятором

Для ПІД-регулятора передавальна функція визначається в просторі Лапласа визначається як:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \quad (3.42)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт пропорційної складової,  $K_i$  – коефіцієнт інтегральної складової,  $K_d$  – коефіцієнт диференціальної складової,  $s$  – оператор Лапласа.

В часовій області ПД-регулятор можна описати рівнянням керуючого сигналу  $u(t)$ :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.43)$$

де  $e(t)$  – помилка, яка визначається як різниця між бажаним та фактичним значенням,  $u(t)$  – вихідний керуючий сигнал.

Кожна складова (пропорційна, інтегральна та диференціальна) виконує свою роль. Пропорційна складова  $K_p \cdot e(t)$  забезпечує негайну реакцію на помилку. Також при самотійному використанні він лишає залишкову помилку. Чим більше значення помилки  $e(t)$ , тим більша корекція. Інтегральна складова  $K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$  забезпечує поступове зменшення помилки шляхом накопичення попередніх значень помилки. Ця складова допомагає усунути залишкову помилку пропорційної складової. Диференціальна складова  $K_d \frac{de(t)}{dt}$  забезпечує прогнозування майбутньої помилки, що допомагає згладити коливання системи.

Якщо система описується передавальною функцією  $H(s)$ , то загальна передавальна функція замкненої системи з ПД-регулятором описується як:

$$T(s) = \frac{G(s) \cdot H(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} \quad (3.44)$$

де  $T(s)$  – передавальна функція замкненої системи,  $G(s)$  – передавальна функція ПД-регулятора,  $H(s)$  – передавальна функція об'єкта керування.

ПД-регулятор реалізований за допомогою інструмента Matlab PID Tuner (рис. 3.19). Управління здійснене за допомогою зміни температури теплоносія, завдяки чому можливо контролювати температуру частинок. Отримана перехідна характеристика процесу на основі управління з нечіткою логікою (рис. 3.20).

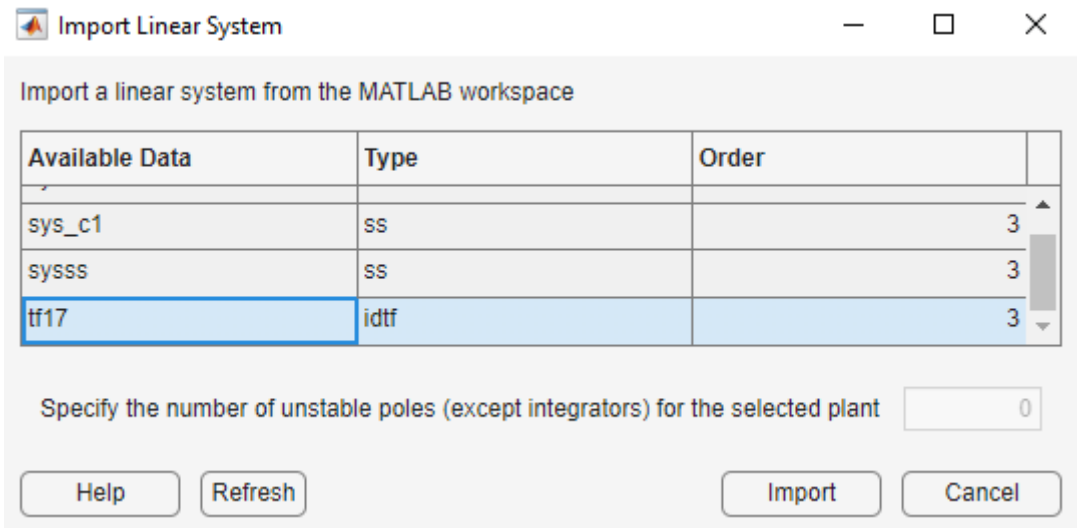


Рис. 3.19. Налаштування інструмента PID Tuner

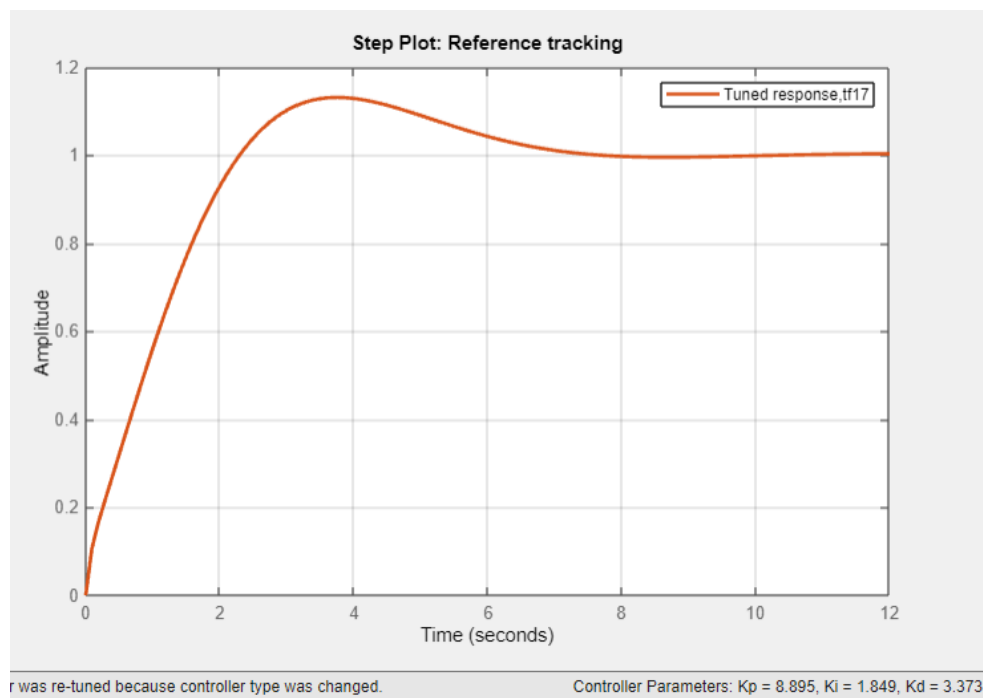


Рис. 3.20. Перехідна характеристика системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі з ПІД-регулятором

**Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором.**

MPC (Model Predictive Control) – регулятор базується на математичній моделі системи і передбачає її поведінку в майбутньому для прийняття оптимальних рішень в реальному часі. Його основна ідея полягає в тому, щоб здійснювати

управління на основі передбачень, а не тільки реакцій на поточні відхилення. Він враховує різні обмеження системи, такі як величини управління, фізичні обмеження системи та інші фактори, і здатний оптимізувати багатоцільову функцію, таку як мінімізація помилки регулювання і збереження енергії. MPC широко використовується в складних системах управління, таких як хімічні процеси, електроприводи і автомобільні системи. Структурна схема системи управління з MPC-регулятором зображена на рис. 3.21.

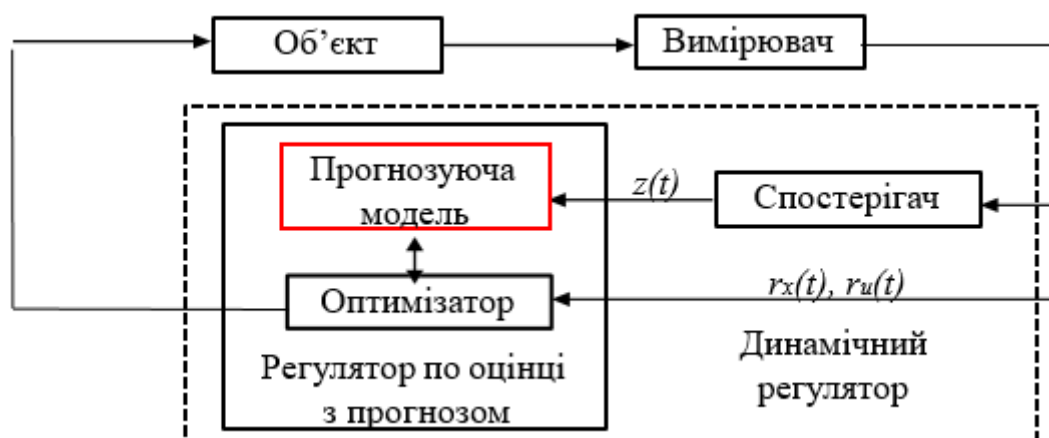


Рис. 3.21. Структурна схема системи управління з MPC-регулятором

Основою сучасних принципів удосконаленого управління технологічними процесами є метод прогнозуючого управління на основі моделі (Model Predictive Control, MPC). Цей підхід виник у 60-х роках для керування складними процесами в нафтохімічній та енергетичній промисловості, де використання традиційних методів синтезу було малоефективним через високий рівень складності математичних моделей.

Суть методу полягає у використанні прогнозуючих моделей об'єктів управління, які дозволяють передбачити вплив майбутніх змін вхідних параметрів на вихідні регульовані змінні (рис. 3.22). У рамках MPC застосовуються динамічні моделі процесу для прогнозування та оптимізації управління шляхом мінімізації цільової функції. Ця функція враховує поведінку системи в майбутньому часовому інтервалі, що дозволяє вибрати оптимальне керування на основі чисельної оптимізації.

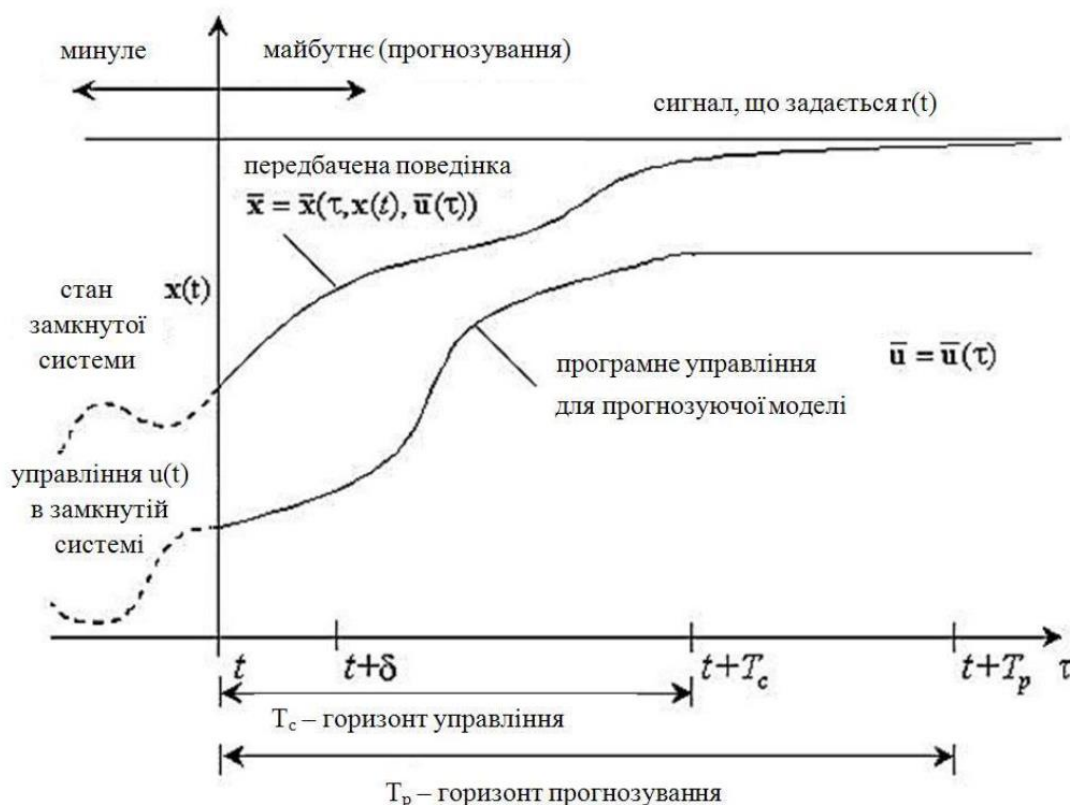


Рис. 3.22. Принцип роботи управління на основі прогнозуючої моделі

Головною перевагою MPC є спрощена базова структура зворотного зв'язку, яка забезпечує високу адаптивність. Цей підхід дозволяє ефективно керувати багатовимірними і багатозв'язними системами зі складною структурою, зокрема такими, що включають нелінійність. Крім того, MPC сприяє оптимізації процесів у режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі та регульовані змінні, а також дозволяє враховувати невизначеності у характеристиках об'єкта та збуреннях.

Алгоритм роботи MPC можна розділити на чотири основні етапи, які забезпечують ефективну реалізацію управління на основі прогнозуючої моделі:

1. Моделювання об'єкта управління:

В основі даного методу лежить математична модель об'єкта управління, яка описується лінійною системою, рівняння якої можна записати у вигляді:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (3.45)$$



де  $x_k$  – вектор станів на  $k$ -му кроці (розмірність  $n \times 1$ ),  $u_k$  – вектор управління (розмірність  $m \times 1$ ),  $A$  – матриця станів (розмірність  $n \times n$ ),  $B$  – матриця управління (розмірність  $n \times m$ ).

## 2. Мета управління:

Цільова функція мінімізується на горизонті прогнозу  $N_p$ :

$$J = \sum_{i=0}^{N_p} (x_i^T Q x_i + u_i^T R u_i) \quad (3.46)$$

де  $Q$  – матриця ваг для станів розмірність  $n \times n$ ,  $R$  – матриця ваг для керуючих дій розмірність  $m \times m$ .

## 3. Обмеження:

Враховуються фізичні обмеження системи:

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u_k \leq u_{\max} \\ x_{\min} &\leq x_k \leq x_{\max} \end{aligned} \quad (3.47)$$

## 4. Розрахунок оптимального управління:

У реальному часі виконується чисельна оптимізація для мінімізації функції  $J$ . Результатом є набір оптимальних керуючих дій  $u_0, u_1, \dots, u_{N_p-1}$ , але для керування використовується лише перший сигнал  $u_0$ :

$$u_0 = \arg \min_u J \quad (3.48)$$

## 5. Оновлення стану:

Після застосування  $u_0$  вимірюються нові значення станів, і процедура повертається на перший крок.

За аналогією з ПД-регулятором МРС-регулятор може працювати в контурі “один вхід - один вихід” (SISO). Згідно з наведеним вище алгоритмом, основними параметрами налаштування регулятора будуть:

$N_p$  – горизонт прогнозу – визначає, наскільки далеко в майбутнє модель прогнозує поведінку системи;

$N_u$  – обрій управління – кількість кроків, протягом яких оптимізуються керуючі дії;

$T_s$  – час дискретизації – інтервал між обчисленнями нового управління.

Кожен параметр  $N_p$ ,  $N_c$ ,  $T_i$  впливає на якість регулювання, швидкість розрахунку оптимальних управлінь і чутливість керуючої системи. Критеріями вибору є мінімізація квадратичної помилки та швидкість розрахунку пошуку оптимального варіанта управління. За інших рівних умов перевагу необхідно віддавати комбінації параметрів з найменшим часом перерахунку алгоритму.

Основною перевагою MPC-регулятора є те, що цей підхід дозволяє управляти багатомірними системами зі складними динамічними характеристиками, враховуючи обмеження та оптимізуючи процес у реальному часі. Наприклад, у системах, де присутні нелінійності, використовуються нелінійні моделі об'єкта управління, які в загальному вигляді записуються як:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) \quad (3.49)$$

де  $f(x_k, u_k)$  – нелінійна функція, що описує динаміку системи.

Крім того, у деяких задачах може застосовуватися стохастичний підхід для врахування невизначеностей:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + \omega_k \quad (3.50)$$

де  $\omega_k$  – випадкові збурення.

MPC-регулятор реалізований за допомогою інструмента Matlab MPC Designer (рис. 3.23). Система управління створена за допомогою раніше створеної передавальної функції та отримана перехідна характеристика системи управління (рис. 3.24).

Define MPC Structure By Importing

MPC Structure

Select a plant model or an MPC controller from MATLAB Workspace:

	Select	Name	Type	Order	Inputs	Outputs
1	<input type="checkbox"/>	sys	ss	3	1	1
2	<input type="checkbox"/>	sys_c1	ss	3	1	1
3	<input type="checkbox"/>	sysss	ss	3	1	1
4	<input checked="" type="checkbox"/>	tf17	idtf	3	1	1

Inspect Selected System

Controller Sample Time

Specify MPC controller sample time: 1

Assign plant i/o channels to desired signal types:

Manipulated variable (MV) channel indices: 1

Measured disturbance (MD) channel indices:

Unmeasured disturbance (UD) channel indices:

Measured output (MO) channel indices: 1

Unmeasured output (UO) channel indices:

Help Refresh Import Cancel

Рис. 3.23. Налаштування інструмента MPC Designer

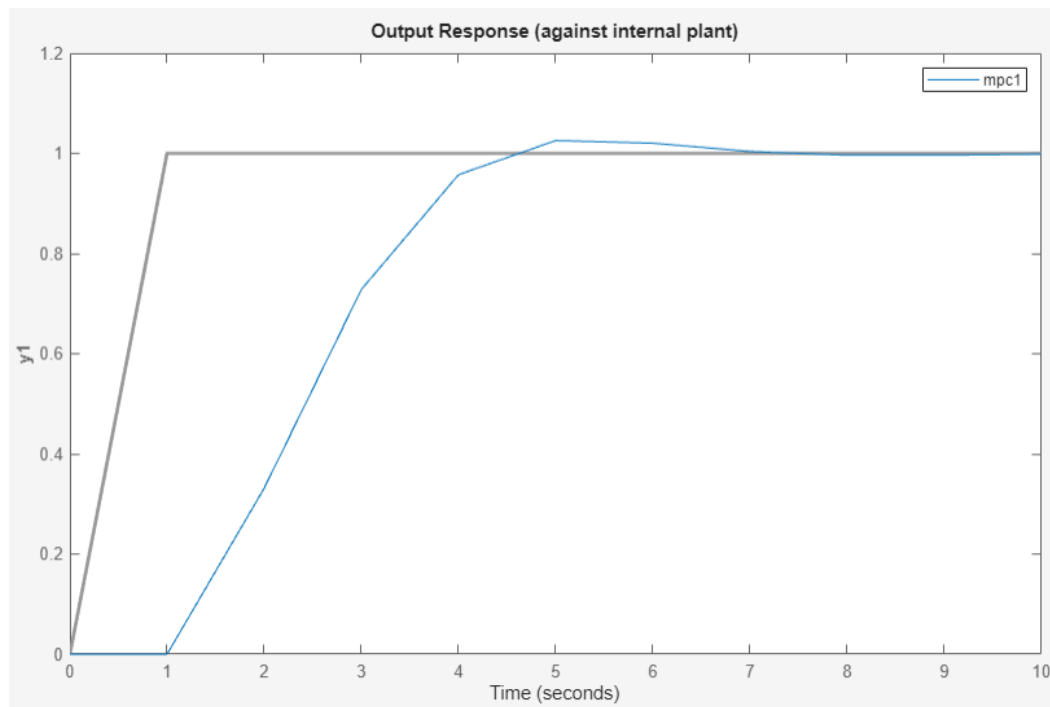


Рис. 3.24. Перехідна характеристика системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі з MPC-регулятором

Створення схеми, яка одночасно моделює роботу чотирьох регуляторів дозволяє краще оцінити ефективність та обрати оптимальну стратегію управління. Моделюючи всі оглянуті в даній роботі регулятори в одній схемі, можна візуально порівняти їх роботу в реальному часі, а саме можливо відстежити, який з регуляторів дає швидшу реакцію та менше відхилення.

Відтворивши всі наведені системи управління процесом гранулювання у псевдозрідженому шарі у пакеті Matlab Simulink (рис. 3.25) можна детальніше порівняти ефективність їх роботи у порівнянні з роботою системи без системи управління. Для розуміння ефективності системи управління вистачить лише перших 10 секунд моделювання, оскільки це дасть розуміння загальної швидкості стабілізації системи та її рівня перерегулювання (рис. 3.26).

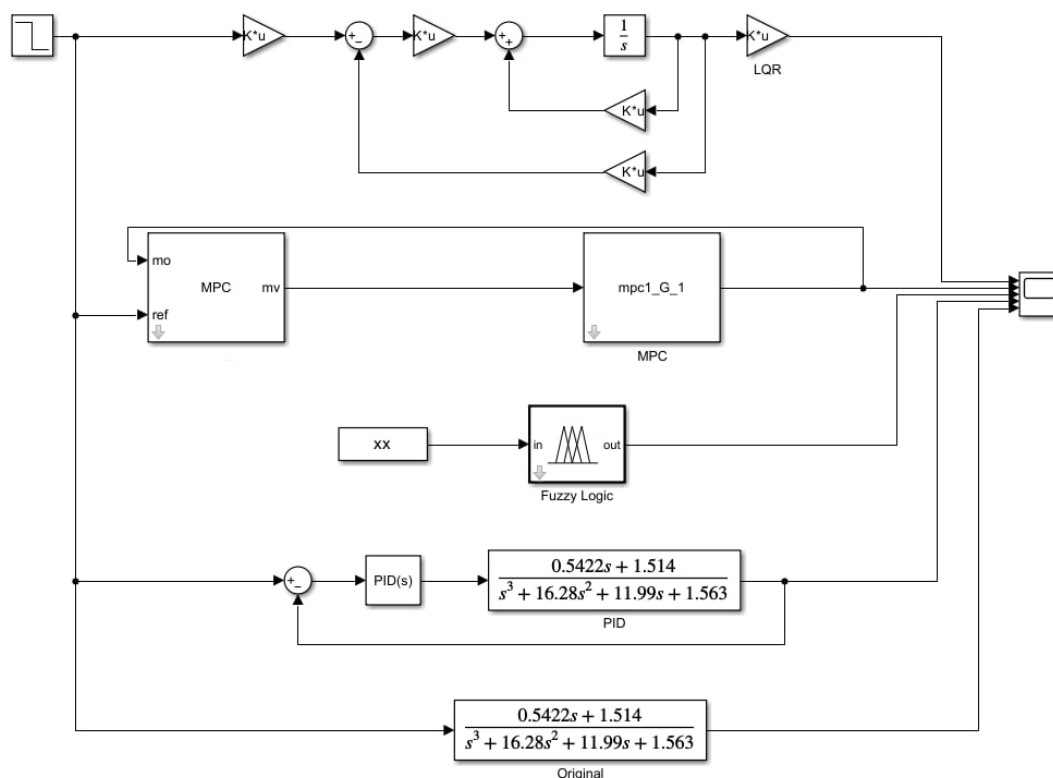


Рис. 3.25. Схема для порівняння систем управління з різними регуляторами

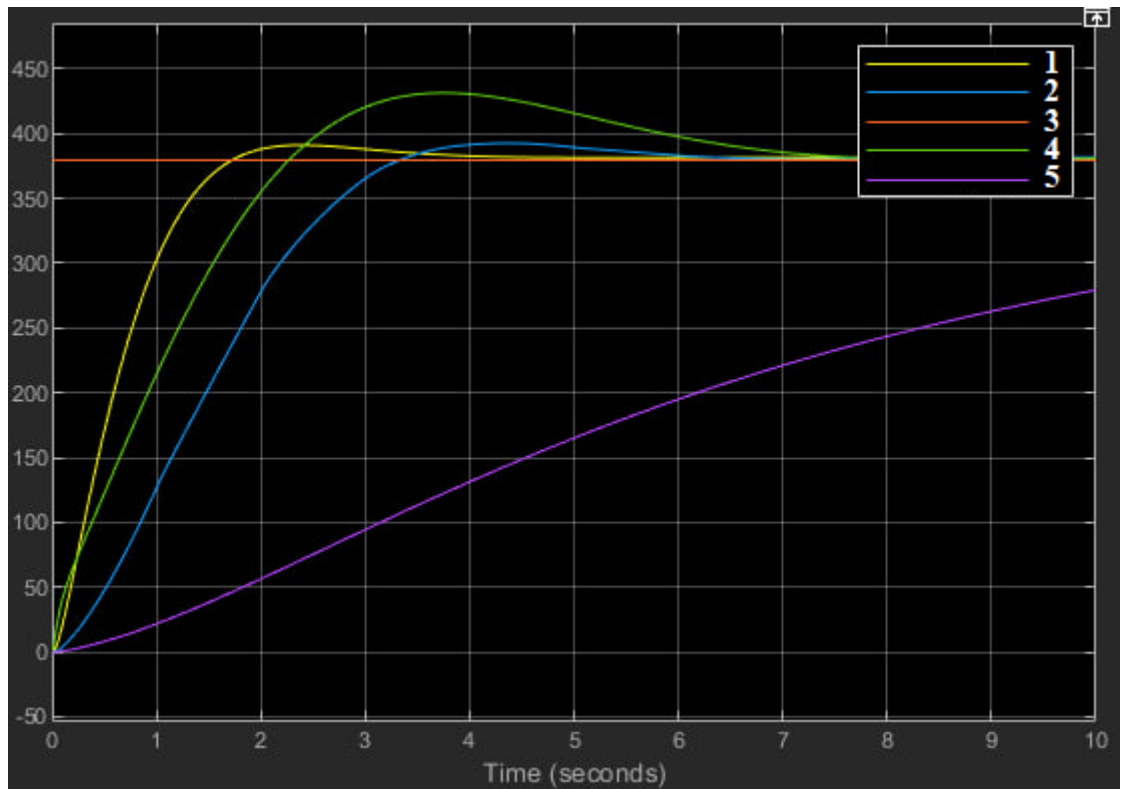


Рис. 3.26. Порівняння процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі без системи управління та з використанням систем управління з різними регуляторами (1 – з LQR-регулятором, 2 – з MPC-регулятором, 3 – з Fuzzy Logic-регулятором, 4 – з PID-регулятором, 5 – система без регулятора)

Проаналізувавши отримані перехідні характеристики систем управління з різними типами регуляторів обчислено час, за який система стабілізується, рівень перерегулювання та точність. Результати даних обрахунків наведені у таблиці 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1

Порівняння систем управління для систем управління з регуляторами для лінійними системами

Назва	Час перехідного процесу, [с]	Перерегулювання	Збіг
ПІД	12	13%	99.9%
LQR	7.5	2.5%	99.9%

Таблиця 3.2

Порівняння систем управління для систем управління з регуляторами для  
нелінійними системами

Назва	Час перехідного процесу, [с]	Перерегулювання	Збіг
MPC	10	3%	100%
Fuzzy Logic	12	0.2%	99.8%

### 3.4. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором

Аналізуючи модель керування виробництвом добрив, розглядаються масиви вхідних даних, які характеризують час гранулювання, і вихідні дані, що відображають значення функції розподілу. Після завантаження цих даних у середовище MATLAB необхідно викликати пакет System Identification Toolbox (SIT). Передавальна функція моделі визначається як неперервна і другого порядку, що є найреалістичнішим припущенням для опису процесу.

На рис. 3.27 зображено графік передавальної функції, який демонструє прогнозовану характеристику блоку на основі моделі. З аналізу видно, що передавальна функція є стійкою, що робить її придатною для регулювання системи керування виробництвом мінеральних добрив.

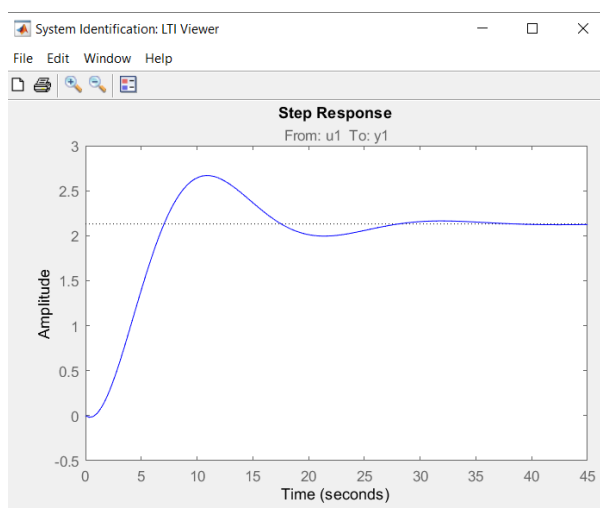


Рис. 3.27. Передавальна функція об'єкту управління

Так, за результатами роботи SIT в системі MATLAB сформовано таку передавальну функцію моделі:

$$W(s) = \frac{-0.09715s + 0.2277}{s^2 + 0.2636s + 0.1069} \quad (3.51)$$

Для створення більш складних моделей у просторі станів або для перетворення динамічних моделей у форму простору станів у MATLAB використовується команда `ss` з пакету Control System Toolbox. Модель простору станів є математичним описом фізичної системи, який базується на взаємозв'язку між входами, виходами та змінними стану. Ці змінні пов'язані між собою через диференціальні рівняння першого порядку, що дозволяє точно описати поведінку системи.

Змінні стану в моделі простору станів визначають значення вихідних змінних, дозволяючи побудувати систему як для одновимірних (SISO), так і багатовимірних (MIMO) систем. Пакет підтримує моделювання як у безперервному, так і в дискретному часі, що робить його універсальним для різних типів динамічних систем.

Процес роботи з моделями простору станів у MATLAB починається з ініціалізації функції передачі, після чого викликається команда для обчислення матриць  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і  $D$ , які є основними компонентами рівнянь системи. Ці матриці

використовуються для опису систем у вигляді, представленому рівняннями (3.45) і (3.50), і дозволяють проводити подальший аналіз та оптимізацію моделі.

```
>> H = [tf([-0.0915 0.2277],[1 0.2636 0.1069])]  
  
H =  
  
      -0.0915 s + 0.2277  
      -----  
      s^2 + 0.2636 s + 0.1069  
  
Continuous-time transfer function.  
  
>> sys = ss(H);
```

Рис. 3.28. Модель простору станів

В результаті отримані наступні матриці:

$$A = \begin{bmatrix} -0.2636 & -0.4276 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$C = [-0.0915 \quad 0.9108] \quad (3.54)$$

$$A = [0] \quad (3.55)$$

Отже, після обчислення матриць A і B рівняння (83) матиме такий вигляд:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -0.2636 & -0.4276 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3.56)$$

Структурна схема системи управління, створеної в пакеті Simulink, наведена на рис. 3.29.



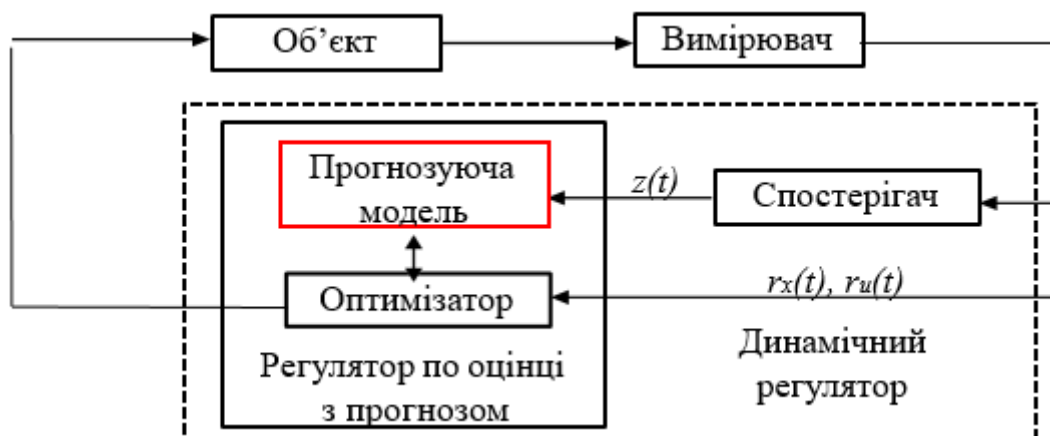


Рис. 3.29. Структурна схема системи управління з MPC-регулятором

Для побудови графіка перехідної характеристики з MPC-регулятором використовувався інструмент MPC Designer у MATLAB. Після експорту перехідної характеристики до Simulink було отримано графік роботи гранулятора з MPC-регулятором (синя крива) та без нього (жовта крива):

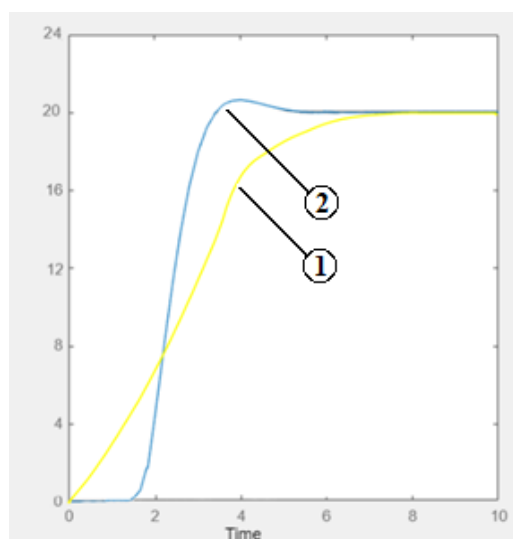


Рис. 3.30. Перехідні характеристики об'єкту (1 – без системи управління, 2 – з системою управління з MPC-регулятором)

З аналізу графіків видно, що система з MPC-регулятором працює швидше на 3 секунди в порівнянні з системою без управління. Це підтверджує доцільність використання MPC-регулятора в системі керування виробництвом мінеральних добрив.

### 3.5. Висновки до розділу 3

1. Доведено наявність детермінованого хаосу в процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі та в системі управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Дослідження дивного атрактора, показників Ляпунова та ентропії Колмогорова підтвердили наявність детермінованого хаосу.

2. Розроблена система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Завдяки постійному управлінню подачею теплоносія ця система підсилює хаотичність процесу, що сприяє активному перемішуванню частинок у псевдозрідженому шарі. Це забезпечує прискорене зростання гранул та покращення їх якості при збереженні керованості процесу.

3. Реалізовані системи управління з використанням MPC, LQR, ПІД та Fuzzy Logic регуляторів на основі трьохфазної математичної моделі гранулювання у псевдозрідженому шарі для точного порівняння їх ефективності. Результати дослідження показали, що MPC-регулятор є найбільш ефективним для цієї системи, оскільки він найкраще підходить для нелінійних систем, забезпечує мінімальне перерегулювання та швидко виводить показники температури до заданих значень.

4. Розроблена система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором на основі математичної моделі гранулометричного складу виробництва мінеральних добрив, яка дозволяє швидше досягти заданої кількості гранул необхідного розміру.

#### **РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ГРАНУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ**

В сучасному виробництві мінеральних добрив важливу роль відіграють інформаційні технології, які дозволяють ефективно контролювати процеси на кожному етапі, оскільки вони дозволяють не лише проводити моніторинг параметрів виробництва, але й забезпечувати адаптивне управління на основі сучасних математичних моделей. Тенденції розвитку хімічної промисловості демонструють постійну необхідність оптимізації технологічних процесів та підвищення ефективності виробництва. У випадку виробництва мінеральних добрив, досягнення високої якості кінцевого продукту, зниження собівартості та забезпечення стабільності виробничих процесів є ключовими завданнями.

Інформаційні технології управління виробництвом мінеральних добрив являють собою комплекс технічних, програмних та організаційних рішень, що охоплюють усі етапи технологічного процесу – від підготовки сировини до отримання готового продукту. Одним із ключових завдань є забезпечення надійного контролю та управління процесами у режимі реального часу.

Основою створення ефективної інформаційної технології є розробка математичних моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку системи, завдяки чому можна створити ефективні системи управління. Ще одним важливим аспектом є функціональна безпека технологічного процесу. Враховуючи, що виробництво мінеральних добрив належить до категорії підвищеної небезпеки, критично важливо забезпечити стабільну роботу систем управління в усіх передбачених умовах експлуатації. Інформаційні технології дозволяють інтегрувати в систему управління механізми захисту, які враховують можливі відхилення, аварійні ситуації та інші ризики.

Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив також охоплює аспекти оптимізації використання ресурсів. Застосування інтегрованих технологій може дозволити зменшити витрати енергії, мінімізувати втрати сировини чи підвищити загальну ефективність виробництва. Завдяки цьому

знижується собівартість продукту, що є важливим конкурентним чинником на ринку.

Сучасні підприємства та компанії являють собою складні організаційні системи, окремі складові яких постійно змінюються та перебувають у складній взаємодії одна з одною. Ринкова економіка призводить до збільшення обсягу та ускладнення завдань, які вирішуються в галузі організації виробництва, процесів планування й аналізу, фінансової діяльності, зв'язків із постачальниками та споживачами продукції. Оперативне управління всіма цими процесами неможливе без використання інформаційних технологій у системі управління.

Інформаційна система управління – це сукупність інформації, економіко-математичних методів і моделей, технічних, програмних та інших технологічних засобів, а також фахівців, які забезпечують обробку інформації та ухвалення управлінських рішень. Інформаційна система управління повинна вирішувати поточні завдання стратегічного й тактичного планування, бухгалтерського обліку та оперативного управління діяльністю фірми.

Інформаційні технології є надзвичайно перспективною та швидко прогресуючою складовою, яка формує основу сучасної технологізації у всіх сферах суспільного життя. Їхній потенціал полягає в мобілізації стратегічних ресурсів і забезпеченні їхнього ефективного використання, що є ключовим фактором для розвитку економічних, соціальних та управлінських процесів.

Інформаційна технологія визначається як система методів, засобів реалізації інформаційних процесів та способів їх використання. Це включає інструменти для збирання, обробки, зберігання та передачі даних, які сприяють оптимізації управлінських та виробничих процесів.

Серед переваг інформаційних технологій в управлінні можна виділити кілька ключових аспектів. Вони дозволяють значно скоротити час доступу до інформації, зменшують дублювання документів, спрощують доступ до даних і забезпечують оптимізацію їх зберігання. Інтеграція технологій автоматизує бізнес-процеси, підвищує якість обслуговування клієнтів і сприяє покращенню дисципліни працівників. Крім того, повторне використання інформації та підвищення її якості

забезпечують більш точне прийняття рішень і збереження критично важливих документів.

Особливу роль інформаційні технології відіграють у прискоренні управлінських процесів, пов'язаних із виробничо-господарською діяльністю, а також у вдосконаленні інструментів управління суспільною життєдіяльністю. Завдяки їхньому використанню управлінські процедури стають прозорішими, а моніторинг і діагностика виробничих та економічних систем здійснюються в реальному часі.

Розвиток технологій управління виробничими, господарськими, економічними та соціальними системами повинен орієнтуватися на дослідження управління в нестандартних динамічних умовах. Це потребує застосування методології управління, що враховує специфіку трансформації економічних відносин, і включає діагностику та моніторинг для ефективного контролю та реагування на зміни в середовищі. Таким чином, інформаційні технології виступають інструментом, що забезпечує адаптивність і стабільність управлінських систем у динамічних умовах.

У процесі створення та функціонування інформаційних технологій управління виділяють організаційну та функціональну структури.

Організаційна структура визначається наявністю підрозділів різного рівня – відділів, служб, секцій, цехів, ділянок тощо, а також їхнім взаємним адміністративним підпорядкуванням.

Функціональна структура – це структура, елементами якої є підсистеми, що реалізують функції автоматизованої інформаційної технології управління або її частини. Зв'язки між елементами функціональної структури утворюють потоки інформації, яка циркулює між ними під час функціонування.

Будь-яка інформаційна технологія управління (ІТУ) складається з кількох ключових частин, які забезпечують її комплексне функціонування.

Загальносистемна частина відповідає за загальний опис та обґрунтування рішень, прийнятих у проєкті. Вона формує основу для подальшої розробки та впровадження ІТУ.

Функціональна частина реалізує підсистеми, які забезпечують виконання основних завдань управління. Ця частина безпосередньо пов'язана з досягненням цілей управління, впроваджуючи необхідні інструменти та методи для реалізації управлінських процесів.

Забезпечувальна частина охоплює всі засоби, необхідні для успішної роботи функціональних підсистем. Вона включає кілька аспектів:

- Апаратне забезпечення – це комплекс технічних засобів, таких як сервери, комп'ютери, мережеве обладнання тощо, які забезпечують функціонування ІТУ.

- Математичне забезпечення – містить економіко-математичні методи, моделі та алгоритми, що використовуються для вирішення управлінських задач.

- Програмне забезпечення – складається з двох основних категорій.

1. Загальносистемне програмне забезпечення включає операційні системи, транслятори, утиліти, бази даних та інші інструменти, які створюють основу для роботи системи.

2. Прикладне програмне забезпечення охоплює спеціалізовані програми, що реалізують функціональні запити користувачів, а також інструкції для користувачів, операторів та програмістів, які забезпечують ефективне використання системи.

- Інформаційне забезпечення охоплює рішення щодо організації інформації в системі, включаючи нормативно-довідкові дані, класифікатори економічної інформації, уніфіковані документи та масиви даних.

Організаційно-методичне забезпечення регламентує діяльність персоналу в процесі функціонування системи управління. Воно включає:

- документи, які описують зміни в організаційній структурі управління у зв'язку зі створенням ІТУ;
- інструкції з експлуатації та підтримки системи;
- встановлення функцій, прав і обов'язків персоналу через посадові інструкції.

Лінгвістичне забезпечення формує основу для інформаційних мов, методів індексування та ведення лінгвістичної бази, що використовується в ІТУ.

Правове забезпечення охоплює всі правові норми, які регулюють функціонування ІТУ та визначають юридичний статус її результатів. Це забезпечує правову підтримку використання системи та захист її компонентів.

Цілісна структура ІТУ дозволяє ефективно реалізувати управлінські завдання, інтегруючи технічні, математичні, інформаційні та організаційні складові.

Інформаційні технології управління повинні включати блок управління можливими ризиками та здійснення превентивних заходів для зниження імовірності виникнення ризикових подій у рамках конкретної технології управління або діяльності підприємства в цілому. Процес управління кризовими ситуаціями реалізується спеціальною інформаційною технологією антикризового управління з урахуванням траєкторії розвитку керованості підприємства і моніторингу виробничо-господарської діяльності організації в умовах антикризового управління.

Виконуючи свою діяльність у системі управління організацією, інформаційні технології управління відстежують розвиток подій як всередині, так і зовні підприємства. Водночас інформаційна технологія в управлінні надає можливість прогнозувати розвиток подій у межах функцій управління, а також визначати управлінські дії різних підрозділів, служб та відділів для коригування і розвитку виробничо-господарської діяльності в допустимих значеннях на прогнозований часовий проміжок. Аналітичний блок, що є центром інформаційної технології управління, забезпечує вироблення оптимальних управлінських впливів.

Інноваційний розвиток суб'єктів господарювання завжди вимагає впровадження інноваційних технологій. У сучасному світі нові інноваційні технології з'являються кожні 3-5 років. Їхній життєвий цикл включає етапи зародження, створення та впровадження на ринку: від ідеї та її теоретичної перевірки (обґрунтування) до розробки техніко-економічного обґрунтування,

створення проєкту або дослідного зразка, перевірки на експлуатаційну надійність та економічність, розробки бізнес-плану та виходу на ринок.

Основний ефект від впровадження інформаційних технологій управління досягається завдяки роботі таких ключових компонентів, як блок розробки варіантів рішень, блок аналізу якості прийнятих рішень та блок оцінки ефективності реалізації управлінських впливів. Унікальність інформаційних технологій управління полягає в їх здатності прогнозувати траєкторію розвитку керованості організації, забезпечуючи ефективний рух по шляху її стратегічного зростання. При необхідності інформаційні технології можуть оперативно коригувати та координувати цю траєкторію. Функція діагностики та моніторингу, інтегрована в інформаційну технологію управління, робить управлінські процеси більш прозорими. Це дозволяє оперативно вносити корективи в разі виникнення несприятливих змін як у внутрішньому, так і у зовнішньому середовищі. Завдяки цьому досягається не лише підвищення стабільності організації, але й оптимізація її діяльності в умовах постійно змінюваних викликів і ризиків.

#### **4.1. Система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив**

Система захисту критичних ресурсів – це сукупність заходів, інструментів і процесів, спрямованих на забезпечення безвідмовності, конфіденційності, цілісності та доступності ключових ресурсів організації. Критичні ресурси можуть включати інформаційні системи, фізичні інфраструктури, фінансові активи, людські ресурси та інші важливі елементи, без яких неможливо забезпечити нормальне функціонування системи. Систему захисту критичних ресурсів можна розділити на такі частини:

- Оцінка ризиків та аналіз вразливостей
- Розробка і впровадження політики безпеки та процедур реакції на інциденти
- Технічні заходи захисту



- Адміністративні заходи захисту

Оцінка ризиків є ключовим етапом в забезпеченні захисту критичних ресурсів. Аналіз вразливостей – процес виявлення, аналізу та усунення слабких місць системи, які можуть бути використані для реалізації загроз. Перш за все потрібно ідентифікувати критичні ресурси системи, а також їх важливість для функціонування системи. Після цього стає можливим ідентифікувати загрози, які можуть чинити вплив на критичні ресурси. Провівши аналіз вразливостей, який включає в себе їх категоризацію, аналіз впливу та планування заходів усунення вразливостей, проводиться впровадження запланованих заходів та моніторинг їх впливу на систему. Останнім етапом є оцінка імовірності і впливу ризиків після всіх проведених процедур, а саме оцінка того, на скільки імовірно, що загроза успішно реалізована та аналіз наслідків їх реалізації. Оцінка може проводитися як за допомогою категоризації або шкал, так і числових показників імовірності.

Політики та процедури є невід'ємною частиною системи захисту критичних ресурсів, які забезпечують стандартизовані методи і правила для захисту інформаційних ресурсів. Вони спрямовані на мінімізацію ризиків та забезпечення відповідності вимогам законодавства і стандартам безпеки. Етапи розробки включають в себе оцінку поточних політик та процедур, визначення вимог законодавства і стандартів до політик безпеки, безпосередня розробка політик та процедур. Розробляються як загальні принципи і стратегії безпеки для всіх аспектів діяльності, так і специфічні. Якщо вести мову про процедури, то розробляються процедури реалізації політик, процедури моніторингу і контролю за їх виконанням та процедура реагування на інциденти безпеки. Після впровадження проводиться постійний моніторинг та оцінка ефективності і за потреби політики та процедури безпеки можуть бути вдосконалені. Це дозволяє підтримувати високий рівень безпеки в умовах змінюваних загроз і вимог.

Технічні заходи захисту є критично важливими для забезпечення безпеки інформаційних ресурсів. Їх правильне впровадження та інтеграція у загальну стратегію безпеки системи дозволяє ефективно захищати дані від широкого спектра загроз. Регулярний моніторинг, оновлення і вдосконалення технічних

заходів забезпечують підтримку високого рівня захисту в умовах постійно змінюваних і прогресуючих загроз. До технічних систем захисту входять системи контролю доступу, міжмережні екрани, шифратори даних та системи моніторингу системи.

Адміністративні заходи захисту інформації в організації включають низку політик, процедур і практик, які спрямовані на управління ризиками та забезпечення безпеки даних. Ці заходи допомагають підтримувати високий рівень безпеки і захищати критичні інформаційні ресурси від несанкціонованого доступу, втрат або пошкоджень. До них входить управління доступом (розподіл, контроль та управління ролями і обов'язками працівників), моніторинг і аудит (збір показників з обладнання, проведення внутрішніх і зовнішніх аудитів безпеки, регулярне звітування про стан системи та документування виявлених проблем), управління інцидентами (ведення журналів подій, розслідування інцидентів, вживання заходів для мінімізації шкоди та відновлення роботи системи в штатному режимі).

Виробництво мінеральних добрив є складним технологічним процесом, який потребує не тільки дотримання технологічних параметрів, але й забезпечення високого рівня безпеки. Оскільки виробництво мінеральних добрив належить до хімічної промисловості, воно пов'язане з використанням потенційно небезпечних речовин і складного обладнання, тому захист критичних ресурсів виробництва стає першочерговим завданням для забезпечення стабільності процесів, безпеки персоналу та охорони навколишнього середовища. В умовах зростаючої цифровізації та застосування інформаційних технологій у виробництві мінеральних добрив актуальним стає впровадження комплексної системи захисту критичних ресурсів.

Запропонована система захисту критичних ресурсів у виробництві мінеральних добрив включає кілька рівнів безпеки, які забезпечують сегментований доступ та надійний захист для кожної ділянки виробничого процесу. Система складається з наступних компонентів: відділена зона (для віддаленого персоналу), DMZ-зона з веб-серверами та міжмережними екранами на

вході і виході, периметрова зона (для захисту внутрішньої мережі), виробнича зона (обладнання та системи, які беруть безпосередню участь у виробництві), адміністративна зона (робоча станція для управління та підтримки операцій), і обмежена зона (критичні ресурси та конфіденційна інформація). Кожна з цих зон виконує певні функції та має різний рівень доступу й заходів безпеки, що дозволяє значно зменшити ризик несанкціонованого втручання.

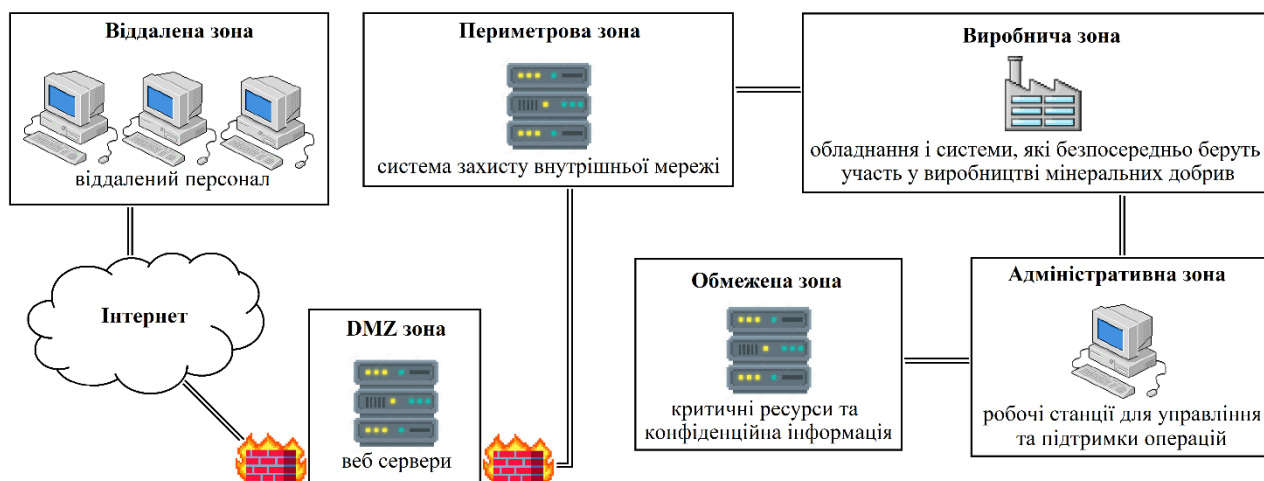


Рис. 4.1. Система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив

При виборі компонентів системи захисту використано міжнародний стандарт ІЕС 61508, який регулює вимоги до функціональної безпеки та надійності систем управління. Стандарт ІЕС 61508 особливу увагу приділяє питанням оцінки імовірностей відмов та ризиків, пов'язаних із функціонуванням систем у небезпечних умовах. Використовуючи методики стандарту, можна створити математичну модель захисту критичних ресурсів, яка може використовуватися для оцінки ризиків та імовірностей виникнення загроз та їх усунення для кожної зони та компоненту системи, що дозволяє мінімізувати імовірність критичних помилок, які можуть призвести до аварій чи небезпечних ситуацій під час реального виробничого процесу.

Імовірність відмов кожного елемента системи захисту оцінюється за допомогою метрик, таких як Safety Integrity Level (SIL), що є критерієм надійності систем безпеки згідно з ІЕС 61508. Використання цього підходу дозволяє розрахувати необхідний рівень безпеки для кожного компоненту системи,

забезпечуючи таким чином контроль над імовірністю відмови в критичних умовах. Завдяки цьому, система може виконувати свої функції навіть у випадку зовнішніх впливів або збоїв, зберігаючи при цьому стабільність та надійність виробничих параметрів, що в свою чергу впливає на якість кінцевої продукції.

Відділена зона забезпечує віддалений доступ для персоналу за допомогою захищеного з'єднання, та автентифікації. DMZ-зона слугує буферною зоною між Інтернетом та внутрішньою мережею, забезпечуючи захист від зовнішніх загроз через міжмережні екрани. Периметрова зона включає засоби виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS), що дозволяє захистити внутрішню мережу від потенційних кібератак. Виробнича зона містить обладнання та системи, що безпосередньо використовуються у виробництві і вимагають постійного моніторингу та захисту. Адміністративна зона забезпечує управління захисними механізмами, а обмежена зона використовується для зберігання критичних ресурсів та конфіденційної інформації.

При виробництві мінеральних добрив важливо не лише забезпечити стабільність процесів та дотримання технологічних параметрів, а й передбачити та нейтралізувати можливі загрози, які можуть суттєво вплинути на виробничий процес. Загрози можуть бути як зовнішніми (наприклад, кібератаки, фізичні вторгнення чи техногенні катастрофи), так і внутрішніми (відмови обладнання, збої в програмному забезпеченні, людський фактор тощо). Для комплексного аналізу загроз та оцінки ризиків доцільно використовувати математичну модель, яка дозволяє не лише виявляти імовірності виникнення загроз, а й аналізувати їхній комбінований вплив.

Загрози розділяють на дві великих групи – зовнішні та внутрішні загрози. До зовнішніх загроз відносяться кібератаки, які можуть бути спрямовані на отримання доступу до критичних ресурсів або знищення важливих даних, та техногенні катастрофи, до яких відносять пошкодження інфраструктури та природні катастрофи, які можуть вплинути на стабільність системи та обладнання. Внутрішніми загрозами вважаються технічні збої або відмови обладнання і

помилки персоналу або їх зловживання доступом, що може спричинити зупинку виробництва.

Визначивши імовірності виникнення різних загроз, можна розробити стратегію захисту, яка враховує специфіку кожного типу загрози. Згідно з рекомендаціями ІЕС 61508, для кожного елемента системи необхідно визначити відповідний рівень безпеки (SIL), який обмежує імовірність відмови системи та зменшує можливість виникнення катастрофічних наслідків. Створення математичної моделі з врахуванням різних загроз дозволить виявити слабкі місця системи та оптимізувати заходи безпеки.

Для забезпечення високого рівня безпеки на виробництві мінеральних добрив необхідна багаторівнева система захисту, яка забезпечить ізоляцію критичних ресурсів, захист від зовнішніх та внутрішніх загроз, а також контроль доступу до кожної зони. Така система складається з кількох логічних зон, кожна з яких виконує свою функцію та забезпечує різні рівні захисту залежно від важливості ресурсів, що знаходяться в ній. Поділ на зони дозволяє зменшити ризик несанкціонованого доступу до критичних компонентів та підвищує загальну стійкість системи до загроз.

Відділена зона (Remote Zone) включає зовнішній персонал та об'єкти, що мають віддалений доступ до виробничої системи, наприклад, через Інтернет. Сюди можуть належати працівники або партнери, які здійснюють моніторинг або технічну підтримку системи на відстані. Відділена зона підключається до системи захисту через віддалений доступ із суворими заходами автентифікації та шифруванням даних для захисту від несанкціонованого втручання.

Інтернет-зона (Internet Zone) забезпечує доступ до Інтернету та є точкою входу для будь-яких зовнішніх зв'язків з виробничою системою. Всі дані, що передаються через Інтернет, повинні проходити перевірку через засоби захисту, такі як міжмережні екрани, VPN або інші засоби мережевої безпеки, щоб знизити імовірність проникнення загроз.

DMZ зона (Demilitarized Zone) є проміжною зоною між Інтернет-зоною та внутрішньою мережею. Вона містить веб-сервери, електронну пошту та інші

ресурси, доступні ззовні, але ізольовані від основної мережі підприємства. Це потрібно для того, щоб зменшити ризик несанкціонованого доступу до внутрішніх ресурсів, якщо атака на зовнішні сервери все-таки відтється. На вході та виході з DMZ зони встановлені міжмережні екрани, які забезпечують фільтрацію трафіку та захищають внутрішню мережу від проникнення.

Периметрова зона (Perimeter Zone) є захисним шаром внутрішньої мережі, забезпечуючи додатковий рівень захисту для відділення виробничої та адміністративної зон. Периметрова зона включає системи захисту внутрішньої мережі, такі як системи виявлення вторгнень (IDS/IPS), моніторинг мережевого трафіку та додаткові міжмережні екрани. Мета цієї зони – виявлення та запобігання потенційним загрозам, що можуть пробратися через зовнішні рівні захисту.

Виробнича зона (Production Zone) – це основна зона, яка включає обладнання та системи, що безпосередньо беруть участь у виробничому процесі мінеральних добрив. Виробнича зона є критично важливою, оскільки тут відбуваються основні операції виробництва, такі як подача сировини, змішування, гранулювання тощо. Доступ до цієї зони суворо обмежений, і контроль за нею здійснюється через засоби автоматизації, що забезпечують безперебійність процесів та запобігання можливим збоям.

Адміністративна зона (Administrative Zone) включає робочі станції та сервери, призначені для управління та підтримки операцій у виробничій зоні. Адміністративна зона забезпечує інтерфейси для моніторингу процесів, налаштування та управління обладнанням. Доступ до адміністративної зони дозволяється лише авторизованим користувачам. Тут також здійснюється резервне копіювання даних, архівування журналів та інші заходи, що підтримують стабільність виробничого процесу.

Обмежена зона (Restricted Zone) є найбільш захищеною зоною і включає в себе критичні ресурси, такі як конфіденційна інформація, секретні алгоритми управління, а також контролери, що безпосередньо впливають на хід виробництва. Доступ до обмеженої зони обмежений лише вузьким колом співробітників, а всі заходи безпеки у цій зоні максимально жорсткі. Сюди входить використання

багатофакторної автентифікації, шифрування даних, жорсткий контроль доступу та застосування додаткових засобів захисту, таких як апаратні міжмережні екрани і спеціалізоване ПЗ.

Принципи роботи та взаємодії між зонами в системі захисту критичних ресурсів забезпечують багаторівневий підхід до безпеки, що дозволяє мінімізувати ризики несанкціонованого доступу та зберегти стабільність виробничих процесів. Кожна зона має свою функціональність та рівень доступу, а їх взаємодія побудована на принципах поділу привілеїв, сегментації мережі, ізоляції критичних ресурсів та контролю доступу.

Ізоляція та сегментація забезпечує відокремлення зон одна від одної, особливо тих, які вимагають високого рівня захисту, як виробнича, адміністративна та обмежена зони. Між зонами встановлюються чіткі кордони, що контролюються міжмережними екранами та іншими засобами безпеки, дозволяючи лише необхідний трафік між ними. Зона віддаленого доступу має мінімальний зв'язок з іншими зонами, тоді як доступ до обмеженої зони суворо контролюється.

Другий принцип – захист периметру, який полягає у створенні першого рівня захисту, який відокремлює внутрішні ресурси від зовнішнього середовища (Інтернету). DMZ зона функціонує як проміжна зона, що дозволяє взаємодію між зовнішнім і внутрішнім середовищем, зберігаючи при цьому захищеність системи. Трафік з Інтернет-зони проходить через DMZ, а вже потім до внутрішніх зон, що значно знижує ризик проникнення зовнішніх загроз.

Принцип контролю доступу та привілеїв забезпечує, що доступ до ресурсів кожної зони мають лише ті користувачі, які володіють необхідними правами. Взаємодія між зонами побудована на принципі мінімальних привілеїв. Віддалений персонал має доступ лише до певних сервісів, а доступ до критичних ресурсів можливий тільки з обмеженого числа робочих станцій в адміністративній зоні.

Захист і моніторинг внутрішніх зон забезпечує захист від потенційних внутрішніх загроз, що можуть виникнути через людські помилки або шкідливі програми. Виробнича зона взаємодіє з адміністративною для моніторингу та підтримки виробничих процесів. Периметрова зона забезпечує контроль трафіку

між виробничою та обмеженою зонами, запобігаючи несанкціонованому доступу до критичних систем.

Мінімізація трафіку між критичними зонами спрямована на зниження уразливості системи до внутрішніх атак. Доступ до обмеженої зони з інших зон зводиться до мінімуму, а для моніторингу взаємодії використовується спеціальне обладнання для контролю трафіку. Аудит виконуються в кожній зоні, а дані журналів передаються до адміністративної зони для подальшого аналізу та зберігання.

Механізми відновлення після інцидентів передбачають швидке повернення системи до нормального режиму роботи після виникнення загрози або атаки. Виробнича та адміністративна зони мають засоби резервного копіювання даних, що забезпечує збереження важливої інформації і дозволяє відновити працездатність системи в разі аварій.

Захист критичних ресурсів, розташованих в обмеженій зоні, забезпечується найвищим рівнем безпеки. Взаємодія з цими ресурсами з інших зон обмежується до мінімуму, а доступ до них здійснюється лише через захищені канали, що контролюються системою доступу. Захист від внутрішніх загроз зводиться до мінімізації доступу до обмеженої зони для персоналу та регулярного моніторингу активності користувачів з високим рівнем привілеїв.

#### **4.2. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів**

Для забезпечення надійного та ефективного захисту критичних ресурсів у виробничих системах, зокрема у виробництві мінеральних добрив, необхідно створення математичної моделі, що дозволяє оцінити імовірності виникнення різних загроз. Стандарт ІЕС 61508 регламентує вимоги щодо рівнів безпеки SIL для систем безпеки, в яких враховуються імовірності виникнення ризиків. Оцінка SIL рівнів допомагає визначити, наскільки надійною є система безпеки, та встановити необхідні заходи для забезпечення мінімальних рівнів ризику.



Математична модель, яка базується на імовірнісних підходах, дозволяє не тільки оцінити ризик збоїв, але й оптимізувати стратегії захисту, спрямовані на зниження імовірності виникнення небезпечних ситуацій. Зокрема, розробка моделі захисту критичних ресурсів з урахуванням імовірностей дозволяє проаналізувати різні сценарії впливу загроз, що можуть виникнути, та визначити найбільш вразливі елементи системи. В такій моделі можуть враховуватися імовірність як зовнішніх, так і внутрішніх загроз, що вкрай важливо для комплексного підходу до забезпечення безпеки виробничих процесів.

Основна мета створення імовірнісної математичної моделі захисту критичних ресурсів полягає у наданні інструментарію для розрахунку рівнів SIL відповідно до стандарту IEC 61508. Це дозволяє інженерам і спеціалістам з безпеки обґрунтовано вибирати підходи до управління ризиками, оцінювати ефективність кожного рівня захисту та вчасно вживати заходів для підвищення надійності системи. Крім того, модель забезпечує можливість інтеграції різних компонентів безпеки, таких як технічні засоби та процедури контролю доступу, у єдину систему, що забезпечує високий рівень захисту.

На вхід такої системи можуть поступати багато різних загроз. В даному випадку розглянутий варіант, коли до системи може надходити дві загрози з різною імовірністю їх надходження та відбиття. Також припускається, що в одну одиницю часу може бути розміщена, реалізована чи відбита лише одна загроза. Відповідно до даних припущень, система може знаходитися у шести різних станах:

1. Стан спокою
2. Надійшла загроза 1, але не реалізована
3. Надійшла загроза 2, але не реалізована
4. Загроза 1 реалізована
5. Загроза 2 реалізована
6. Загроза відбита

Оскільки система може повертатися у початковий стан і вона не має поглинаючого (кінцевого) стану, то стає можливим розглядати поведінку системи

протягом тривалого періоду часу. Перехід з одного стану в інший здійснюється відповідно до орієнтовного графу (рис. 4.2).

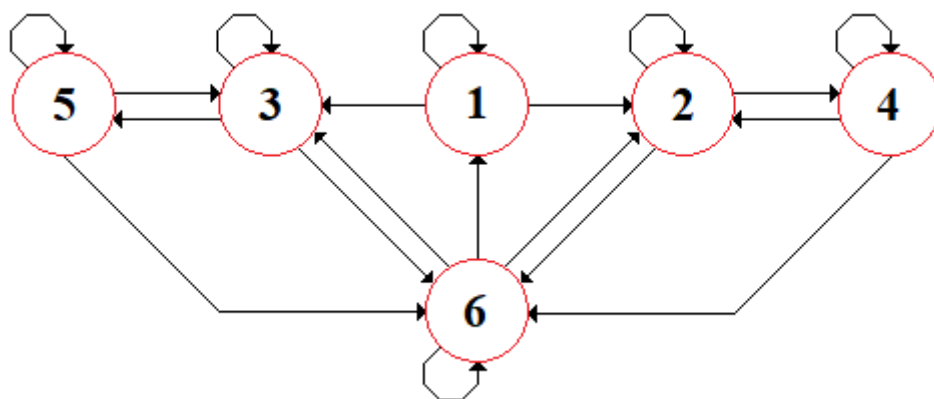


Рис. 4.2. Орієнтований граф переходів станів

Деякі стани не можуть переходити в інший одразу чи взагалі, тому імовірності їх переходів один в другий повинні бути рівними нулю. Наприклад система не може одразу перейти зі стану спокою чи відбиття в стан коли загроза реалізована, загроза повинна спочатку надійти. Система не може одразу перескочити в стан реалізованих загроз, а спочатку повинна перейти в стан нереалізованої загрози і вже тоді в реалізовану. При цьому загроза 1 та 2 не пов'язані між собою, а отже зв'язків між собою мати не можуть і імовірність переходу їх одна в другу також рівна нулю. Також, оскільки запропонована модель має стан відбиття, то припускається, що загроза, яка надійшла, повинна бути спочатку відбита, система не може сама по собі повернутися в стан спокою після надходження до неї загрози.

На основі всіх вищезгаданих припущень можемо побудувати матрицю інтенсивностей переходу:

$$p_{ij} = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 & \lambda_{24} & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & 0 & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ 0 & \lambda_{42} & 0 & \lambda_{44} & 0 & \lambda_{46} \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & 0 & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

Елементи цієї матриці інтенсивностей повинні відповідати наступним умовам:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{11} &= -\lambda_{12} - \lambda_{13} \\
 \lambda_{22} &= -\lambda_{24} - \lambda_{26} \\
 \lambda_{33} &= -\lambda_{35} - \lambda_{36} \\
 \lambda_{44} &= -\lambda_{42} - \lambda_{46} \\
 \lambda_{55} &= -\lambda_{53} - \lambda_{56} \\
 \lambda_{66} &= -\lambda_{61} - \lambda_{62} - \lambda_{63}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Матриця імовірностей переходу системи зі стану в стан за проміжок часу  $\Delta t$  можна записати наступним чином:

$$\|p_{ij}\| = \begin{bmatrix} p_1(t)(1 - (\lambda_{12} + \lambda_{13}))\Delta t & p_1(t)\lambda_{12}\Delta t & p_1(t)\lambda_{13}\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2(t)(1 - (\lambda_{24} + \lambda_{26}))\Delta t & 0 & p_2(t)\lambda_{24}\Delta t & 0 & p_2(t)\lambda_{26}\Delta t \\ 0 & 0 & p_3(t)(1 - (\lambda_{35} + \lambda_{36}))\Delta t & 0 & p_3(t)\lambda_{35}\Delta t & p_3(t)\lambda_{36}\Delta t \\ 0 & p_4(t)\lambda_{42}\Delta t & 0 & p_4(t)(1 - (\lambda_{42} + \lambda_{46}))\Delta t & 0 & p_4(t)\lambda_{46}\Delta t \\ 0 & 0 & p_5(t)\lambda_{53}\Delta t & 0 & p_5(t)(1 - (\lambda_{53} + \lambda_{56}))\Delta t & p_5(t)\lambda_{56}\Delta t \\ p_6(t)\lambda_{61}\Delta t & p_6(t)\lambda_{62}\Delta t & p_6(t)\lambda_{63}\Delta t & 0 & 0 & p_6(t)(1 - (\lambda_{61} + \lambda_{62} + \lambda_{63}))\Delta t \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Матриця інтенсивності надходження запитів і переходів системи зі стану в стан можна представити у вигляді коефіцієнтів, матриця яких виглядає наступним чином:

$$\|\lambda_{ij}\| = \begin{bmatrix} 1 - (\lambda_{12} + \lambda_{13}) & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - (\lambda_{24} + \lambda_{26}) & 0 & \lambda_{24} & 0 & \lambda_{26} \\ 0 & 0 & 1 - (\lambda_{35} + \lambda_{36}) & 0 & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ 0 & \lambda_{42} & 0 & 1 - (\lambda_{42} + \lambda_{46}) & 0 & \lambda_{46} \\ 0 & 0 & \lambda_{53} & 0 & 1 - (\lambda_{53} + \lambda_{56}) & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & 0 & 0 & 1 - (\lambda_{61} + \lambda_{62} + \lambda_{63}) \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Сума всіх імовірностей не повинна перевищувати 1:

$$p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) + p_5(t) + p_6(t) = 1 \tag{4.5}$$

Знайти імовірності знаходження системи в кожному зі станів в одну одиницю часу можна за допомогою системи диференціальних рівнянь. Для цього спочатку розглянемо імовірність перебування системи в стані 2 (надійшла загроза 1, але не реалізована) в момент часу  $t + \Delta t$ . В цей стан система може перейти з чотирьох станів з існуючих шести, а імовірність перебування системи в цьому стані рівна  $p_2(t + \Delta t)$ :

1) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 1 і за час  $\Delta t$  перейшла в стан 2

$$(P_2^{(A)}).$$

- 2) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 2 і за час  $\Delta t$  залишилася в стані 2 ( $P_2^{(B)}$ ).
- 3) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 3 і за час  $\Delta t$  не могла перейти в стан 2 ( $P_2^{(C)}$ ).
- 4) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 4 і за час  $\Delta t$  перейшла в стан 2 ( $P_2^{(D)}$ ).
- 5) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 5 і за час  $\Delta t$  не могла перейти в стан 2 ( $P_2^{(E)}$ ).
- 6) В момент часу  $t$  система перебувала в стані 6 і за час  $\Delta t$  перейшла в стан 2 ( $P_2^{(F)}$ ).

Відповідно до теореми додавання імовірностей ми можемо знайти імовірність знаходження системи в стані 2 в момент часу  $t + \Delta t$ :

$$p_2(t + \Delta t) = P_2^{(A)} + P_2^{(B)} + P_2^{(C)} + P_2^{(D)} + P_2^{(E)} + P_2^{(F)} \quad (4.6)$$

Імовірність  $P_2^{(A)}(t + \Delta t)$  виражається як добуток імовірності перебування системи в стані 1 на імовірність переходу системи в стан 2 за час  $\Delta t$ :

$$P_2^{(A)}(t + \Delta t) = p_1(t)\lambda_{12}\Delta t \quad (4.7)$$

Аналогічно цьому прикладу обрахуємо решту імовірностей того, що система перейде у стан 2:

$$\begin{aligned} P_2^{(B)}(t + \Delta t) &= p_2(t)(1 - (\lambda_{24} + \lambda_{26}))\Delta t \\ P_2^{(C)}(t + \Delta t) &= 0 \\ P_2^{(D)}(t + \Delta t) &= p_4(t)\lambda_{42}\Delta t \\ P_2^{(E)}(t + \Delta t) &= 0 \\ P_2^{(F)}(t + \Delta t) &= p_6(t)\lambda_{62}\Delta t \end{aligned} \quad (4.8)$$

Тепер застосуємо правила додавання імовірностей, щоб отримати імовірність перебування системи в стані 2 в момент часу  $(t + \Delta t)$ :

$$\begin{aligned}
p_2(t + \Delta t) &= p_1(t)\lambda_{12}\Delta t + p_2(t)(1 - (\lambda_{24} + \lambda_{26}))\Delta t + p_4(t)\lambda_{42}\Delta t + p_6(t)\lambda_{62}\Delta t \\
&\Rightarrow \\
p_2(t + \Delta t) - p_2(t) &= p_1(t)\lambda_{12}\Delta t - p_2(t)(\lambda_{24} + \lambda_{26})\Delta t + p_4(t)\lambda_{42}\Delta t + p_6(t)\lambda_{62}\Delta t \\
&\Rightarrow \\
\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_2(t + \Delta t) - p_2(t)}{\Delta t} &= p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{24} + \lambda_{26}) + p_4(t)\lambda_{42} + p_6(t)\lambda_{62} \\
&\Rightarrow \\
\frac{dp_2(t)}{dt} &= p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{24} + \lambda_{26}) + p_4(t)\lambda_{42} + p_6(t)\lambda_{62}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Аналогічно повторюємо по такому ж принципу обрахунки для решти п'яти станів і отримуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= -p_1(t)(\lambda_{12} + \lambda_{13}) + p_6(t)\lambda_{61} \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= p_1(t)\lambda_{12} - p_2(t)(\lambda_{24} + \lambda_{26}) + p_4(t)\lambda_{42} + p_6(t)\lambda_{62} \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= p_1(t)\lambda_{13} - p_3(t)(\lambda_{35} + \lambda_{36}) + p_5(t)\lambda_{53} + p_6(t)\lambda_{63} \\ \frac{dp_4(t)}{dt} &= p_2(t)\lambda_{24} - p_4(t)(\lambda_{42} + \lambda_{46}) \\ \frac{dp_5(t)}{dt} &= p_3(t)\lambda_{35} - p_5(t)(\lambda_{53} + \lambda_{56}) \\ \frac{dp_6(t)}{dt} &= p_2(t)\lambda_{26} + p_3(t)\lambda_{36} + p_4(t)\lambda_{46} + p_5(t)\lambda_{56} - p_6(t)(\lambda_{61} + \lambda_{62} + \lambda_{63}) \end{aligned} \right. \tag{4.10}$$

Оскільки ми припускаємо, що система може розпочати свою роботу виключно зі стану спокою, то початкові умови (імовірності) будуть наступні для першої одиниці часу:

$$p_1(0) = 1, \quad p_2(0) = 0, \quad p_3(0) = 0, \quad p_4(0) = 0, \quad p_5(0) = 0, \quad p_6(0) = 0 \tag{4.11}$$

Для обрахунку даної моделі скористаємося функцією `ode45()` програмного пакету MATLAB. Змоделюємо роботу системи протягом 15 секунд для розуміння її поведінки з постійними надходженнями двох типів загроз. В результаті отримаємо наступний результат:

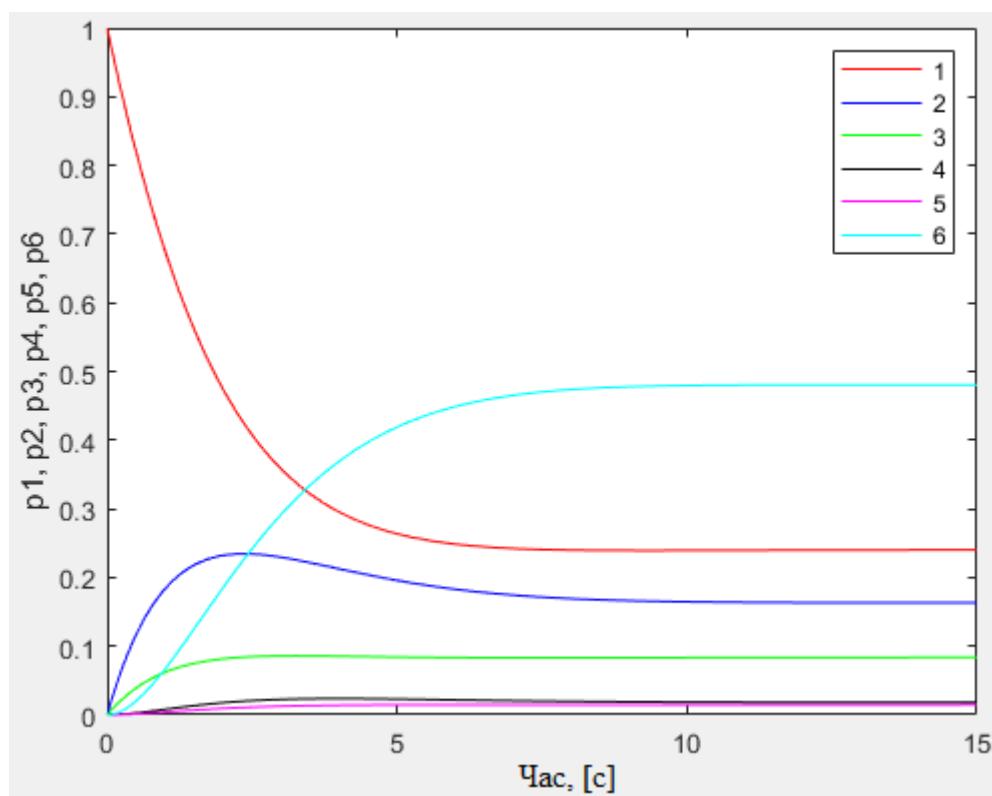


Рис. 4.3. Результати обрахунку математичної моделі протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів (1 – стан спокою, 2 – надійшла загроза 1, але не реалізована, 3 – надійшла загроза 2, але не реалізована, 4 – загроза 1 реалізована, 5 – загроза 2 реалізована, 6 – загроза відбита)

Система стабілізується за перші 8 секунд, після чого всі ймовірності знаходяться на одному рівні з періодичними дрібними коливаннями. Найвищу ймовірність займає стан 6 – стан відбиття загрози, що свідчить про те, що самі ж загрози надходять досить інтенсивно і система на них ефективно реагує. Стани 4 та 5 мають дуже низьку ймовірність, що також підтверджує ефективність системи у відбитті загроз ще до того, як вони реалізовані. Стан 1 також має дуже високу ймовірність, що свідчить про те, що система достатньо стійка до загроз.

### **4.3. Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив**

Інформаційна технологія – це сукупність методів, процесів та інструментів, що використовуються для збирання, зберігання, обробки, передачі та використання інформації з метою досягнення визначених цілей. У контексті виробництва мінеральних добрив, інформаційна технологія включає автоматизовану систему управління, яка об'єднує в собі математичні моделі, алгоритми обробки даних, програмне забезпечення та апаратні засоби, що забезпечують ефективне управління всіма аспектами виробничого процесу.

Створення інформаційної технології для виробництва мінеральних добрив дозволяє значно підвищити ефективність управління процесами на основі точних математичних моделей, що враховують специфіку гранулювання та контролю за якістю продукту. Вона забезпечує автоматизоване регулювання температури, вологості, перемішування частинок у псевдозрідженому шарі, а також контроль за гранулометричним складом. Основною метою впровадження такої інформаційна технологія є оптимізація процесів для досягнення максимальної продуктивності та якості продукту з мінімальними витратами ресурсів і часу.

Інформаційна технологія забезпечує можливість інтеграції різних підсистем у єдину платформу, яка дозволяє контролювати процес виробництва в режимі реального часу, приймати рішення на основі аналізу даних та забезпечувати оперативне управління всіма етапами виробничого циклу. Важливим аспектом є також можливість прогнозування та адаптивного управління, що дозволяє системі автоматично підлаштовуватися під зміни у виробничих умовах і забезпечувати стабільність та безпеку процесів. В результаті, інформаційна технологія у виробництві мінеральних добрив стає не просто інструментом для моніторингу та контролю, а комплексною системою, що забезпечує ефективність та стійкість всього технологічного процесу.

Узагальнена структура інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив (ІТУ ВМД) зображена на рис. 4.4. Основними складовими ІТУ

ВМД є технічні, програмні та організаційно-методичні інструменти: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробничими процесами, система захисту критичних ресурсів та математична модель для протидії загрозам у системі захисту. Використання ІТУ ВМД дозволяє точно вимірювати ключові параметри технологічного процесу, оперативно управляти ним для отримання продукту заданої якості, а також забезпечувати захист критичних ресурсів, переданих до системи управління.

У модулі «Введення значень вхідних параметрів» здійснюється ініціалізація вхідних параметрів, які надалі використовуються у модулі «Математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив» та компоненті «Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів». Для трьохфазної математичної моделі гранулювання в псевдозрідженому шарі вводяться такі початкові параметри: температура частинок, крапель і теплоносія ( $\Theta_{c0}$ ,  $\Theta_{k0}$ ,  $\Theta_{m0}$ ), коефіцієнти тепловіддачі частинок і крапель ( $\alpha_p$ ,  $\alpha_d$ ), а також масові витрати повітря ( $G_a$ ). Для математичної моделі гранулометричного складу вводяться об'єми реакторів А і В ( $V_A$ ,  $V_B$ ) та швидкість обмінного потоку між ними ( $q(t)$ ). Крім того, для математичної моделі протидії загрозам у системі захисту вводяться початкові значення ймовірностей ( $p_i(0)$ ).

У модулі «Математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив» в компоненті «Трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі» одержуємо значення температур частинок, крапель та теплоносія ( $\Theta_c$ ,  $\Theta_k$ ,  $\Theta_n$ ), які потім надходять до компоненти «Система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром» модуля «Системи управління виробництвом мінеральних добрив». Далі трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі лінеаризується для подальшого використання в компоненті «Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регіалтором» модуля «Система управління виробництвом мінеральних добрив». В компоненті «Математична модель гранулометричного складу мінеральних добрив» одержуємо значення функцій розподілу гранул в реакторі А та В ( $\Phi_i^B$ ,  $\Phi_i^A$ ).



), які потім надходять до компоненти «Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регулятором» модуля «Системи управління виробництвом мінеральних добрив».

У компоненті «Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів» обчислюються значення імовірностей ( $p_i$ ), інформація надходить до компоненту «Система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив», де після обробки інформація надходить до компоненту «Система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром» модуля «Системи управління виробництвом мінеральних добрив».

У модулі «Системи управління виробництвом мінеральних добрив» в компоненті «Система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром» отримуємо критерій якості системи управління хаосом ( $I$ ), в компоненті «Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регулятором» отримуємо критерій якості системи управління виробництвом мінеральних добрив ( $I^*$ ), в компоненті «Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з МРС-регулятором» отримуємо критерій якості системи управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив ( $I_d$ ). Використання інформаційної технології виробництва мінеральних добрив дозволило знизити енерговитрати на 7%.

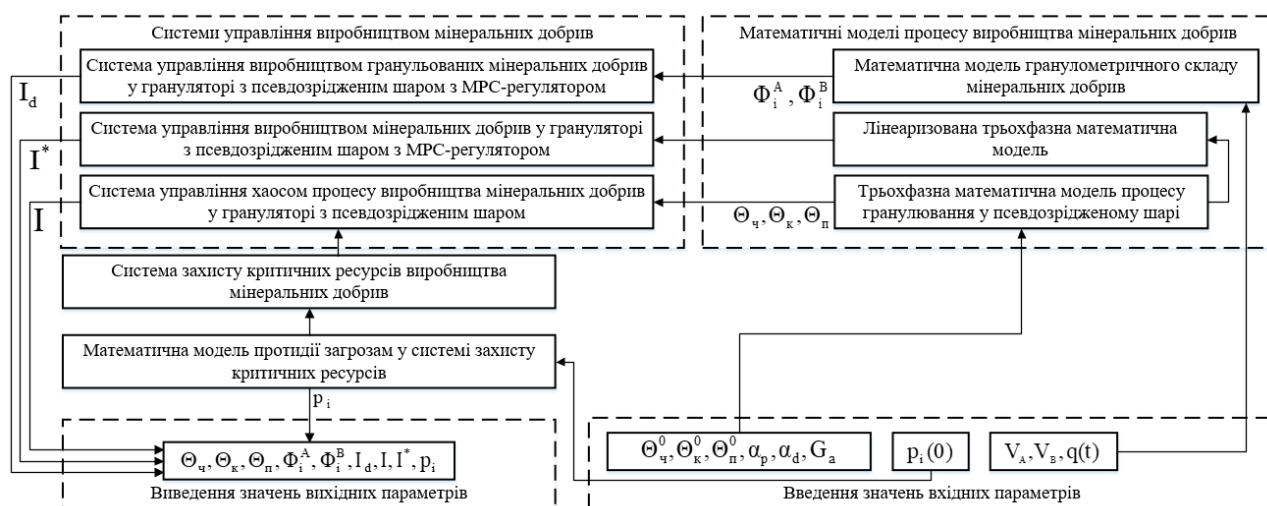


Рис. 4.4. Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив

Розроблено методику використання інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив, що заснована на запропонованому поєднанні комплексу заходів управління виробництвом, математичних моделей процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та системи захисту критичних ресурсів, що враховує особливості обладнання та хімічної промисловості.

Методика передбачає таку послідовність дій:

1. Визначення основних параметрів технологічного процесу.
2. Розрахунок технологічних параметрів за допомогою математичних моделей процесу виробництва мінеральних добрив.
3. Реалізація системи управління процесом виробництва мінеральних добрив.
4. Виявлення множини потенційно можливих ситуацій, що можуть призвести до реалізації загроз.
5. Визначення вимог до системи захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив з урахуванням математичної моделі протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.
6. Впровадження та супровід інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив протягом всього терміну експлуатації.

Ця методика забезпечує комплексний підхід до управління технологічними процесами та забезпечення захисту критичних ресурсів, що дозволяє покращити якість готового продукту та зменшити ризики, пов'язані з хімічними виробництвами підвищеної небезпеки.

#### **4.4. Висновки до 4 розділу**

1. Створена система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив. Це дозволяє ефективно сегментувати мережу та обмежити доступ до критично важливих компонентів. Завдяки розділенню виробництва на зони, від відділеної зони з доступом через демілітаризовану зону до обмеженої зони для найкритичніших ресурсів, система забезпечує контрольований доступ і мінімізує можливість загроз для критичних ресурсів.

2. Розроблена математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів для оцінки імовірності протидії загрозам дозволяє визначити рівень функціональної безпеки (SIL) для критичних ресурсів виробництва. На основі імовірнісних розрахунків можна створити ефективну систему протидії загрозам, що забезпечує своєчасне виявлення та усунення потенційних небезпек. Це дозволяє значно зменшити ризик аварійних ситуацій та підвищити надійність виробничого процесу.

3. Розроблено інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив (ІТУ ВМД), основними компонентами якої є наступні технічні, програмні та організаційно-методичні засоби: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив та математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів. Застосування ІТУ ВМД дозволяє здійснювати вимірювання основних параметрів технологічного процесу, здійснювати управління процесом виробництва мінеральних добрив, забезпечуючи одержання готового продукту заданої якості та захист критичних ресурсів. Використання інформаційної технології управління

виробництвом мінеральних добрив дозволило знизити енерговитрати на 7% за рахунок розробки системи управління хаосом, що збільшила інтенсивність тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі.

4. Розроблено методику використання інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу – підвищення ефективності виробництва мінеральних добрив за рахунок розроблених моделей, систем управління та створення і використання нової інформаційної технології управління.

У процесі дослідження отримано наступні результати:

1. Проведено аналіз основних підходів до математичного моделювання процесу виготовленні мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Встановлено основні параметри, склад апарату, режими роботи та технологічні особливості процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Встановлена необхідність забезпечення математичного механізму прогнозування гранулометричного складу – основного показника якості вихідного продукту. Розглянуто основні підходи до побудову систем управління процесом гранулювання у псевдозрідженому стані. Виявлено необхідність врахування хаотичного характеру руху частинок у псевдозрідженому шарі для побудови системи управління процесом виробництва мінеральних добрив та підвищення ефективності технологічного процесу.

Для підвищення стану захищеності процесу виробництва гранульованих мінеральних добрив від загроз порушень функціональної безпеки, які можуть вплинути на зміну критичних ресурсів, виявлена необхідність забезпечення математичного механізму протидії кільком загрозам. Проаналізована нормативна база вимог функціональної безпеки для хімічної промисловості.

Сформульовані завдання для досягнення теоретичних та прикладних результатів в розробці інформаційної технології управління виробництва мінеральних добрив, що дозволить забезпечити отримання кінцевого продукту заданої якості та підвищити рівень ефективності процесу виробництва мінеральних добрив.

2. Розроблена трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі, яка враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, передачу кінетичної енергії, розсіювання енергії, стиснення крапель з частинками,

їх адгезію до поверхні, кінетику висихання розчину на поверхні частинок. Також враховані розсіювання енергії при зіткненні та передача кінетичної енергії від твердої фази до рідкої.

В результаті дослідження математичної моделі процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі отримані перехідні характеристики зміни трьох основних параметрів процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі – температур частинок, крапель та теплоносія. Виявлено, що температури остаточно стабілізуються за 40 секунд та спостерігаються постійні нелінійні коливання в системі.

3. Розроблена математична модель гранулометричного складу процесу виробництва мінеральних добрив, яка базується на поділі псевдозрідженого шару на три зони – зона змочування, ізотермічна зона та зона теплообміну.

Математична модель враховує, що умови для росту частинок виконуються лише в зоні холодного змочування під соплом, в зоні змочування температура підвищується від центру до сторін, в ізотермічній зоні температура повітря рівномірна, в зоні теплообміну температура гарячого повітря різко падає, зростання частинок визначатиметься розміром змочувальної активної зони та швидкістю перенесення частинок до цієї частини псевдозрідженого шару, в зоні змочування відбувається агломерація.

В процесі дослідження математичної моделі гранулометричного складу виробництва мінеральних добрив отримано показники розподілу гранул за їх розміром протягом всього процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. Встановлено, що найбільше гранул утворюється в межах заданого розміру – 1.55 мм в кількості 25 %.

4. Доведено наявність детермінованого хаосу в процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі та в системі управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Дослідження дивного атрактора, показників Ляпунова та ентропії Колмогорова підтвердили наявність детермінованого хаосу. Визначили час передбачення для системи управління хаосом, що складає 1.72 с.

Розроблена система управління хаосом процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. Завдяки позиційному регулюванню подачею теплоносія система управління хаосом підсилює хаотичність процесу, що сприяє активному перемішуванню частинок у псевдозрідженому шарі. Позиційне регулювання змінює перехідну характеристику об'єкта в межах 10%. Таким керувальним впливом ми «розгойдуємо» систему для отримання пульсацій, але при цьому обмежуємо амплітуду коливань за допомогою параметра  $\gamma = 0 \dots 1$ , щоб система не втрачала стійкості.

5. Реалізовані системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з використанням чотирьох регуляторів: MPC, LQR, ПД та Fuzzy Logic-регуляторів. Дослідження проведені з трьохфазною математичною моделлю процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі для порівняння їх ефективності.

Результати дослідження показали, що MPC-регулятор є найбільш ефективним для використання в системі управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром, оскільки він застосовується для нелінійних систем, забезпечує незначне перерегулювання, що рівне 3%, яке швидко виходить на сталий рівень до необхідного показника температури з точністю 100% за 10 секунд. Тобто час виходу на встановлений рівень скорочено на 75%.

6. Розроблена система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром з MPC-регулятором на основі математичної моделі гранулометричного складу виробництва мінеральних добрив, яка дозволяє досягти заданої кількості гранул необхідного розміру за 5 секунд, що є на 28% швидше.

7. Створена система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив, яка складається з відділеної зони, демілітаризованої зони з веб-серверами та міжмережевими екранами на вході і виході, периметрової зони, виробничої зони, адміністративної зони та обмеженої зони. Кожна з цих зон

виконує певні функції та має різний рівень доступу й заходів безпеки, що дозволяє значно зменшити ризик несанкціонованого втручання.

Це дозволяє ефективно сегментувати мережу та обмежити доступ до критично важливих компонентів. Завдяки розділенню виробництва на зони, від відділеної зони з доступом через демілітаризовану зону до обмеженої зони для критичних ресурсів, система забезпечує контрольований доступ і мінімізує можливість загроз для критичних ресурсів.

8. Розроблена математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів для оцінки імовірностей двох різних загроз дозволяє визначити рівень функціональної безпеки для критичних ресурсів виробництва.

Дана модель описує процес виробництва мінеральних добрив, як систему, яка може перебувати в 6 станах: стан спокою; надійшла загроза 1, але не реалізована; надійшла загроза 2, але не реалізована; загроза 1 реалізована; загроза 2 реалізована; загроза відбита. Для опису переходу системи зі стану у стан, використовує побудовану матрицю інтенсивностей переходу.

Запропонована математична модель дозволяє обчислити значення імовірностей перебування системи у кожному з шести станів протягом всього часу одного циклу виробництва. Її використання допомагає з визначенням загроз для критичних ресурсів, які є актуальними для досліджуваної системи та можуть використовуватись на практиці.

9. Розроблено інформаційну технологію управління виробництвом мінеральних добрив, основними компонентами якої є наступні технічні, програмні та організаційно-методичні засоби: математичні моделі процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив та математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.

Застосування інформаційної технології виробництва мінеральних добрив дозволяє здійснювати вимірювання основних параметрів технологічного процесу, оперативно керувати процесом, забезпечуючи одержання готового продукту заданої якості та захист критичних ресурсів, що передаються системі управління.



Використання інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив дозволило знизити енерговитрати на 7% за рахунок розробки системи управління хаосом, що збільшила інтенсивність тепло- та масообміну у псевдозрідженому шарі. Розроблено методику використання інформаційної технології виробництва мінеральних добрив.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Korniyenko, B., Nesteruk, A. Mathematical model of the process of production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator. *Advances in Artificial Systems for Logistics Engineering III*. 2023. P. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-36115-9>.
2. Korniyenko, B., Ladieva, L., Nesteruk, A., Bereziianko, K. Control system for the production of granular mineral fertilizers in a fluidized bed. *The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2023. P. 38–41.
3. Korniyenko, B. Y., Ladieva, L. R., Pisarenko, V. G., Pisarenko, J. V., Nesteruk, A. O. Control systems for the granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2024. Vol. 60. No. 5. P. 726–735. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00710-6>.
4. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Новітні технології*. 2022. № 1(13). С. 47–65.
5. Нестерук А. О., Корнієнко Б. Я. Математичне моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. № 3(5). С. 20–28.
6. Нестерук А. О., Корнієнко Б. Я. Системи управління процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. № 1(7). С. 50–58.
7. Нестерук А. О., Корнієнко Б. Я. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. № 2(8). С. 51–61.
8. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). С. 133–139.
9. Wen C. Y., Deole N. R., Chen L. H. A study of jets in a three-dimensional gas fluidized bed. *Powder Technology*. 1982. Vol. 31. P. 175–184.

10. Basu P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: A review. *Chemical Engineering Science*. 1999. Vol. 54. P. 5547–5557.
11. Davidson J. F., Harrison D. *Fluidized particles*. Cambridge University Press, 1963.
12. Mahapatro A., Kalita P., Mahanta P., Saha U. K., Mallick S. S. Numerical simulation of gas-solid flow in a pressurized circulating fluidized bed riser. *Proceedings of the 11th International Conference on Fluidized Bed Technology (CFB-11)*. 2014. P. 323–328.
13. Shuai W., Guodong L., Huilin L., Juhui C., Yurong H., Jiaying W. Fluid dynamic simulation in a chemical looping combustion with two interconnected fluidized beds. *Fuel Processing Technology*. 2011. Vol. 92. P. 385–393.
14. Shuai W., Yunchao Y., Huilin L., Pengfei X., Liyan S. Computational fluid dynamic simulation based cluster structures-dependent drag coefficient model in dual circulating fluidized beds of chemical looping combustion. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51. P. 1396–1412.
15. Shuai W., Huilin L., Feixiang Z., Guodong L. CFD studies of dual circulating fluidized bed reactors for chemical looping combustion processes. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 236. P. 121–130.
16. Shuai W., Huang L., Zhenhua H., Huilin L., Guodong L., Dan L., Feixiang Z. Numerical modeling of a bubbling fluidized bed coal gasifier by kinetic theory of rough spheres. *Fuel*. 2014. Vol. 130. P. 197–202.
17. Wu S. Y., Baeyens J. Segregation by size difference in gas fluidized beds. *Powder Technology*. 1998.
18. Kuipers J. A. M., Hoomans B. P. B., van Swaaij W. P. M. Hydrodynamic models of gas-fluidized beds and their role for design and operation of fluidized bed chemical reactors. In: L.-S. Fan, T. M. Knowlton (Eds.). *Fluidization IX*. Engineering Foundation, 1998. P. 15–30.
19. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Advances in Intelligent Systems and*

*Computing*. 2021. Vol. 1247 AISC. P. 18–30. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_2).

20. Adetayo A. A., Antonyuk S., Heinrich S., Mörl L. Population balance modelling of drum granulation of materials with wide size distribution. *Powder Technology*. 1995. Vol. 82. No. 1. P. 37–49.

21. Vreman A. W., van Lare C. E., Hounslow M. J. A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64. No. 21. P. 4389–4398.

22. Hounslow M. J., Pearson J. M. K., Instone T. Tracer studies of high-shear granulation: II. Population balance modeling. *AIChE Journal*. 2001. Vol. 47. No. 9. P. 1984–1999.

23. van Peborgh Gooch J. R., Hounslow M. J. Monte Carlo simulation of size-enlargement mechanisms in crystallization. *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42. No. 7. P. 1864–1874.

24. Syamlal M., Rogers W., O'Brien T. J. *MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide*. National Technical Information Service, 1993. DOE/METC9411004, NTIS/DE94000871993.

25. Gidaspow D., Jiradilok P., Louge M. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach. In *Fluidization VII: Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 1992. P. 75–82.

26. Lun C. K. K., Savage S. B., Jeffrey D. J., Chepurniy N. Kinetic theories for granular flow: Inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *Journal of Fluid Mechanics*. 1984. Vol. 140. P. 223–256.

27. Grace J. R. Fluidized beds as chemical reactors. In: *Gas fluidization technology*. John Wiley & Sons, 1986. 428 p.

28. Корнієнко Б. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Вид-во: Аграр Медіа Груп, 2014.

29. van Deemter J. J., Drinkenburg A. A. H. In *Fluidization*. Netherlands University Press, 1967. P. 334–347.

30. Zhulynskyi A. A., Ladieva L. R., Korniyenko B. Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 17. P. 3108–3112.
31. Galata L., Korniyenko B. Research of the training ground for the protection of critical information resources by iRisk method. *Mechanisms and Machine Science*. 2020. Vol. 70. P. 227–237. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13321-4_21).
32. Korniyenko B. Y., Borzenkova S. V., Ladieva L. R. Research of three-phase mathematical model of dehydration and granulation process in the fluidized bed. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 12. P. 2329–2332.
33. Kornienko Y. M., Liubeka A. M., Sachok R. V., Korniyenko B. Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 12. P. 2203–2210.
34. Bieliatynskyi A., Osipa L., Kornienko B. Water-saving processes control of an airport. In *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 239. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905003>.
35. Korniyenko B., Galata L. Security estimation of the simulation polygon for the protection of critical information resources. In *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. Vol. 2318. P. 176–187.
36. Galata L. P., Korniyenko B. Y., Yudin A. K. Research of the simulation polygon for the protection of critical information resources. In *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. Vol. 2067. P. 23–31.
37. Korniyenko B., Osipa L. Identification of the granulation process in the fluidized bed. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13. No. 14. P. 4365–4370.
38. Korniyenko B., Galata L. Implementation of the information resources protection based on the CentOS operating system. In *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 1007–1011.
39. Zhuchenko A. I., Cheropkin Y. S., Osipa R. A., Korniyenko B. Y. Features of mathematical modeling of the first stage of paper web drying. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. No. 5. P. 647–656.

40. Kornienko Y. M., Haidai S. S., Sachok R. V., Liubeka A. M., Korniyenko B. Y. Increasing the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. No. 7. P. 890–900.
41. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of information protection system of corporate network based on GNS3. In *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2019. P. 244–248.
42. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2577. P. 281–291.
43. Kornienko Y. M., Sachok R., Tsepkalov O. V. Modelling of multifactor processes while obtaining multilayer humic-mineral solid composites. *Chemistry*. 2011. Vol. 20. No. 3. P. E19–E26.
44. Kornienko Y. N., Podmogilnyi N. V., Silvestrov A. N., Khotyachuk R. F. Current control of product granulometric composition in apparatus with fluidized layer. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1999. Vol. 31. No. 12. P. 97–106.
45. Babak V., Shchepetov V., Nedaiborshch S. Wear resistance of nanocomposite coatings with dry lubricant under vacuum. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2016. No. 1. P. 47–52.
46. Kravets P., Shymkovych V. Hardware implementation of neural network controller on FPGA for stability ball on the platform. In *2nd International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA)*. 2019. Vol. 938. P. 247–256.
47. Deka K. Modeling of air temperature using ANFIS by wavelet refined parameters. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2016. Vol. 8. No. 1. P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2016.01.04>.
48. Ghiasi-Freez J., Hatampour A., Parvasi P. Application of optimized neural network models for prediction of nuclear magnetic resonance parameters in carbonate reservoir rocks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2015. Vol. 7. No. 6. P. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.06.02>.

49. Malekzadeh M., Khosravi A., Noei A. R., Ghaderi R. Application of adaptive neural network observer in chaotic systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2014. Vol. 6. No. 2. P. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2014.02.05>.
50. Bhagawati K., Bhagawati R., Jini D. Intelligence and its application in agriculture: Techniques to deal with variations and uncertainties. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2016. Vol. 8. No. 9. P. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2016.09.07>.
51. Wang W., Cui L., Li Z. Theoretical design and computational fluid dynamic analysis of projectile intake. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2011. Vol. 3. No. 5. P. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2011.05.08>.
52. Patnaik P., Das D. P., Mishra S. K. Adaptive inverse model of nonlinear systems. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. 2015. Vol. 7. No. 5. P. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijisa.2015.05.06>.
53. Maronga S. *On the optimization of the fluidized bed particulate coating process* [Ph.D. Thesis]. Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology, 1998.
54. Korniyenko B. Y. The two-phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. No. 4. P. 41–44.
55. Корнієнко Б. Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2012. No. 2(10). С. 31–35.
56. Korniyenko B. Y. Modeling of transport processes in disperse systems. *The Advanced Science Journal*. 2013. No. 1. P. 7–10.
57. Корнієнко Б. Я. Мінеральні добрива. Двохфазна модель утворення в грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Хімічна промисловість України*. 2013. No. 1. С. 39–43.
58. Korniyenko B. Y. Research modes of a fluidized bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. No. 5. P. 12–15.

59. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. In *2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory*. 2020. P. 307–310.
60. Korniyenko B. Y., Ladieva L. R. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. *Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту*. 2019. С. 86–88.
61. Корнієнко Б. Я. Мінеральні добрива. Статична оптимізація процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 36–40.
62. Корнієнко Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3(15). С. 83–89.
63. Korniyenko B., Yudin O., Novizkij E. Open systems interconnection model investigation from the viewpoint of information security. *The Advanced Science Journal*. 2013. No. 8. P. 53–56.
64. Корнієнко Б. Я., Юдін О. К., Снігур О. С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1(54). С. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.18372/2410-7840.14.2056>.
65. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. *Моделювання та інформаційні технології*. 2018. № 83. С. 34–41.
66. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4(36). С. 316–322. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229>.
67. Johnsson F., Zijerveld R. C., Schouten J. C., van der Beek C. M., Leckner B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000. Vol. 26. P. 663–715.
68. Maudhuit A., Boillereaux L., el Mafadi S., Poncelet D. Development of process-control for coating in fluid bed. In *Proceedings of the 18th International Conference on Bioencapsulation*. Porto, Portugal, October 1–2, 2010.



69. Terashita K., Watano S., Miyanami K. Determination of end-point by frequency analysis of power consumption in agitation granulation. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1990. Vol. 38. P. 3120–3123.
70. Silva C. A. M., Parise M. R., Silva F. V., Taranto O. P. Control of fluidized bed coating particles using Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. Vol. 212. P. 445–458.
71. Scheibli D. *The use of FBRM for on-line particle size analysis in a fluid bed granulator* [Master's thesis]. 2007. No. 3576.
72. Hu X., Cunningham J. C., Winstead D. Study of growth kinetics in fluidized bed granulation with at-line FBRM. *International Journal of Pharmaceutics*. 2008. Vol. 347. P. 54–61.
73. Tok A., Goh X. P., Ng W., Tan R. Monitoring granulation rate processes using three PAT tools in a pilot-scale fluidized bed. *AAPS PharmSciTech*. 2008. Vol. 9. P. 1083–1091.
74. Buschmüller C., Wiedey W., Döscher C., Dressler J., Breitzkreutz J. In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2008. Vol. 69. P. 380–387.
75. Dyakowski T., Jeanmeure L. F. C., Jaworski A. J. Applications of electrical capacitance tomography for gas-solids and liquid-solids flows: A review. *Powder Technology*. 2000. Vol. 112. P. 174–192.
76. Wang H. G., Senior P. R., Mann R., Yang W. Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64. P. 2893–2902.
77. Корнієнко Б. Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2011. № 2(8). С. 5–9.

78. Корнієнко Б. Я. Аналіз математичних моделей процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: Збірник наукових праць*. 2017. № 15. С. 86–91.
79. Davidson J. F., Harrison D. *Fluidized Particles*. Cambridge University Press, 1963.
80. May W. G. Fluidized-bed reactor studies. *Chemical Engineering Progress*. 1959. Vol. 55. No. 12. P. 49–56.
81. de Vries R. J., van Swaaij W. P. M., Mantovani C., Heijkoop A. Design criteria and performance of the commercial reactor for the Shell chlorine process // *Proceedings of the 5th European Symposium on Chemical Reaction Engineering*. Amsterdam: Elsevier Publishing Corporation, 1972. С. B9-59–B9-69.
82. van Swaaij W. P. M., Zuiderweg F. J. Investigation of ozone decomposition in fluidized beds on the basis of a two-phase model // *Proceedings of the 2nd International Symposium in Chemical Reaction Engineering*. Amsterdam, 1972. С. B9-25.
83. van Deemter J. J., Drinkenburg A. A. H. (ред.). *In fluidization*. Amsterdam, Netherlands: Netherlands University Press, 1967. С. 334–347.
84. Orcutt J. C., Davidson J. F., Pigford R. L. Reaction time distribution in fluidized catalytic reactors. *Chemical Engineering Progress Symposium Series*. 1962. T. 58, № 38. С. 1–15.
85. Darton R. C. A bubble growth theory of fluidized bed reactors. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1979. T. 57. С. 134–138.
86. Partridge B. A., Rowe P. N. Chemical reaction in a bubbling gas-fluidised bed. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1966. T. 44. С. 335–348.
87. Grace J. R. Fluidized beds as chemical reactors // У кн.: Geldart J. R. (ред.) *Gas Fluidization Technology*. Chichester: John Wiley & Sons, 1986. С. 428.
88. International Organization for Standardization. *ISO 26262:2018. Road vehicles — Functional safety*. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
89. International Organization for Standardization. *ISO 13849:2015. Safety of machinery — Safety-related parts of control systems — General principles for design*. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.

90. International Organization for Standardization. *ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
91. International Organization for Standardization. *ISO 14001:2015. Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.
92. International Organization for Standardization. *ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
93. International Organization for Standardization. *ISO 9001:2015. Quality management systems — Requirements*. Geneva, Switzerland: ISO, 2015.
94. National Fire Protection Association. *NFPA 70: National Electrical Code*. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2023.
95. National Fire Protection Association. *NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery*. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2021.
96. Occupational Safety and Health Administration. *29 CFR 1910: Occupational Safety and Health Standards*. U.S. Department of Labor.
97. American National Standards Institute. *ANSI/ISA-84.00.01-2004 (IEC 61511 Mod) – Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*. Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2004.
98. International Electrotechnical Commission. *IEC 61508:2010 – Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*. 2010.
99. el Mafadi S., Hayert M., Poncelet D. Fluidization control in Wuster coating process. *Hemijaska Industrija*. 2003. T. 57. C. 641–644.
100. Poncelet D., Prata A. S., el Mafadi S., Boilleraux L. Optimisation and process control of fluid bed coating // *17th International Conference on Bioencapsulation*. Groningen, Netherlands, September 24–26, 2009.
101. Watano S., Tanaka T., Miyanami K. A method for process monitoring and determination of operational end-point of consumption in agitation granulation. *Advanced Powder Technology*. 1995. Vol. 6. P. 91–102.

102. Watano S., Takashima H., Miyanami K. Scale-up of agitation fluidized bed granulation by neural network. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*. 1997. Vol. 45. P. 1193–1197.

103. Nieuwmeyer F. J. S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der K., Maarschalk V., Vromans H. Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*. 2007. Vol. 24. P. 1854–1861.

104. Burggraeve A., van den Kerkhof T., Hellings M., Remon J. P., Vervaet C., de Beer T. Evaluation of in-line spatial filter velocimetry as PAT monitoring tool for particle growth during fluid bed granulation. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2010. Vol. 76. P. 138–146.

105. Huang J., Goolcharran C., Utz J., Hernandez-Abad P., Ghosh K., Nagi A. A PAT approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2010. Vol. 5. P. 58–68.

106. Корнієнко Б. Я. Мінеральні добрива. Оптимізація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 4. С. 69–73.

107. Корнієнко Б. Я., Ладієва Л. Р., Снігур О. В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20–23.

108. Корнієнко Б. Я. Математичне моделювання динаміки процесів переносу при зневодненні та гранулюванні у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2012. № 4(53). С. 84–90.

109. Корнієнко Б. Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. *Наукоємні технології*. 2013. № 3(19). С. 280–284.

110. Корнієнко Б. Я. Задачі оптимізації зневоднення та гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. *Вісник Національного технічного*

університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2014. № 1(12). С. 28–31.

111. Korniyenko B. Y. Static and dynamic characteristics of transport processes in disperse systems. *Наукоємні технології*. 2013. № 2(18). С. 166–170.

112. Корнієнко Б. Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив. Київ, 2014.

113. Корнієнко Б. Я., Ладієва Л. Р., Снігур О. В. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 2. С. 20–23.

114. Корнієнко, Я. М., Гайдай, С. С., Сачок, Р. В., Любека, А. М., Корнієнко, Б. Ю. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2020, № 15(7), с. 890–900.

115. Корнієнко, Б., Ладієва, Л. Mathematical Modeling Dynamics of the Process Dehydration and Granulation in the Fluidized Bed. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, № 1247 AISC, с. 18–30.

116. Корнієнко, Б. Я., Галата, Л. П. Дослідження імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів методом IRISK. *Моделювання та інформаційні технології*, 2018, вип. 83, с. 34–42.

117. Галата, Л. П., Корнієнко, Б. Я., Заболотний, В. В. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*, 2019, т. 43, № 3, с. 300–306.

118. Корнієнко, Б. Я., Галата, Л. П. Оптимізація системи захисту інформації корпоративної мережі. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*, 2019, вип. 19, с. 56–62.

119. Корнієнко, Б. Я., Галата, Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*, 2017, № 4 (36), с. 316–322. DOI: 10.18372/2310-5461.36.12229.

120. Корнієнко, Б. Я., Юдін, О. К., Снігур, О. С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*, 2012, № 1 (54), с. 20–25. DOI: 10.18372/2410-7840.14.2056.

121. Корнієнко, Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*, 2012, № 3 (15), с. 83–89. DOI: 10.18372/2310-5461.15.5120.

**ДОДАТОК 1. Програмна реалізація трьохфазної математичної моделі  
гранулювання у псевдозрідженому шарі, програмна реалізація системи  
управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі,  
програмна реалізація математичної моделі захисту критичних ресурсів  
виробництва мінеральних добрив**

**ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТРЬОХФАЗНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ  
ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

***Matlab-скрипт***

```
Op0 = 300;
Od0 = 293;
Oa0 = 393;
global Ga;
Ga = L;
L(545, 7)
global i;
i = 0;
initial_conditions = [Op0; Od0; Oa0];
tspan = [0, 150];
[t1, y] = ode45(@myODEs_handle, tspan, initial_conditions);
[t11, y1] = ode45(@myODEs_static, tspan, initial_conditions);
figure;
plot(t1, y(:, 1), 'r', t1, y(:, 2), 'b', t1, y(:, 3), 'g');
xlabel('Час, c');
ylabel('Температура, K');
legend('1', '2', '3');
figure;
plot(t11, y1(:, 1), 'r', t11, y1(:, 2), 'b', t11, y1(:, 3), 'g');
xlabel('Час, c');
ylabel('Температура, K');
legend('1', '2', '3');
```

```

function dydt = myODEs_handle(t, y)
    ap = 5.535;
    Sp = 7.07*10^-7;
    Op0 = 300;
    br = 1*10^7;
    b = 0.0542;
    Mh2o = 0.131;
    Qevap = 82300;
    R = 8.314;
    Opg = 383;
    Gd = 0.7;
    xd = 0.37;
    Qcryst = 82300;
    Mp = 1.5;
    Cp = 1420;
    rp = 1*10^-5;
    Od0 = 293;
    bR = 1*10^7;
    Md = 2;
    Cd = 1590;
    global Ga
    global i
    Ca = 1011;
    Oa0 = 393;
    ad = 5.535;
    Sd = 6.07*10^-6;
    Ma = 3.5;
    Kps = 0.001;
    es = 0.1;
    g0 = 0.1;
    Ros = 1230;
    a_s = 5.5;
    ds = 0.002;

```



```

Vdry = 0.47;
bd = (b*Mh2o*Sp*Qevap)/R;
Radg = (Gd/Mp)*((br/y(2))/((br/y(2))+0.35))^2;
aaa = ((-Radg*Cd)/Cp)-((ap*Sp)/(Mp*Cp))-((3*Kps)/(Sp*Mp*Cp));
bbb = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2)/(ds*Sp*sqrt(pi));
ccc = ((Radg*Cd*y(2))/Cp)+((Gd*xd*Qcryst)/(Mp*Cp))-
((Mp*Vdry*Qevap)/(Mp*Cp))+((ap*Sp*y(3))/(Mp*Cp));
Opb = (1*(aaa*y(2)+ccc))/(exp(1)^((-aaa*t)/2)-
(ccc*t)/(2*y(1)))+(bbb*y(1));
Yos = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2*y(1)*Opb)/(ds*Sp*sqrt(pi));
Phips = (6*Kps*y(1))/Sp;
i=i+115;
dydt1 = (ap*Sp*(1000000*y(3)-y(1))-((bd*(1*y(2)-
1*Opg))/y(2))+Gd*xd*Qcryst+Mp*Cp*rp*79000*Op0+((Gd/Mp)*((bR/y(2))/((bR/y(2)
)+0.35))^2*Mp*Cd*(y(2)-y(1)))-Yos-0.171*Phips)/(Mp*Cp);
dydt2 = (Gd*Cd*Od0-
((Gd/Mp)*((bR/y(2))/((bR/y(2))+0.35))^2*Mp*Cd*(10*y(2)-
9.25*y(1)))+(bd*(1*y(2)-1*Opg))/y(1))+ad*Sd*(1000000*y(3)-y(2)))/(Md*Cd);
dydt3 = (Ga(i, 7)*(Ca*Oa0-1.55*Ca*y(3))-ap*Sp*(y(3)-1000000*y(1))-
ad*Sd*(y(3)-1000000*y(2)))/(Ma*Ca);
dydt = [dydt1; dydt2; dydt3];
end
function dydt = myODEs_static(t, y)
ap = 5.535;
Sp = 7.07*10^-7;
Op0 = 300;
br = 1*10^7;
b = 0.0542;
Mh2o = 0.131;
Qevap = 82300;
R = 8.314;
Opg = 383;
Gd = 0.7;
xd = 0.37;
Qcryst = 82300;

```

```

Mp = 1.5;
Cp = 1420;
rp = 1*10^-5;
Od0 = 293;
bR = 1*10^7;
Md = 2;
Cd = 1590;
global Ga
Gab = Ga(1, 7);
Gab
Ca = 1011;
Oa0 = 393;
ad = 5.535;
Sd = 6.07*10^-6;
Ma = 3.5;
Kps = 0.001;
es = 0.1;
g0 = 0.1;
Ros = 1230;
a_s = 5.5;
ds = 0.002;
Vdry = 0.47;
bd = (b*Mh2o*Sp*Qevap)/R;
Radg = (Gd/Mp)*((br/y(2))/((br/y(2))+0.35))^2;
aaa = ((-Radg*Cd)/Cp)-((ap*Sp)/(Mp*Cp))-((3*Kps)/(Sp*Mp*Cp));
bbb = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2)/(ds*Sp*sqrt(pi));
ccc = ((Radg*Cd*y(2))/Cp)+((Gd*xd*Qcryst)/(Mp*Cp))-
((Mp*Vdry*Qevap)/(Mp*Cp))+((ap*Sp*y(3))/(Mp*Cp));
Opb = (1*(aaa*y(2)+ccc))/(exp(1)^((- (aaa*t)/2) -
(ccc*t)/(2*y(1)))+(bbb*y(1)));
Yos = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2*y(1)*Opb)/(ds*Sp*sqrt(pi));
Phips = (6*Kps*y(1))/Sp;

```

```

dydt1 = (ap*Sp*(1000000*y(3)-y(1))-((bd*(1*y(2)-
1*Op0))/y(2))+Gd*xd*Qcryst+Mp*Cp*rp*79000*Op0+((Gd/Mp)*((bR/y(2))/((bR/y(2)
)+0.35))^2*Mp*Cd*(y(2)-y(1)))-Yos-0.171*Phips)/(Mp*Cp);

dydt2 = (Gd*Cd*Od0-
((Gd/Mp)*((bR/y(2))/((bR/y(2))+0.35))^2*Mp*Cd*(10*y(2)-
9.25*y(1)))+(bd*(1*y(2)-1*Op0))/y(1))+ad*Sd*(1000000*y(3)-y(2)))/(Md*Cd);

dydt3 = (Gab*(Ca*Oa0-1.55*Ca*y(3))-ap*Sp*(y(3)-1000000*y(1))-
ad*Sd*(y(3)-1000000*y(2)))/(Ma*Ca);

dydt = [dydt1; dydt2; dydt3];

end

```

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ХАОСОМ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ У  
ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

***Matlab-скрипт***

```

Op0 = 300;
Od0 = 293;
Oa0 = 393;
uu1 = 1;
initial_conditions1 = [0.1; 0.1; 0.1; -1; -1; -1; uu1; Op0; Od0; Oa0];
tspan = [0, 150];
[t2, L] = ode45(@lambda, tspan, initial_conditions1);
figure;
plot(t2, L(:,7));
xlabel('t, [s]');
ylabel('Δu1, [kg/s]');
figure;
plot(t2, L(:, 4), 'r', t2, L(:, 5), 'b', t2, L(:, 6), 'g');
xlabel('t, [s]');
ylabel('δx1, δx2, δx3, [K]');
figure;
I = L(:,4);
plot(t2, I);
xlabel('t, [s]');
ylabel('I');
function f=lambda(t,L)

```

```
ap = 5.535;  
Sp = 7.07*10^-7;  
Op0 = 300;  
br = 1*10^7;  
b = 0.0542;  
Mh2o = 0.131;  
Qevap = 82300;  
R = 8.314;  
Opg = 383;  
Gd = 0.7;  
xd = 0.37;  
Qcryst = 82300;  
Mp = 1.5;  
Cp = 1420;  
rp = 1*10^-5;  
Od0 = 293;  
bR = 1*10^7;  
Md = 2;  
Cd = 1590;  
Ga = L(7);  
Ca = 1011;  
Oa0 = 393;  
ad = 5.535;  
Sd = 6.07*10^-6;  
Ma = 3.5;  
Kps = 0.001;  
es = 0.1;  
g0 = 0.1;  
Ros = 1230;  
a_s = 5.5;  
ds = 0.002;  
Vdry = 0.47;  
Mp0 = 1.53;  
Ca0 = 1015;
```

```

bd = (b*Mh2o*Sp*Qevap)/R;
Radg = (Gd/Mp)*((br/L(9))/((br/L(9))+0.35))^2;
aaa = ((-Radg*Cd)/Cp)-((ap*Sp)/(Mp*Cp))-((3*Kps)/(Sp*Mp*Cp));
bbb = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2)/(ds*Sp*sqrt(pi));
ccc = ((Radg*Cd*L(9))/Cp)+((Gd*xd*Qcryst)/(Mp*Cp))-
((Mp*Vdry*Qevap)/(Mp*Cp))+((ap*Sp*L(10))/(Mp*Cp));
Opb = (1*(aaa*L(9)+ccc))/(exp(1)^((-aaa*t)/2)-
(ccc*t)/(2*L(8)))+(bbb*L(8));
Yos = (12*(1-es^2)*g0*Ros*a_s^2*L(8)*Opb)/(ds*Sp*sqrt(pi));
Phips = (6*Kps*L(8))/Sp;
a1 = (ap*Sp)/(Mp*Cp);
a2 = (bd)/(Mp*Cp);
a3 = (xd*Qcryst)/(Mp*Cp);
a4 = Cd/(Mp0*Cp);
a5 = Yos/(Mp*Cp);
a6 = Phips/(Mp*Cp);
b1 = Od0/Md;
b2 = Mp/(Mp0*Md);
b3 = (bd)/(Md*Cd);
b4 = (ad*Sd)/(Md*Cd);
c1 = (Ca0*Oa0)/(Ma*Ca);
c2 = 1/Ma;
c3 = (ap*Sp)/(Ma*Ca);
c4 = (ad*Sd)/(Ma*Ca);
u1 = Ga;
u2 = Gd;
dydt1 = (ap*Sp*(10000000*L(10)-L(8)))-((bd*(1*L(9)-
1*Opg))/L(9))+Gd*xd*Qcryst+Mp*Cp*rp*79000*Op0+((Gd/Mp)*((br/L(9))/((br/L(9)
)+0.35))^2*Mp*Cd*(L(9)-L(8)))-Yos-0.171*Phips)/(Mp*Cp);
dydt2 = (Gd*Cd*Od0-
((Gd/Mp)*((br/L(9))/((br/L(9))+0.35))^2*Mp*Cd*(10*L(9)-
9.25*L(8)))+(bd*(1*L(9)-1*Opg))/L(8))+ad*Sd*(10000000*L(10)-
L(9)))/(Md*Cd);

```

```

dydt3 = (L(7)*(Ca*0a0-1.55*Ca*L(10))-ap*Sp*(L(10)-10000000*L(8))-
ad*Sd*(L(10)-10000000*L(9)))/(Ma*Ca);
f=[L(1)*(-a1-a4*u2-a6)-L(2)*(b2*u2)+L(3)*(c3);
L(1)*(a4*u2)-L(2)*(-b2*u2-b4)+L(3)*(c4);
L(1)*(a1)-L(2)*(b4)+L(3)*(-c2*u1-c3-c4);
L(4)*(-a1-a4*u2-0.001*a6)+L(5)*(a4*u2)-L(6)*(a1)*100000000;
L(4)*(b2*u2)+L(5)*(-b2*u2-b4)-L(6)*(b4)*100000000;
L(4)*(c3)*100000000+L(5)*(c4)+L(6)*(-c2*u1-c3-c4);
0.01*sign(-L(3)*c2*L(6));
dydt1; dydt2; dydt3;];
end

```

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАХИСТУ КРИТИЧНИХ РЕСУРСІВ  
ВИРОБНИЦТВА МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

***Matlab-скрипт***

```

tspan = [0, 15];
initial_conditions = [1; 0; 0; 0; 0; 0];
[t, L] = ode45(@lambda, tspan, initial_conditions);
figure;
plot(t, L(:, 1), 'r', t, L(:, 2), 'b', t, L(:, 3), 'g', t, L(:, 4),
'black', t, L(:, 5), 'm', t, L(:, 6), 'c');
legend('стан 1', 'стан 2', 'стан 3', 'стан 4', 'стан 5', 'стан 6');
xlabel('t, [s]');
ylabel('p1, p2, p3, p4, p5, p6');
b = L(73, 1)+L(73, 2)+L(73, 3)+L(73, 4)+L(73, 5)+L(73, 6);
b
function f=lambda(t,L)
    lam12 = 0.3;
    lam13 = 0.1;
    lam24 = 0.1;
    lam26 = 0.5;
    lam35 = 0.15;
    lam36 = 0.45;
    lam42 = 0.1;

```

```

lam46 = 0.8;
lam53 = 0.15;
lam56 = 0.7;
lam61 = 0.2;
lam62 = 0.05;
lam63 = 0.05;
dydt1 = -L(1)*(lam12+lam13)+L(6)*lam61;
dydt2 = L(1)*lam12-L(2)*(lam24+lam26)+L(4)*lam42+L(6)*lam62;
dydt3 = L(1)*lam13-L(3)*(lam35+lam36)+L(5)*lam53+L(6)*lam63;
dydt4 = L(2)*lam24-L(4)*(lam42+lam46);
dydt5 = L(3)*lam35-L(5)*(lam53+lam56);
dydt6 = L(2)*lam26+L(3)*lam36+L(4)*lam46+L(5)*lam56-
L(6)*(lam61+lam62+lam63);
f=[dydt1; dydt2; dydt3; dydt4; dydt5; dydt6;];
end

```

## **ДОДАТОК 2. Список публікацій здобувача, відомості про апробацію та впровадження результатів дисертації**

### **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

#### **Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus)**

1. B.Y. Korniyenko, L.R. Ladieva, V.G. Pisarenko, J.V. Pisarenko, A.O. Nesteruk. Control systems for the granulation of mineral fertilizers in a fluidized bed. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 60. No 5. 2024. pp. 726-735. ISSN: 1573-8337. DOI: 10.1007/s10559-024-00710-6.
2. Korniyenko B., Nesteruk A. Mathematical Model of the Process of Production of Mineral Fertilizers in a Fluidized Bed Granulator. *Advances in Artificial Systems for Logistics Engineering III*. 2023. pp. 55-64. ISSN: 2367-4520. ISBN: 978-3-031-36115-9. DOI: 10.1007/978-3-031-36115-9.

#### **Публікації у наукових фахових виданнях України**

3. Корнієнко Б.Я., Нестерук А.О. Система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром. *Новітні технології*. 2022. №1(13). С. 47-65.
4. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Математичне моделювання процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. №3(5). С. 20-28.
5. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Системи управління процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. №1(7). С. 50-58.
6. Нестерук А.О., Корнієнко Б.Я. Математична модель процесу виробництва мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром. *Інформаційні технології та суспільство*. 2023. №2(8). С. 51-61.



7. Корнієнко Б.Я., Нестерук А.О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34(73), №5. С. 133-139.

### **Публікації у збірниках матеріалів конференцій**

8. B. Korniyenko, L. Ladieva, L. Galata, O. Yakovenko, A. Nesteruk and V. Ivannikova. Web Application Critical Resources Protection. 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2021. pp. 256-261. DOI: 10.1109/ATIT54053.2021.9678541.

9. B. Korniyenko, L. Ladieva, L. Galata, A. Nesteruk and O. Matviichuk-Yudina. Information Control System for the Production of Mineral Fertilizers in the Granulator with a Fluidized Bed. 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2021. pp. 250-255. DOI: 10.1109/ATIT54053.2021.9678801.

10. A. Zhuchenko, L. Yaroshchuk, L. Ladieva, B. Korniyenko, A. Istomin and A. Nesteruk. Information System for Optimal Control of the Vacuum Membrane Distillation Process. 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2022. pp. 225-229. DOI: 10.1109/ATIT58178.2022.10024175.

11. Korniyenko B., Ladieva L., Nesteruk A., Bereziianko K. Control System for the Production of Granular Mineral Fertilizers in a Fluidized Bed. The 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). 2023. pp. 38-41. ISSN: 2770-4254. ISBN: 979-8-3503-5804-9.

12. Korniyenko B., Nesteruk A. Systems of information security in web applications. 10th International Scientific and Practical Conference “International Forum: Problems and Scientific Solutions” (June 26-28, 2022; Melbourne, Australia), 2022, pp. 365-372.

13. Korniyenko B., Nesteruk A. Functional safety standards for chemical production. 10th International Scientific and Practical Conference “Global and Regional

Aspects of Sustainable Development” (May 26-28, 2024; Copenhagen, Denmark), 2024, pp. 385-391.

14. Korniyenko B., Nesteruk A. Functional safety based on the IEC 61508 standard. 13th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (June 6-8, 2024; Melbourne, Australia), 2024, pp. 366-373.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні наукові положення, результати, рекомендації та висновки дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: 2021 IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) (м. Київ, грудень 2021 року); 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT) (м. Київ, грудень 2022 року); 10th International Scientific and Practical Conference “International Forum: Problems and Scientific Solutions” (м. Мельбурн, червень 2022 року); 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (м. Дортмунд, вересень 2023 року); 10th International Scientific and Practical Conference “Global and Regional Aspects of Sustainable Development” (м. Копенгаген, травень 2024 року); 13th International Scientific and Practical Conference «International Forum: Problems and Scientific Solutions» (м. Мельбурн, червень 2024 року).

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету інформатики та  
обчислювальної техніки Національного  
технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського»



Ярослав КОРНАГА

2024р.

## АКТ

про впровадження в навчальний процес кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» результатів дисертаційної роботи Нестерука Андрія Олександровича «Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Ми, що нижче підписалися: завідувач кафедри інформаційних систем та технологій, д.т.н. проф. Ролік О.І., професор кафедри інформаційних систем та технологій, д.т.н., проф. Корнієнко Б.Я., вчений секретар кафедри, к.ф.-м.н., доц. Гавриленко О.В. розглянувши матеріал навчально-методичного забезпечення курсів: «Програмування. Частина 2. Структура даних та алгоритми», «Алгоритми та математичні методи захисту інформації» які підготовлені та викладаються асистентом Нестеруком А.О., встановили, що в навчальному процесі на лабораторних заняттях, а також в процесі підготовки бакалаврських атестаційних робіт використовуються такі наукові результати, отримані дисертантом особисто:

- трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок;
- математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Нестерука А.О. в навчальний процес дозволило підвищити якість підготовки студентів освітнього рівня «Бакалавр» 126 «Інформаційні системи та технології» на кафедрі інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Завідувач кафедри  
інформаційних систем та технологій,  
д.т.н., проф.

Олександр РОЛІК

Вчений секретар кафедри  
інформаційних систем та технологій,  
к.ф.-м.н., доц.

Олена ГАВРИЛЕНКО

Професор кафедри  
інформаційних систем та технологій,  
д.т.н., проф.

Богдан КОРНІЄНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан факультету інформатики та  
обчислювальної техніки Національного  
технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»



Ярослав КОРНАГА

### АКТ

впровадження результатів виконання ініціативної теми «Інформаційна  
технологія захисту критичних ресурсів», д/р № 0121U110809

Даним актом підтверджується, що результати виконання ініціативної теми «Інформаційна технологія захисту критичних ресурсів» аспіранта кафедри інформаційних систем та технологій Нестерука А.О. впроваджується в учбовий процес на кафедрі інформаційних систем та технологій при вивченні дисципліни «Проектування інформаційних систем» (лекції); «Управління проєктами» (лекції).

Розроблена трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі з урахуванням гідродинаміки псевдозрідженого шару, передачі кінетичної енергії, розсіювання енергії, стискання крапель з частинками, їх адгезії до поверхні, кінетики сушіння розчину на поверхні частинок.

Розроблена система управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі для забезпечення ефективного тепло- та масообміну.

Розроблена інформаційну технологію виробництва мінеральних добрив, основними компонентами якої є наступні засоби: математична модель процесу виробництва мінеральних добрив, системи управління виробництвом мінеральних добрив, система захисту критичних ресурсів виробництва мінеральних добрив, математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних ресурсів.

Завідувач кафедри  
інформаційних систем та технологій,  
д.т.н., проф.

Олександр РОЛІК

Вчений секретар кафедри  
інформаційних систем та технологій,  
к.ф.-м.н., доц.

Олена ГАВРИЛЕНКО

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Проректор з наукової роботи  
Національного технічного  
університету України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського»

« Сергій СТИРЕНКО  
\_\_\_\_\_ 2024р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник директора  
Інституту кібернетики  
імені В.М. Глушкова НАН України  
Академік НАН України

 Олександр ПАЛАГІН  
\_\_\_\_\_ 2024р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи Нестерука А.О. «Інформаційна технологія  
управління виробництвом мінеральних добрив»

Ми, що підписалися нижче, від Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України старший науковий співробітник, кандидат технічних наук лабораторії систем віртуального оточення для організації наукових досліджень Писаренко Ю.В. та від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» асистент кафедри інформаційних систем та технологій Нестерук А.О. підтверджуємо, що наукові результати отримані Нестеруком Андрієм Олександровичем в його дисертаційній роботі «Інформаційна технологія управління виробництвом мінеральних добрив», а саме: трьохфазна математична модель процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі та система управління хаосом процесу гранулювання у псевдозрідженому шарі:

- передано у використання Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України для впровадження системи управління процесом гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі в інформаційно-аналітичну систему «АГРОТЕП»;

- містять практичну цінність та наукову новизну.

Застосування інформаційної технології управління виробництвом мінеральних добрив підвищить швидкість та ефективність виготовлення мінеральних добрив та дозволить досягти потрібного рівня якості при обмеженнях вартості виготовлення.

Національний технічний  
університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

 Андрій НЕСТЕРУК

Інститут кібернетики  
імені В.М. Глушкова НАН України

 Юлія ПИСАРЕНКО