

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАРКІНА ЛЮДМИЛА МИКОЛАЇВНА

УДК 681.5

**ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ ІЗ ЗЕРНОВОЇ
СИРОВИНИ ТА ЙОГО ВОДНО-ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ У СПИРТОВОМУ
ВИРОБНИЦТВІ**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

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



Л.М. Маркіна

Науковий керівник

Пальчевський Богдан Олексійович
доктор технічних наук, професор

*Ідентичність усіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:*

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



Химко О.М.

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Маркіна Л.М. Автоматизація процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності виготовлення етилового спирту із зернової суміші шляхом забезпечення стабільності параметрів напівфабрикату на початковій стадії підготовки зерна та приготування замісу з його водно-тепловою обробкою.

Виробництво етилового спирту із зернової сировини передбачає наявність складних біохімічних перетворень, зокрема ферментативний гідроліз крохмалю та подальше зброджування цукрів. Однією з важливих ділянок цього процесу є приготування замісу подрібненого зерна з водою та його водно-теплова обробка, які переводять крохмалю в розчинений стан за допомогою теплової обробки. Від стабільності проходження даного етапу залежить ефективність подальших етапів виробництва спирту.

Однак процес приготування замісу супроводжується сильними збуреннями, що ускладнює точне дотримання показників якості замісу. Відсутність ефективного автоматизованого контролю за показниками якості замісу в переважній більшості призводить до порушення технологічних режимів на наступних ділянках, що знижує якість етилового спирту та викликає перевищення витрат енергоресурсів та вихідних матеріалів. Тому задача автоматизації процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві є актуальною, що дозволить зменшити витрати вхідних матеріалів та забезпечить стабільність наступних етапів виробництва.

У роботі проаналізовано стан автоматизації на ділянках приготування спирту та отримано залежність між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю, що дозволило створити ефективну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

За результатами експериментальних досліджень сформовано залежність концентрації розчиненого крохмалю в замісі від густини, в'язкості, а також температури, що дало можливість обрати координати керування та розробити багатоконтурну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Проведено порівняльний аналіз функціональних схем автоматизації процесу приготування замісу та розроблено і реалізовано алгоритми, що дали змогу об'єднати всі стадії приготування замісу та його водно-теплової обробки в єдину автоматизовану систему.

Запропоновано підхід моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки, а саме створено узагальнену модель змішування як об'єкту керування, забезпечив можливість синтезу керуючих впливів і кількісної оцінки інформативних параметрів: концентрації крохмалю та об'єму замісу.

Використано потужність мішалки як непрямого давача в'язкості, що забезпечило можливість ефективного контролю показника, який є критично важливим для стабільності процесу приготування замісу.

За результатами проведених експериментів підтверджено доцільність урахування температури та в'язкості в системі регулювання процесу приготування замісу та водно-теплової обробки.

Вперше розроблена система автоматичного керування взаємозв'язаним процесом процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки, що дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість суслу.

Проведено дослідження системи керування з застосуванням ПІД-регулятора і LQR-регулятора, що дозволило обрати закон регулювання який забезпечує точність регулювання та підвищує якість керування у динамічних режимах.

Синтезовано LQR-регулятор для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки, що забезпечило покращення показників якості системи та підвищило швидкодію регулювання об'єму і концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Отримані рішення застосовані у виробничих умовах (зокрема на Луцькому, Марилівському та Львівському спиртових заводах) підтвердило зниження витрат зерна, ферментів і енергії, а також підвищення загальної ефективності процесу до 5% за рахунок стабілізації параметрів замісу та оптимізації водно-теплової обробки.

Ключові слова: заміс, водно-теплова обробка, концентрація розчиненого крохмалю, система автоматичного керування, регулятор, математична модель, алгоритм.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових виданнях, включених у бази даних Scopus та Web of Science:

1. Gumeniuk L., Markina L., Satsyk V., Humeniuk P., Lashch A. Application of multi-agent programming for modeling the viscosity state of mash in alcohol production. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 27-32.
2. Markina L., Palchevskyi B., Hrudetskyi R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology, 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 38-45.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сазик В. О. Вибір показників якості підготовки крохмалевмісного замісу автоматичного керування процесом. *Перспективні технології та прилади*, м. Луцьк, грудень 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024.

С. 111-117.

4. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту. Наукові нотатки, Вип. 75, Луцьк, 2023. С. 22-26.

5. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Оптимізація процесу керування приготуванням замісу в спиртовому виробництві. Перспективні технології та прилади, Вип. 20, м. Луцьк, червень 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 82-87.

6. Маркіна Л. М., Сазик В. О., Смолянкін О. О. Використання нечіткої логіки в системі автоматичного регулювання концентрації замісу при виробництві спирту. Перспективні технології та прилади, Вип. 19, м. Луцьк, грудень 2021 р. Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 78-84.

7. Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. Моделювання процесу замісу у змішувальному баку при виробництві спирту. World Science, № 6 (34), Vol. 2, June 2018. С. 52-56.

8. Кузьмич О. І., Маркіна Л. М., Якимчук Л. М. Моделювання та розробка системи керування процесом змішування на базі процесу водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 30-31, Луцький НТУ, 2018. С. 220-227.

9. Маркіна Л. М., Городинський Д. С. Методи нечіткої логіки в управлінні процесом водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 12, 2013. С. 123-128.

Тези доповідей на наукових конференціях, симпозіумах та семінарах:

10. Мачуга О. І., Решетило О. М., Смолянкін О. О., Маркіна Л. М., Сазик В.О. Аспекти підвищення ефективності виробництва спирту завдяки автоматизації технологічного процесу приготування замісу. Актуальні проблеми автоматизації та управління, матер. XII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Луцьк, 30 листопада 2024 р., Вип. 12, Луцьк, 2024. С. 41-44.

11. Маркіна Л. М., Гуменюк Л. О., Сазик В. О., Гуменюк П. О. Застосування штучного інтелекту в моделюванні в'язкості замісу спиртового виробництва на основі мультиагентних систем. Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-

технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2024, Луцьк, Україна, 28–30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 11-13.

12. Маркіна Л. М. PID-регулятори в системах автоматичного регулювання. Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів, зб. наук. праць VIII Міжнар. наук.-техн. конф. ТК-2024, м. Луцьк, 28-30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 39-40.

13. Lyudmila Markina, Viktor Satsyk, Oleksandr Reshetylo, Roman Hrudetskyi, Oleh Smoliankin and Nadiia Kuts. "Effective Ethanol Production Based on Intelligent Robust Control", Published in: Conference Program – 2024 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 11-13, 2024, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 11 OCTOBER 2024, paper ID 129.

14. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Основні принципи автоматичного керування процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування, матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 30 травня-1 червня 2023 р. Луцьк, 2023. С. 30-33.

15. L. Markina, B. Palchevskyi, R. Hrudetskyi, O. Smoliankin, Y. Melnychuk and N. Khrystynets, "Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology," Published in: Conference Program - 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 13-15, 2023, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 13 OCTOBER 2023, paper ID 6224.

16. Маркіна Л. М. Комп'ютерні технології для дослідження систем автоматичного регулювання. Сучасні тенденції та перспективи розвитку науки, освіти та технологій, зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., Житомир, 10 квітня 2023 р. Житомир, 2023. С. 57-58.

17. Маркіна Л. М. Особливості автоматизації водно-теплової обробки при виробництві спирту. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», 13 жовтня 2022 р., Івано-Франківськ, С. 81-82.

18. Сазик В. О., Маркіна Л. М., Плахотна А. О. Роль виконавчих механізмів у формуванні закону регулювання на прикладі водно-теплогового балансу змішувача при виробництві спирту. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». – Вип. 4. Луцьк: Луцький НТУ, 2016. С. 47-53.
19. Маркіна Л. М., Сазик В. О. Дослідження рівнів автоматизації процесу виробництва спирту на якість кінцевого продукту Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Вип. 3. Луцьк: Луцький НТУ, 2015. С. 17-21.
20. Маркіна Л. М. Аналіз автоматизованих систем управління при виробництві спирту. Актуальні проблеми автоматизації та управління : Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк: Луцький НТУ, 2014. С. 82–86.
21. Маркіна Л. М. Модель регулювання концентрації зернових замісів. Актуальні проблеми автоматизації та управління: Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк : Луцький НТУ, 2014. С. 70–76.

Патенти:

22. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмальовмісної сировини: пат. № UA151663; заявка № u202200653; заявл. 14.02.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 34.
23. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмаловмісної сировини: пат. № UA152727; заявка № u202202896; заявл. 12.08.2023; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14.

ABSTRACT

Markina L.M. Automation of processes of kneading from grain raw materials and its water-heat treatment in alcohol production. - Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.13.07 "Automation of control processes." – National Lviv Polytechnic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to improving the efficiency of ethyl alcohol production from grain mixtures by ensuring the stability of semi-finished product parameters at the initial stage of grain preparation and mash preparation with its water-thermal treatment.

The production of ethyl alcohol from grain raw materials involves the presence of complex biochemical transformations, in particular enzymatic hydrolysis of starch and subsequent fermentation of sugars. One of the important parts of this process is the preparation of a batch of crushed grain with water and its water-heat treatment, which transfer starch to a dissolved state by heat treatment. The stability of the passage of this stage depends on the effectiveness of the subsequent stages of alcohol production.

However, the process of preparing kneading is accompanied by severe disturbances, which complicates the exact observance of the quality indicators of kneading. The lack of effective automated control over the quality indicators of kneading in the vast majority leads to a violation of technological regimes in the following areas, which reduces the quality of ethyl alcohol and causes an excess of energy resources and raw materials. Therefore, the task of automating the processes of preparing kneading from grain raw materials and its water-heat treatment in alcohol production is relevant, which will reduce the costs of input materials and ensure the stability of subsequent stages of production.

The paper analyzes the state of automation in alcohol production areas and establishes the relationship between dry matter concentration, density, and viscosity, which made it possible to create an effective control system for the mash preparation process and its water-thermal treatment.

Based on the results of experimental studies, a dependence of the concentration of

dissolved starch in the dough on density, viscosity, and temperature was established, which made it possible to select control coordinates and develop a multi-loop control system for the dough preparation process and its water-thermal treatment.

A comparative analysis of functional diagrams for the automation of the mash preparation process was carried out, and algorithms were developed and implemented that made it possible to combine all stages of mash preparation and its water-thermal treatment into a single automated system.

An approach to modeling the dough preparation process and its water-thermal treatment was proposed, namely, a generalized mixing model was created as a control object, which made it possible to synthesize control influences and quantitatively evaluate informative parameters: starch concentration and dough volume.

The power of the mixer is used as an indirect viscosity sensor, which has made it possible to effectively control this parameter, which is critical for the stability of the dough preparation process.

The results of the experiments confirm the advisability of taking into account temperature and viscosity in the control system for the dough preparation and water-heat treatment process.

For the first time, an automatic control system was developed for the interrelated process of dough preparation and its water-heat treatment, which made it possible to increase the efficiency of the technological process and the quality of the wort.

A study of the control system using a PID controller and an LQR controller was conducted, which made it possible to select a control law that ensures control accuracy and improves control quality in dynamic modes.

An LQR controller was synthesized for an automated control system for the process of preparing mash and its water-thermal treatment, which improved the quality indicators of the system and increased the speed of regulation of the volume and concentration of dissolved starch in the mash.

The solutions obtained were applied in production conditions (in particular at the Lutsk, Marylivka, and Lviv distilleries), confirming a reduction in grain, enzyme, and energy costs, as well as a 5% increase in process efficiency due to the stabilization of

mash parameters and optimization of water-heat treatment.

Keywords: kneading, water-heat treatment, dissolved starch concentration, automatic control system, regulator, mathematical model, algorithm.

List of published works on the topic of the dissertation

Articles in scientific publications included in the Scopus and Web of Science:

1. Gumeniuk L., Markina L., Satsyk V., Humeniuk P., Lashch A. Application of multi-agent programming for modeling the viscosity state of mash in alcohol production. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, Vol. 15, No. 1, 2025. p. 27–32.
2. Markina L., Palchevskyi B., Hrudetskyi R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology, 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 38-45.

Articles in scientific professional editions of Ukraine:

3. Palchevsky B. O., Markina L. M., Satsyk V. O. Selection of quality indicators for the preparation of starch-containing kneading of automatic process control. Promising technologies and devices, Lutsk, December 2024 Lutsk: LNTU, 2024. P. 111-117.
4. Palchevsky B. O., Markina L. M. Intelligent control system for the process of kneading and its water-heat treatment in the production of alcohol. *Scientific Notes*, Vol. 75, Lutsk, 2023. S. 22-26.
5. Palchevsky B. O., Markina L. M. Optimization of the process of control of kneading in alcohol production. Promising technologies and devices, Vol. 20, Lutsk, June 2022 Lutsk: LNTU, 2022. P. 82-87.
6. Markina L. M., Satsyk V. O., Smolyankin O. O. The use of fuzzy logic in the system of automatic control of the concentration of kneading in the production of alcohol. Promising technologies and devices, Vol. 19, Lutsk, December 2021 Lutsk: LNTU, 2021. S. 78-84.

7. Smolyankin O. O., Markina L. M. Modeling the kneading process in a mixing tank during the production of alcohol. World Science, № 6 (34), Vol. 2, June 2018. P. 52-56.
8. Kuzmich O. I., Markina L. M., Yakimchuk L. M. Modeling and development of a mixing process control system based on the water-heat treatment process in the production of alcohol. Computer-integrated technologies: education, science, production, No. 30-31, Lutsk NTU, 2018. S. 220-227.
9. Markina L. M., Gorodinsky D. S. Methods of fuzzy logic in the control of the water-heat treatment process in the production of alcohol. Computer-integrated technologies: education, science, production, No. 12, 2013. P. 123-128.

Abstracts at scientific conferences, symposia and seminars:

10. Machuga O. I., Reshetilo O. M., Smolyankin O. O., Markina L. M., Satsyk V. Aspects of improving the efficiency of alcohol production by automating the technological process of kneading. Actual problems of automation and control, mother. XII Mezhnar. scientific-practical. Internet conf., Lutsk, November 30, 2024, Vol. 12, Lutsk, 2024. S. 41-44.
11. Markina L. M., Gumenyuk L. O., Satsyk V. O., Gumenyuk P. O. The use of artificial intelligence in modeling the viscosity of kneading alcohol production based on multi-agent systems. Collection of scientific papers of the VIII International Scientific and Technical Conference on Higher Education and Science TK-2024, Lutsk, Ukraine, May 28-30, 2024 Lutsk: LNTU, 2024. S. 11-13.
12. Markina L. M. PID regulators in automatic control systems. Progressive directions of development of automated technological complexes, Sat. science. works VIII Mizhnar. Science and Technology conf. TK-2024, Lutsk, May 28-30, 2024 Lutsk: LNTU, 2024. P. 39-40.
13. Lyudmila Markina, Viktor Satsyk, Oleksandr Reshetylo, Roman Hrudetskyi, Oleh Smoliankin and Nadiia Kuts. "Effective Ethanol Production Based on Intelligent Robust Control", Published in: Conference Program – 2024 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 11-13, 2024, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 11 OCTOBER 2024, paper ID 129.

14. Palchevsky B. O., Markina L. M. Basic principles of automatic control of the process of preparation of starch-containing kneading for the production of alcohol. Theoretical and experimental research in modern technologies of materials science and mechanical engineering, material IX Mezhnar. scientific-practical. conf., Lutsk, May 30-June 1, 2023 Lutsk, 2023. P. 30-33.
15. L. Markina, B. Palchevskyi, R. Hrudetskyi, O. Smoliankin, Y. Melnychuk and N. Khrystynets, "Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology," Published in: Conference Program - 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 13-15, 2023, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 13 OCTOBER 2023, paper ID 6224.
16. Markina L. M. Computer technologies for the study of automatic control systems. Current trends and prospects for the development of science, education and technology, Sat. theses additional. Intern. scientific-practical. conf., Zhytomyr, April 10, 2023 Zhytomyr, 2023. P. 57-58.
17. Markina L. M. Features of automation of water-heat treatment in the production of alcohol. All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Information Technologies in Education, Technology and Industry," October 13, 2022, Ivano-Frankivsk.
18. Satsik V. O., Markina L. M., Plakhotna A. O. The role of actuators in the formation of the law of regulation on the example of the water-heat balance of the mixer in the production of alcohol. International scientific and practical Internet conference of young scientists and students "Actual problems of automation and management." – Vol. 4. Lutsk: Lutsk NTU, 2016. S. 47-53.
19. Markina L. M., Satsyk V. O. Research on the levels of automation of the alcohol production process for the quality of the final product International scientific and practical Internet conference of young scientists and students "Actual problems of automation and management." - Vol. 3. Lutsk: Lutsk NTU, 2015. S. 17-21.
20. Markina L. M. Analysis of automated control systems in the production of alcohol. All-Ukrainian scientific and practical Internet conference of young scientists and students

"Actual problems of automation and management." Vol. 1. Lutsk: Lutsk NTU, 2014. S. 82-86.

21. Markina L. M. Model of grain substitution concentration regulation All-Ukrainian scientific and practical Internet conference of young scientists and students "Actual problems of automation and management." Vol. 1. Lutsk: Lutsk NTU, 2014. P. 70-76.

Patents:

22. Palchevsky B.O., Markina L.M. Method of automatic control of kneading in the production of ethyl alcohol from starch-containing raw materials: pat. № UA151663; application number u202200653; declared. 14.02.2022; publ. 25.08.2022, Byul. № 34.

23. Palchevsky B.O., Markina L.M. Method of automatic control of kneading in the production of ethyl alcohol from starch-containing raw materials: pat. № UA152727; application number u202202896; declared. 12.08.2022; publ. 05.04.2023, Byul. № 14.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ЗАМІСУ ІЗ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ.....	25
1.1. Опис процесу виробництва спирту.....	25
1.1.1. Основні стадії процесу виробництва спирту.....	25
1.2. Стадія підготовки замісу.....	29
1.2.1. Технічні засоби для проведення стадії підготовки замісу.....	32
1.3. Сучасний стан автоматизації процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки.....	34
1.3.1. Загальні проблеми, що виникають при автоматизації виробництва спиртової продукції.....	34
1.3.2. Схематичне представлення процесу водо-теплової обробки замісу, як об'єкту керування.....	38
1.3.3. Аналіз розвитку систем керування процесом приготування замісу.....	40
1.4. Основні проблеми і задачі дослідження автоматизації процесів формування замісу із зернової сировини і його водно-теплової обробки.....	42
Висновки до розділу 1.....	45
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ.....	46
2.1. Роль і вимоги до стадії приготування замісу в процесі виробництва спирту...46	
2.2. Особливості проведення і контролю стадії приготування і обробки замісу....48	
2.3. Інформаційна модель процесу приготування і обробки замісу.....51	
2.4 Вибір і обґрунтування показника концентрації розчиненої сухої речовини в замісі, придатного для автоматичного контролю.....54	
2.4.1. Аналіз процесу контролю в'язкості для визначення ступеню розчинення крохмалю в замісі.....56	
2.4.2. Експериментальне дослідження придатності параметрів в'язкості та густини	

замісу для контролю концентрації крохмалю в замісі.....	58
2.5 Вибір і обґрунтування функціональної схеми автоматизації керування процесом приготування замісу.....	62
Висновки по розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАМІСУ.....	68
3.1. Узагальнена модель процесу змішування.....	68
3.1.1. Модель процесу змішування з регулюванням концентрації крохмалю зміною витрати одного із вхідних потоків.....	70
3.1.2. Модель процесу змішування з регулюванням концентрації крохмалю зміною температури замісу.....	74
3.2. Обґрунтування використання ПІД-регулятора для регулювання підготовкою замісу.....	78
3.2.1. Дослідження динаміки процесу керування підготовкою замісу при використанні ПІД-регулятора.....	79
Висновки до розділу 3.....	90
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ...92	
4.1. Адаптація LQR-регулятора до процесу керування приготуванням замісу.....92	
4.2. Методологія проведення виробничого дослідження використання LQR - регулятора	95
4.2.1. Визначення параметрів моделювання.....95	
4.2.2. Особливості налаштування LQR-регулятора для керування процесом приготування замісу.....96	
4.3. Результати використання LQR- регулятора в виробничих умовах.....103	
Висновки до розділу 4.....115	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....117	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....119	
ДОДАТОК А.....132	
ДОДАТОК Б.....140	
ДОДАТОК В.....141	

ДОДАТОК Г.....	144
ДОДАТОК Д.....	145
ДОДАТОК Е.....	146
ДОДАТОК Є.....	148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Абревіатури

САР – система автоматичного регулювання

СР – сухі речовини

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

LQR – лінійний квадратичний регулятор

PID – пропорційно-інтегрально-диференціальний

БРУ – брагоректифікаційна установка

АСР – автоматизована система регулювання

ВТО – водно-теплова обробка

Умовні позначення

R – регулятор

W-вологість

d-ступінь подрібнення

T-температура

V- об'єм

C_{ср} – концентрація розчиненої сухої речовини

k_d – диференціальний коефіцієнт

k_p – пропорційний коефіцієнт

k_i – інтегральний коефіцієнт

T_i – час інтегрування

T_d – час диференціювання

Q – кількість

E – помилка

F – витрата

c – концентрація

V – об'єм

μ – вхідна змінна

ξ – змінна стану

T – період коливань

L – запізнення

δ – перерегулювання

t_p – час регулювання

J – функціонал якості

Q – вагова матриця відхилень станів

R – вагова матриця відхилень керувань

K – матриця керування

$C_{\text{зам}}$ – концентрація замісу

θ – час

φ – функція

ВСТУП

Актуальність теми. Спиртова промисловість є однією з провідних галузей харчової промисловості України і відіграє ключову роль у забезпеченні сировиною таких секторів, як фармацевтичний, харчовий, агропромисловий та паливно-енергетичний комплекси. Технологічний процес виробництва етилового спирту із зернової сировини передбачає складні біохімічні перетворення, зокрема ферментативний гідроліз крохмалю та подальше зброджування цукрів [17, 47].

Однією з важливих ділянок цього процесу є стадії приготування замісу та його водно-теплова обробка, які спрямовані на забезпечення рівномірного переведення крохмалю в розчинений стан за допомогою теплової обробки. Від ефективності проходження даного етапу залежать стабільність подальших етапів виробництва спирту.

Однак процес приготування замісу супроводжується структурними змінами водно-зернової суміші, які спричинені мікробіологічними та термохімічними змінами і тому спостерігається нестабільність процесу, що ускладнює точне дотримання параметрів відповідно до технологічного регламенту. Відсутність ефективного автоматизованого контролю за показником якості замісу в переважній більшості призводить до порушення технологічних режимів, що в свою чергу негативно відображається на якості етилового спирту та значному перевищенні витрат енергоресурсів.

В переважній більшості показником якості замісу є концентрація розчиненої сухої речовини. Однак даний показник є незручним для вимірювання, вимагає більшого часу для визначення та є непридатним для систем автоматичного керування. Тому виникла проблема, яка призвела до пошуку такого технологічного параметра, який би був придатний для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу.

Відповідно до проведеного аналізу та дослідження процесу приготування замісу та водно-теплової обробки було визначено, що таким показником є густина або в'язкість, які пов'язані з концентрацією розчиненого крохмалю, які виникають

під час термічної обробки.

Використання одного з цих параметрів для контролю концентрації розчиненого крохмалю в замісі дозволить інтегрувати його в систему автоматичного керування. Тому задача дослідження та розробка нових алгоритмів для системи керування концентрацією розчиненого крохмалю в замісі є актуальною, що дозволить підвищити динаміку зміни параметрів, зменшити витрати вхідних матеріалів та забезпечить стабільність наступних етапів виробництва.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати були використані в науково-дослідній роботі кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегровані технології» Луцького національного технічного університету «Дослідження термоферментативної обробки зернової сировини на базі нечіткої логіки» (№16/03-2014), «Розробка, оптимізація та моделювання систем керування виробничими процесами на базі комп'ютерно-інтегрованих технологій» (№ д/р 0116U001950), в рамках проекту ПЛ-НТУ Транскордонний обмін досвідом в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007–2013 та по співдружності з Луцьким спиртогорілчанним заводом.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності виготовлення етилового спирту із зернової суміші шляхом забезпечення стабільності параметрів на початковій стадії підготовки зерна та приготування замісу.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел сформулювати вимоги до системи автоматизації процесу виробництва спирту на стадії підготовки замісу із зернової сировини.
2. Провести аналіз існуючих систем керування та ідентифікувати інформативні технологічні параметри для синтезу системи керування процесом підготовки замісу.

3. Провести порівняння ефективності застосування класичних методів теорії автоматичного керування у взаємозв'язаній системі керування процесом приготування замісу.

4. Синтезувати керуючий вплив в двопараметричній взаємопов'язаній системі, що забезпечить необхідну якість керування процесом приготування замісу.

Об'єкт дослідження – процес приготування замісу та водно-теплової обробки зернової суміші при виробництві спирту.

Предмет дослідження – система автоматичного керування процесом приготування замісу.

Методи дослідження. В дисертаційній роботі застосовувались методи системного аналізу, математичне та імітаційне моделювання в програмному середовищі Matlab/Simulink. У роботі використана методологія теорії автоматичного керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримала подальший розвиток теорія автоматизації технологічного процесу виготовлення етилового спирту шляхом використання отриманих залежностей між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю замісу, що дало змогу створити ефективні системи автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

2. Отримали подальший розвиток підходи до моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки, зокрема створено узагальнену модель змішування як об'єкту керування, що забезпечило можливість синтезу керуючих впливів і кількісної оцінки інформативних параметрів: концентрації крохмалю та об'єму замісу.

3. Вперше розроблено систему автоматичного керування взаємозв'язаним процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки, що дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість сула.

4. Синтезовано LQR-регулятор для автоматизованої системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки, що забезпечило

покращення показників якості системи та підвищило швидкодію регулювання об'єму і концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Проведений порівняльний аналіз функціональних схем автоматизації процесу приготування замісу та розроблено і реалізовано алгоритми, що дали змогу об'єднати всі стадії приготування замісу та його водно-теплової обробки в єдину автоматизовану систему.

2. Використання потужності мішалки як непрямого давача в'язкості забезпечило можливість ефективного контролю показника, який є критично важливим для стабільності процесу приготування замісу.

3. Експериментально підтверджено доцільність урахування температури та в'язкості в системі регулювання процесу приготування замісу та водно-теплової обробки.

4. Досліджено системи керування з застосуванням ПІД-регулятора і LQR-регулятора, що дозволило обрати закон регулювання який забезпечує точність регулювання та підвищує якість керування у динамічних режимах.

5. Застосування розроблених рішень у виробничих умовах (зокрема на Луцькому, Марилівському та Львівському спиртових заводах) підтвердило зниження витрат зерна, ферментів і енергії, а також підвищення ефективності процесу на 5% за рахунок стабілізації параметрів замісу та оптимізації водно-теплової обробки

Апробація результатів дисертації. Результати, отримані в дисертаційній роботі, були апробовані та позитивно оцінені на ряді науково-технічних конференцій, а саме: XII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Актуальні проблеми автоматизації та управління», м. Луцьк, 30 листопада 2024 р.; VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів» ТК-2024, Луцьк, 28–30 травня 2024 р.; 14-та Міжнародна конференція IEEE DESSERT, Афіни, Греція, 11–13 жовтня 2024 р.; 13-та Міжнародна конференція IEEE DESSERT, Афіни, Греція,

13-15 жовтня 2023 р.; IX Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування», Луцьк, 30 травня – 1 червня 2023 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тенденції та перспективи розвитку науки, освіти та технологій», Житомир, 10 квітня 2023 р.; Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ, 13 жовтня 2022 р.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційне дослідження проведено дисертантом самостійно. Основні теоретичні положення та розробки, що характеризують наукову новизну дослідження, теоретичне і практичне значення його результатів, одержані дисертантом особисто.

Всі ідеї, експериментально-теоретичні дослідження та результати, які викладені в дисертації, автором отримано самостійно. У наукових працях у співавторстві здобувачем особисто виконано та запропоновано: [7, 9] – моделювання процесів змішування та водно-теплової обробки з використанням елементів нечіткої логіки в виробництві спирту; [5, 6, 11, 21] – математичне та імітаційне моделювання системи керування концентрацією крохмалю початкового етапу приготування замісу та його водно-теплової обробки; [8] – дослідження процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки та моделювання стану в'язкості замісу у спиртовому виробництві із застосування мультиагентного програмування; [13, 15] – розрахунок та налаштування параметрів LQR-регулятора для системи автоматичного керування процесом приготування замісу та його водно-тепловою обробкою; [12, 18] – розгляд та використання PID-регулятора для системи керування процесом приготування замісу; [10, 16, 19, 20] – аналіз існуючих автоматизованих систем управління та розробка моделей регулювання концентрації замісу; [22, 23] – розробка триконтурних систем керування підготовки замісу; [2, 4, 17] – розгляд основних принципів автоматичного керування процесом підготовки замісу та розробка інтелектуальної схеми взаємодії етапів приготування замісу; [1, 3] – вибір і обґрунтування показника якості початкового етапу підготовки зернового замісу та його водно-теплової обробки; [19] –

дослідження процесу приготування замісу в виробництві спирту; [14] – використання комп'ютерних технології для дослідження систем автоматичного регулювання.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 23 наукові праці, включаючи 7 статей у фахових наукових виданнях, 2 у наукових періодичних виданнях, які індексовано в наукометричній базі SCOPUS, 12 публікацій у матеріалах міжнародних та вітчизняних конференцій, 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел, додатків та має 95 сторінок основного тексту. Робота проілюстрована 44 рисунками, включає 11 таблиць, перелік літературних джерел із 119 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 151 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ЗАМІСУ ІЗ ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СПИРТУ

1.1. Опис процесу виробництва спирту

Як показує аналіз останніх досліджень процесу виробництва спирту надзвичайно велике значення для розвитку спиртової промисловості України набирає необхідність економії енергоносіїв шляхом розроблення та впровадження у виробництво ресурсо- та енергоощадних технологій нового покоління [6, 7, 10, 12, 45, 99]. Впровадження нових енергоощадних технологій вимагає автоматизувати основні етапи виробництва спирту та покращити якість процесів керування ними. Динаміка цих процесів в значній степені визначається коливанням характеристик сировини, що створює умови для частого коректування технологічних режимів, яке на даний час здійснюється оператором. Тому для автоматизації цих операцій необхідно здійснити їх аналіз і побудувати моделі, придатні для автоматичного керування.

Огляд стану автоматизації основних стадій виробництва спирту за даними літературних джерел показав, що найменш низький рівень автоматизації є характерним для процесу підготовки сировини, приготування замісу і його водно-теплової обробки. Це пов'язано з коливанням характеристик вхідної сировини, що впливає на вибір режимів [19, 42, 70, 78]. Оскільки в умовах України виготовлення спирту здебільшого здійснюється із зернової сировини, стан підготовки якої визначає якість спирту, то розглянемо детально стадію попередньої, а саме приготування зернового замісу. Тому важливим стає необхідність побудови моделей технологічних операцій, придатних для ефективного керування.

1.1.1. Основні стадії процесу виробництва спирту

Виробництво спирту є типовим прикладом біотехнологічного процесу. Він складається з трьох основних стадій:

1. Приготування замісу з крохмалистої сировини, наприклад зерна;

2. Дріжджегенерація та зброджування;
3. Виділення спирту з культуральної рідини (бражки) шляхом брагоректифікації.

Серед пріоритетних напрямів розвитку спиртової галузі на перше місце нині висуваються розробки зі створення енерго- та ресурсозберігаючих технологій отримання спирту із зерна. Процес виробництва спирту є слабозамкненою хіміко-технологічною системою. Ця особливість процесу зумовлена тим, що матеріальний потік не має зворотних зв'язків (рис.1.1). Це дозволяє провести аналіз процесу виробництва спирту на кожній із основних стадій [17, 94].

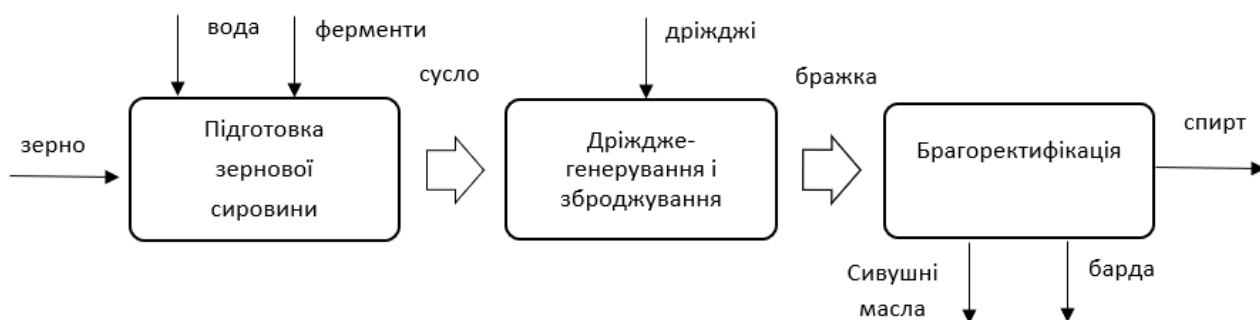


Рис. 1.1. Спрощена схема матеріальних потоків при виробництві спирту

Першою стадією виробничого процесу є підготовка оцукрованого замісу із зернової сировини. Для цього зерно піддається очищенню і подрібненню, змішується з водою, утворюючи заміс, який піддається термічній обробці (розварюванню) і оцукрюванню під дією ферментів солоду або ферментних препаратів, отриманих шляхом мікробіологічного синтезу [32].

Під час використання у спиртовому виробництві різних видів зернової сировини необхідно враховувати не лише крохмаль, як основний компонент зерна, але й наявні у ньому білкові речовини, некрохмальні полісахариди тощо [18]. Хімічний склад зернової сировини наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Хімічний склад зерна

Вид зерна	Крохмал	Білок	Вуглеводи	Клітковина	Жир	Зола
Пшениця озима	48-57%	10	70	1,6	1,7	1,7
Пшениця яра	48-57%	13,2	66,1	1,8	2,0	1,9
Кукурудза	58-60%	9	69,2	2,2	4,4	1,3
Ячмінь	43-55%	9,5	67	4,0	2,1	2,5
Жито	65%	7,2	73,2	1,6	1,5	1,5

Усереднений хімічний склад зерна пшениці, кукурудзи і ячменю наведено в таблиці 1.1 [18, 75]. У зерні міститься в середньому 14-15% вологи, решта - сухі речовини, що підтверджується літературними даними. У сухих речовинах, крім компонентів, наведених у таблиці 1.1, містяться також вітаміни, мінеральні речовини і ферменти.

Основною проблемою використання зерна для виготовлення спирту є забезпечення чистоти сировини, в першу чергу усуненню мікробіологічних забруднень і механічних домішок [2, 19].

Окрім зерна при виробництві спирту використовують ферменти, які виконують роль каталізаторів білкового походження [46]. Вони сприяють інтенсифікації технологічних процесів, підвищення виходу готового продукту, поліпшенню якості готової продукції [3, 15, 101].

Аналізуючи використання ферментних препаратів пониженої кислотності рН (3,4–4,5) із швидким підвищенням температури розріджування для кукурудзи і для жита спостерігається значне підвищення в'язкості замісу, що імовірно обумовлено коагуляцією білків із наступною адсорбцією на них ферментів, що і призводить до зниження гідролітичної активності α -амілази [5, 20, 33, 34, 43]. Тому процес керування повинен врахувати особливості приготуванні замісу і забезпечити поступове підвищення температури [1, 34]. Використання концентрованих ферментних препаратів потребує корегування технологічного режиму в кожному

конкретному випадку, залежно від особливостей складу зернової культури, що переробляється [14, 17], що також ускладнює автоматичне керування процесом.

Другою, основною стадією виробництва спирту, на якій утворюється цільовий продукт, є бродіння. Найбільшого поширення набрав безперервний спосіб бродіння, який здійснюється в бродильних ферментаторах, що з'єднані послідовно. Перед початком процесу в головний ферментатор вводять культуру посівних дріжджів-цукроміцетів, вирощених в посівних ферментаторах, і подають потік оцукрованого замісу [50].

Третьою стадією виробництва є виділення спирту з бражки і його очищення від домішок. Ця стадія є завершальною і здійснюється в брагоректифікаційних установках (БРУ) [35]. Існує ряд причин, що порушують стійкість технологічного процесу та призводять до нештатної передаварійної ситуації на спиртзаводі, тобто до зупинки відбору спирту, подачі бражки та до перезапуску всієї системи. Перш за все це стосується нестабільності якісних показників пари: тиск подачі пари з котельні нестабільний і знаходиться в межах 3 - 5 бар, температура пари може бути нижче заданої. Окрім того, відбувається зміна температури охолодженої води залежно від пори року, що змінює умови конденсації пари.

Кожна основна стадія в цілому є багатовимірним об'єктом керування оскільки її стан характеризується декількома вихідними змінними [104]. Для підтримання режимів роботи на будь якій із основних стадій необхідно керувати декількома регульованими змінними та одночасно впливати на множину вхідних змінних. Причому зміна однієї вхідної величини, приводить до зміни всіх або хоча б декількох вихідних величин. Саме цей аспект і робить всі три основні стадії багатовимірним, багатозв'язним, нелінійним об'єктом керування [83]. Слід додати, що відхилення параметрів напівфабрикатів на початкових стадіях впливають на стабільність проходження подальших стадій процесу. Така обставина підвищує вимоги до якості керування особливо на початкових стадіях процесу, а саме на стадії підготовки замісу із зернової сировини і його водо-теплової обробки.

1.2. Стадія підготовки замісу із зернової сировини

Як відомо, однією з найвідповідальніших стадій виробництва спирту з крохмалевмісної сировини є розварювання, яке, в свою чергу, залежить як від характеристик зернової сировини, так і від режимів її підготовки і водно-теплової обробки. Тому на сьогоднішній день при одержанні спирту із зерна точність технологічних режимів при проведенні першої основної стадії є однією із ключових проблем у технології галузі. З іншої сторони, складність процесів на цій стадії та значні коливання характеристик вхідних матеріалів загальмували автоматизацію керування дільницею, що реалізує підготовку оцукрованого замісу із зерна.

Мета приготування замісу і його водно-теплової обробки полягає в зруйнуванні клітинної структури сировини і переведенні крохмалю в розчинний стан. Це необхідно для забезпечення оптимальних умов оцукрювання крохмалю амілолітичними ферментами і гідролізу білкових речовин на подальших стадіях виробництва спирту [18, 74].

Стадія підготовки замісу із зернової сировини і його водно-теплової обробки складається із таких технологічних операцій:

- подрібнення сировини;
- змішування помелу з водою і утворення замісу;
- водно-теплова обробка замісу.

Операція подрібнення сировини. Порушення клітинної структури сировини досягають подрібненням її на дробарках і спеціальних машинах з наступною водно-тепловою обробкою замісів із помелу сировини.

На всіх спиртових заводах України, що переробляють крохмалевмісну сировину, встановлені безперервно діючі апарати для подрібнення, водно-теплової обробки й оцукрювання розвареної маси.

На стадії підготовки зерна до розварювання, згідно вимог технологічного регламенту, контролюється якість подрібнення. Показник якості подрібнення зерна характеризується проходом 60-95% подрібненої маси через сито з діаметром отворів в 1 мм [41].

Операція підготовки замісу. Для приготування замісу помел зерна змішують з водою у співвідношенні 2,5-3,0 л на 1 кг помелу. Кількість води змінюють у залежності від крохмалистості і вологості зерна з урахуванням того, щоб концентрація замісу, яка визначається лабораторним методом, за цукроміром становить 18-20 % [18].

Змішування зернового помелу з водою проводиться в змішувачі для забезпечення однорідності суміші. Процес змішування визначається конструкцією змішувачів, частотою обертання мішалки і температурою води при змішуванні, яка не повинна перевищувати 50 °С, тобто бути нижче температури клейстеризації [68].

Температуру замісу регулюють у залежності від дисперсності помелу зерна та його виду. Для замісів із грубого помелу вона повинна бути 40-45°С. Оптимальні температури для приготування замісів із високодисперсних помелів зерна пшениці, ячменю і жита - 60°С, сорго - 70°С, кукурудзи - 80°С. Для приготування замісу використовують воду від дефлегматорів брагоректифікаційної установки. Підігрівають заміс вторинною парою [35, 44]. Підтримання необхідної концентрації при постійній подачі помелу регулюють автоматичною подачею води (гідромодуль). В залежності від крохмалистості та вологості зерна, заміс безперервно переміщується мішалкою. Температура замісу підтримується в межах 30-90 °С автоматичною подачею холодної води, гарячої води, фільтрату барди та пари на барботер [18, 41, 106].

Операція водно-теплової обробки замісу. Крохмаль, що розчиняється на даній стадії та інші компоненти замісу необхідно перевести в розчинений стан для отримання і зброджування оцукреного зернового замісу. Ця операція передбачає обробку замісу парою, а режими багато в чому залежать від властивостей сировини, що переробляється [2]. Для зменшення в'язкості замісу використовують бактеріальні препарати α -амілази. Використання цих ферментних препаратів приводить до розрідження замісів, не викликає значного накопичення цукрів і не впливає на втрати зброджуваних речовин при розварюванні. Однією з істотних проблем проведення стадії водно-теплової обробки висококонцентрованого зернового замісу є різке збільшення в'язкості водно-зернової суспензії, яке

відбувається в діапазоні температур 55-90 °С (рис. 1.2) [32].

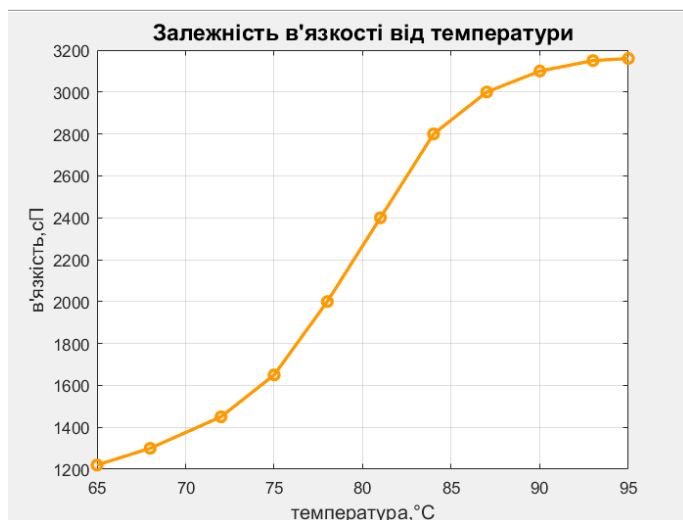
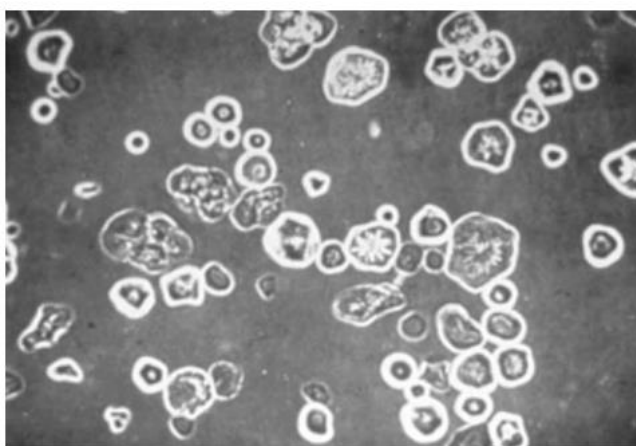
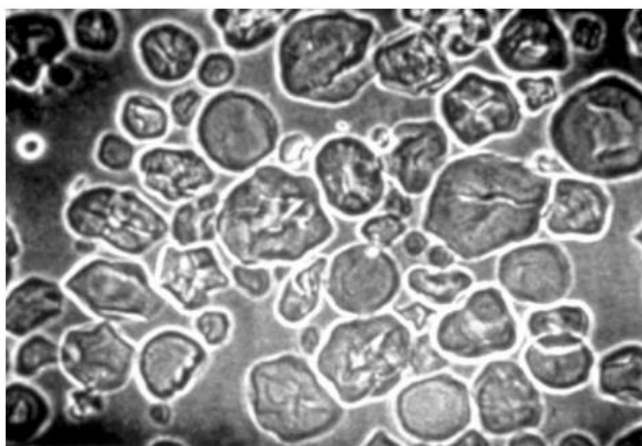


Рис. 1.2. Зміна в'язкості водно-зернової суспензії в процесі її нагріву від 65⁰С до 95⁰С

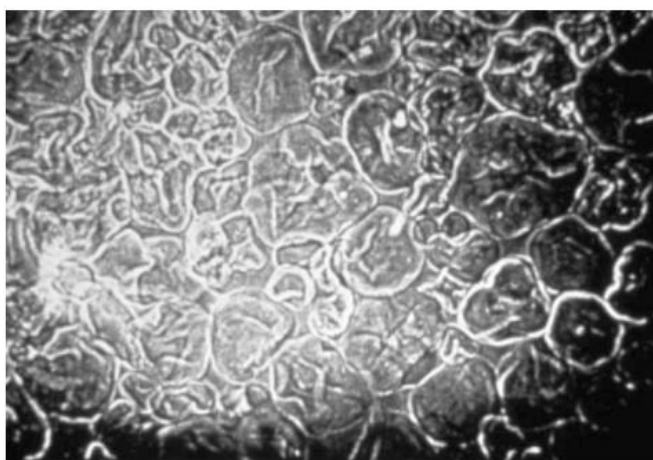
Це пов'язано з тим, що двофазна суміш (вода-зернові частки) змінює свої структурно-механічні властивості через початок процесу клейстеризації крохмалю [21, 74]. Гранули зерна під час клейстеризації при зміні температурних режимів процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки зображені на рисунку 1.3.



а)



б)



в)

Рис. 1.3. Гранули крохмалю зерна при температурі: а) 67°C; б) 75°C; в) 85°C [74]

На сьогодні практично на всіх спиртових заводах України впроваджено технологію низькотемпературного розварювання крохмалевмісного замісу на основі гідро-ферментативної обробки з використанням концентрованих ферментних препаратів [12, 22, 32]. При нагріванні з водою білки набухають і денатуруються, крохмаль клейстерізується і переходить в колоїдний розчин.

1.2.1. Технічні засоби для проведення стадії підготовки замісу

У класичній схемі автоматизації ділянки підготовки зерна і приготування замісу (рис. 1.4) зерно зі складу системою транспортерів подається в бункер (1). Далі зерно подається норією (2). З силосів (3) сировина подається норією (4) через

магнітний сепаратор (5), де проходить видалення металевих домішок. Потім зерно надходить на зерноочисну машину (6), де проходить видалення легких

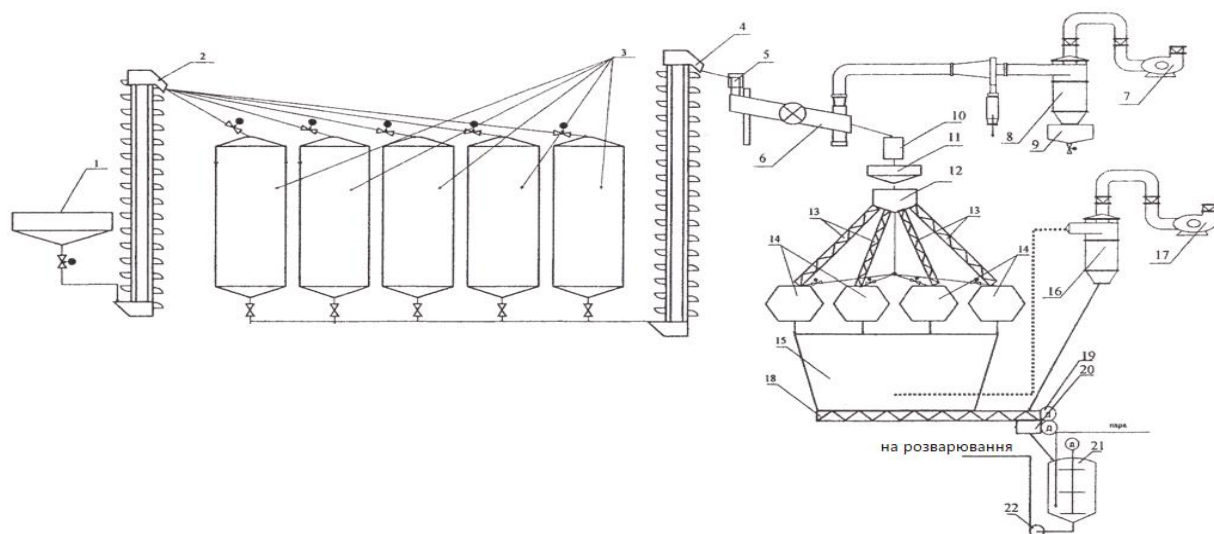


Рис. 1.4. Дільниця для підготовки зернового замісу при виробництві спирту

сміттєвих, де проходить видалення легких сміттєвих, мінеральних, органічних та зернових домішок, які за допомогою системи аспірації (вентилятора (7) та циклона (8) відбираються в бункер відходів (9). Зерно, яке надходить у виробництво, спочатку очищають від механічних домішок на повітряно-ситовому і магнітному сепараторах [13, 18, 22, 23]. В зерні, яке далі надходить на переробку допустимо не більше 1% домішок.

Після зерноочисної машини (6) зерно поступає в передваговий бункер (10), звідти на автоматичну вагу безперервної дії (11). Зважене зерно поступає в бункер (12), який забезпечує рівномірне розподілення зерна за допомогою шнеків (13) на ситові дробарки (14). Одним із ключових етапів в підготовці зернової сировини при виробництві спирту є попереднє подрібнення [8, 30]. Операція подрібнення клітинної структури сировини забезпечує ступінь дисперсності матеріалу, який визначає витрату пари на розварювання замісу і, як наслідок, виробничу собівартість продукції. Помел повинен бути однорідним: прохід через сито діаметром 1,0 мм повинен бути не менше 95%.

Подрібнене зерно (помел) з дробарок поступає в бункер (15). Дробарки

працюють із системою аспірації (вентилятора (17) та циклона (16). З бункера (15) помел шнеком (18), який працює за допомогою мотор-редуктора (19), подається на дисмембратор (20).

1.3. Сучасний стан автоматизації процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки

1.3.1. Загальні проблеми, що виникають при автоматизації виробництва спиртової продукції

Відмінність спиртової промисловості від інших галузей виробництва (нафтова, хімічна тощо) полягає в тому, що вона пов'язана з біохімічними і мікробіологічними процесами, які є основою виробництва спирту. Використання хімічної діяльності мікроорганізмів тягне за собою вимогу підвищеної точності підтримки технологічних режимів виробництва, що може бути забезпечено тільки надійними методами автоматичного керування процесами.

Незадовільна робота обладнання та несвоєчасний контроль і регулювання основних параметрів технологічного процесу часто призводить до підвищених втрат, зниженню якості кінцевого продукту, зниженню продуктивності установок і значної перевитрати енергії й вторинних ресурсів. Все це істотно впливає на економічні показники виробництва спирту і обумовлює зайву витрату матеріальних цінностей, у першу чергу таких важливих продуктів, як зерно, ферменти тощо. Практично всі виробничі підрозділи компаній, що очолюють ринок спирту, намагаються оснащувати свої виробництва сучасними, надійними системами автоматизації [10, 55].

Однією із основних переваг застосування автоматизованої системи керування технологічним процесом є зниження (аж до повного виключення) впливу так званого людського фактору на процес, мінімізація втрат сировини, покращення якості вихідного продукту і суттєве підвищення ефективності виробництва. Діючі системи автоматизації вітчизняних спиртових заводів, як правило, використовують одноконтурні системи стабілізації, побудовані на основі

стандартних алгоритмів керування з використанням класичних методів регулювання. Такого роду підходи не задовільняють прогресуючі вимоги, що висуваються до управління в умовах невизначеності, не забезпечують оперативність прийняття рішень і оптимізацію режимів основних процесів спиртового виробництва, не дають можливості для своєчасного реагування на різні технологічні ситуації, що виникають в результаті зміни якісних характеристик сировини, значному рівню невизначеності поведінки об'єкта, спільним впливом діючих збурень. Це часто призводить до нераціональної витрати енергоресурсів і зменшення продуктивності [96].

Проведений аналіз сучасного спиртового виробництва показав, що на більшості з них вже впроваджені сучасні системи автоматизованого керування процесами брагоректифікації (основний процес спиртової технології) на основі мікропроцесорних систем автоматичної підтримки технологічних режимів [38-40]. Асортимент застосовуваних датчиків, виконавчих механізмів, а також мікропроцесорних контролерів забезпечує недосяжний раніше рівень точності вимірювань, обробки (передачі) сигналів у системах автоматизації спиртових підприємств.

Типові системи керування, які описані в працях науковців Ровінського Л.А., Іванова В.В., Вострікова С. В., Солонінова Д. О. та Бушина М. А. вказують на наступні особливості та проблеми [84, 88-90, 91, 92, 109, 113]:

- передбачене лише управління головними ділянками, такими як співвідношення витрат зерна та води; перекачування на наступні ділянки здійснюється вручну, пуск та зупинка обладнання аналогічно;

- передбачені також окремі ділянки стабілізації вхідних потоків витрати зерна і води, регулювання їх співвідношення, рівнів в змішувачі-передрозварнику, варильному апараті, паросепараторі, оцукрювачі і проміжному збірнику;

- відповідність між подачею і витратою продуктивних потоків підтримується шляхом регулювання рівнів в ємностях і агрегатах за допомогою впливу на відповідні покази стоків і притоків.

Для цих систем автоматичного керування характерним є ряд недоліків, а саме:

- низька якість управління;
- виникнення інтегруючої помилки між необхідним і дійсно введеним в виробництво крохмалем, що в кінцевому рахунку призводить до зниження ефективності роботи наступних ділянок і заводу в цілому;
- час обробки напівпродукту (час перебування в апараті) при регламентованих режимних параметрах не завжди витримується, що в кінцевому рахунку призводить до збільшення необоротних втрат і перевитрат енергоресурсів;
- більша частина таких автоматизованих систем керування технологічними процесами спиртового виробництва залишає фіксацію параметрів ходу процесів за людиною.

Аналіз літератури показує, що суттєвих змін в типових системах управління в останній час не відбулося, тільки є декілька виключень. Зокрема у монографії [60] проведено приклад побудови найпростішої структури попереджувального (предиктивного) регулювання, де приділено увагу методиці вибору оптимальних точок регулювання і питань енергоспоживання виробництва. Часто використовуються найпростіші одноконтурні системи управління з прогнозом поведінки параметра за спрощеною нелінійною моделлю процесу [108]. Для створення інтелектуальної системи керування останнім часом часто використовують як принципи нечітких множин, так і штучні нейронні мережі. Можливість навчання є однією з головних переваг нейронних мереж перед традиційними алгоритмами. Нейромережа, яка є навченою, здатна опрацювати перекручені та інколи неповні вхідні параметри і видавати на виході правильний результат. Також в [115] розглянуто систему безперервного контролю якості приготування суміші із використанням штучних нейронних мереж для визначення сухого залишку суміші.

Порівняльний аналіз нелінійного прогнозного керування з традиційними алгоритмами проведено в [64]. Система попереджувального керування з використанням методу побудови математичної моделі розроблена в статті [57], наведені результати випробування на виробництві. У монографії [49] і статті [73] розглянуті питання створення системи попереджувального керування, їх

надійності, синтезу в середовищі Matlab. У статті [68, 95] проведено порівняння декількох популярних систем попереджувального керування та простих систем для ректифікаційних колон, показано що NPMС (модельне управління нелінійними процесами) є найбільш ефективною з розглянутих систем. У статті [63] - наведено приклад застосування найпростішого регулятора з моделлю для автоматизації колони ректифікації, показано, що при певному підході можна отримати результати, які можна порівняти з використанням системи на наближено налаштованому ПІ регуляторі.

Питання розробки нейронних і нечітких регуляторів для ректифікаційних колон описано в ряді публікацій, де підтверджена їх ефективність. Перш за все, це монографія [48]. В роботі [111] наведено приклад використання самонавчального нейронного регулятора для поділу бінарної суміші. У статті [56, 62] розглянуто приклад використання нейронного регулятора для поділу 3-х компонентної суміші в ректифікаційній колоні, проведено порівняння системи з ПІ регулятором.

Існує ряд причин, що порушують стійкість технологічного процесу та призводять до зупинки відбору спирту, подачі бражки та до перезапуску всієї системи.

Перша і одна з основних причин криється в якісних показниках зернової сировини, їх характеристики нестабільні не тільки від партії до партії, але і в межах однієї партії, яка супроводжується різним розміром зерна та вологістю.

Друга причина пов'язана із зміною температури води залежно від пори року. До третьої причини можна віднести вид і концентрацію ферментів, що подаються для утворення замісу, характеристики дріжджів тощо.

Для ефективного автоматизованого керування кожною підсистемою на стадії підготовки замісу в цілому необхідно забезпечити стійкість технологічного процесу, не допустивши виникнення викладених вище причин створення нештатних ситуацій в роботі.

Враховуючи широке використання зернової сировини для приготування замісу, виникла необхідність пошуку шляхів зменшення енерговитрат, що є можливим завдяки сучасним методам керування та передбачає застосування

системного аналізу для дослідження множини станів функціонування системи, що має ряд особливостей, якими безумовно не можна знехтувати [11, 98].

Однак інформації про використання таких систем управління для автоматизації процесів підготовки замісу і його водно-теплової обробки в літературі не знайдено.

1.3.2. Схематичне представлення процесу водно-теплової обробки замісу, як об'єкту керування

Як відзначають дослідники процесів виробництва спирту при сучасному рівні виробництва початком забезпечення стабільно високої якості спирту при мінімальних витратах енергетичних ресурсів є отримання на стадії підготовки зернової сировини заданої концентрації крохмалю при отриманні замісу [39, 53, 85]. Ця концентрація замісу створюється на операції водно-теплової обробки зернової сировини.

Задачу отримання потрібної концентрації замісу необхідно вирішувати шляхом впровадження принципово нових підходів та алгоритмів керування формуванням замісу із подрібненого зерна, ферментів і води, а також управлінням водно-тепловою обробкою зернової сировини, для яких критерієм управління є вибір таких показників якості підготовки замісу, які забезпечать необхідну якість спирту на наступних стадіях при умові мінімізації витрат енергетичних носіїв та матеріальних і фінансових ресурсів.

З точки зору автоматичного керування, змінні що характеризують динамічну поведінку будь-якого технологічного процесу, можна класифікувати на дві групи [107]:

1. Вхідні змінні (u) представляють вплив оточення на процес.
2. Вихідні змінні (y) представляють вплив процесу на оточення.

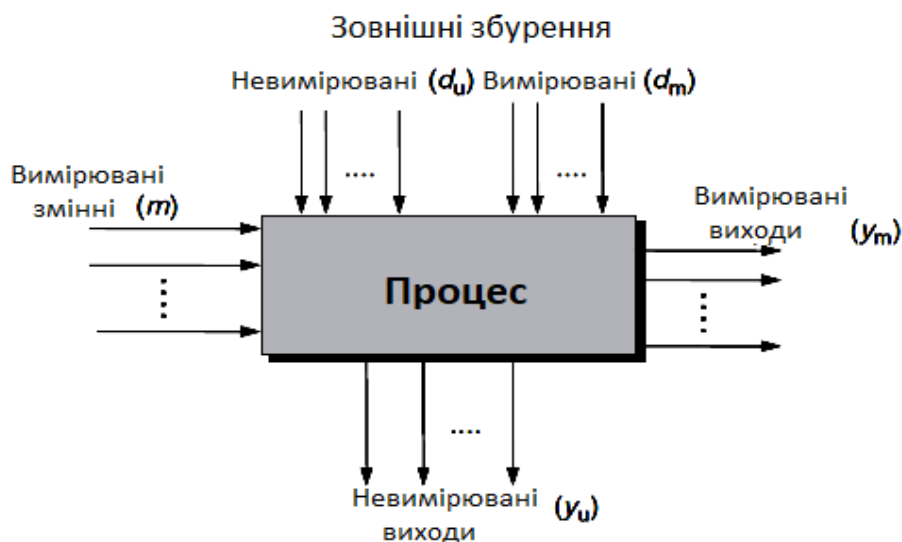


Рис. 1.5. Схематичне представлення процесу [39].

Вхідні змінні можуть бути або не бути доступними для цілеспрямованої дії на процес, в результаті чого проводиться подальша класифікація наступним чином (рис.1.5):

- маніпульовані входи (m) можуть вільно регулюватися оператором або системою управління;
- збурення (d) не є результатом коригування оператором або системою управління.

Відповідно до їх прямої вимірюваності, самі збурення можуть класифікуватися як (1) вимірювані збурення (d_m) , (2) невимірювані збурення (d_u) .

Як приклади типових збурень процесу - температура замісу зерна з водою при виробництві спирту, а тиск в будь-якій системі можна легко виміряти за допомогою доступної сенсорної технології. Склад замісу, навпаки, важко виміряти, бо датчики часто дорогі, ненадійні або просто недоступні.

Вихідні змінні, які також називаються змінними керування, як правило, асоціюються з цілями керування. Вони пов'язані із змінними процесу, які вказують на якість продукції, безпеку та економіку процесу. Вони далі класифікуються так:

1. Вимірювані результати (y_m) - це ті, значення яких відомі безпосереднім вимірюванням;
2. Невимірювані результати (y_u) не вимірюються або не можуть бути виміряні

безпосередньо.

Таким чином, процес може бути представлений схематично, як показано на рис. 1.5.

1.3.3. Аналіз розвитку систем керування процесом приготування замісу

В процесі змішування зерна з водою і ферментом основною проблемою є якісний склад кінцевого потоку суміші – показник концентрації крохмалю в суслі. Операція приготування зернового замісу є однією з ключових у спиртовому виробництві. Мета водно-теплової обробки зерна полягає в зруйнуванні клітинної структури сировини і переведенні крохмалю в розчинний стан. Це необхідно для створення умов оцукрювання крохмалю амілолітичними ферментами і гідролізу білкових речовин [18, 106].

Система керування повинна забезпечити підтримання заданих витрат зерна, температури води і концентрації сухих речовин в заданих межах. При впровадженні енергозберігаючої схеми низькотемпературного розварювання замісів із використанням концентрованих ферментних препаратів необхідно також забезпечити узгоджену подачу не тільки води і зернової суміші, але і ферментів.

Також застосування сучасних способів інтенсифікації приготування замісу, а саме підвищення концентрації сухих речовин у суслі впливає на підвищення в'язкості. У зв'язку з цим виникає ряд проблем, таких як ускладнення перекачування замісів, перешкоджання гідролізу крохмалю та інших біополімерів сировини, а також проведення наступних технологічних операцій: оцукрювання (збільшення подачі пари для додаткового розрідження), перекачування, бродіння [17, 40]. Це знижує вихід спирту і ефективність виробництва. У зв'язку з цим постає питання розробки та впровадження системи автоматичного керування, яка буде враховувати особливості сировини, температурні режими, витрати основних компонентів даної ділянки, а також здійснювати своєчасний контроль та регулювання вихідних параметрів концентрації замісу та в'язкості. Це дозволить мінімізувати витрати сировини, покращити якість вихідного продукту і суттєво підвищити ефективність

виробництва.

Основним завданням керування на цій стадії є отримання певної концентрації в замісі крохмалю, що забезпечує АСР співвідношення витрат зерна і води, що надходять в передрозварника-змішувач. Витрата води вимірюється ротаметром, сигнал з якого надходить на регулятор співвідношення в якості регульованої змінної. Пневмосигнал, пропорційний витраті зерна, з пневмоперетворювача надходить на регулятор співвідношення в якості заданного значення. Командний сигнал з виходу регулятора співвідношення подається на привід регулюючого клапана подачі води [89, 102].

В процесі змішування основною проблемою є якісний склад кінцевого потоку суміші – показник концентрація **крохмалю в замісі**. Заданий склад може бути досягнутий операцією регулювання клапанів подачі зернової суміші, ферментів і води. Система управління повинна забезпечити керування комбінацією їх витрат. Цільовий склад суміші може змінюватись, можуть змінюватися характеристики вхідних матеріальних потоків на змішувач (зерна, води, ферментів), тому операція приготування замісу повинна швидко реагувати на такі вимоги.

Впровадження автоматизованого керування контуром, що регулює співвідношення зерна і води для процесу змішування на Львівському спиртовому заводі дозволило зменшити вплив зовнішніх чинників на основний показник замісу – концентрація замісу, що було неможливо забезпечити в режимі ручного регулювання матеріальних витрат зерна і рідкої фази [26]. Така система керування включає в себе витратомір для зерна та виконавчий регулюючий пристрій, в якості якого використовується заслінка з пневматичним механізмом. Загалом в системі керування присутні три контури: витрати зерна; витрати води з ферментом; концентрації зерна в замісі.

Не менш відома схема керування процесом приготування замісу, яка теж включає три контури: контур виміру витрати сировини; контур виміру концентрації замісу; контур регулювання подачі води (рис.1.6).

З метою підвищення якості замісу пропонується визначати вимірюванням і розрахунком концентрацію сировини, а регулювання подачі води відбувається по

нелінійному закону [91].

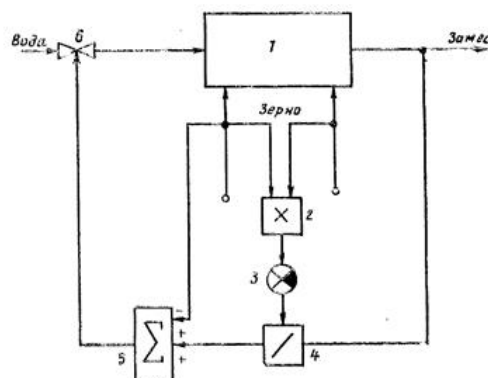


Рис. 1.6. Функціональна схема автоматичного керування концентрації замісу

Основним та головним недоліком вказаних систем автоматичного керування процесом приготування замісу є відсутність контролю за в'язкістю замісу, що не дозволяє використати підвищені теплові режими обробки замісу, які забезпечили би ефективне проведення наступної операції термоферментативної обробки замісу. Не дивлячись на те, що в'язкість зернових замісів у спиртовому виробництві відіграє важливу роль, нині в'язкість зернових сумішей під час виробництва спирту не контролюється. Це створює перешкоди при виконанні наступних операцій і транспортування замісу на наступні операції [26].

1.4. Основні проблеми і задачі дослідження автоматизації процесів формування замісу із зернової сировини і його водно-теплової обробки

Стосовно першого етапу виробництва спирту, а саме процесів підготовки зернової сировини для приготування замісу та його водно-теплової обробки, то ситуація тут дещо інша. Дійсно, процеси підготовки сировини для виробництва спирту в основному нелінійні і демонструють різну динаміку для різної вхідної сировини, яка вимагає різних умов її обробки. Тому якісна автоматизація процесів попередньої обробки зернової сировини та підготовки замісу дозволить покращити контроль та регулювання технологічних режимів, забезпечити підвищення їх ефективності.

Класичні системи автоматизації, які використовуються на протязі багатьох років в спиртовому виробництві, передбачають контроль та регулювання окремих контурів виробництва спирту:

1. На операції подрібнення зернової сировини [103, 114]: частота обертання двигунів норій, млинів та витрати зерна з використанням ПІ-регулятора;
2. На операції приготування замісу для отримання заданої концентрації крохмалю система керування відслідковує співвідношення подачі зерна, ферментів і води;
3. На операції водо-теплової обробки замісу система керування забезпечує задані характеристики напівфабрикату замісу.

Слід відзначити, що на сьогодні у всіх існуючих систем автоматичного керування процесом приготування замісу є відсутність контролю за концентрацією крохмалю в замісі, що не дозволяє використати підвищені теплові режими обробки замісу, які забезпечили б ефективне проведення наступної операції термоферментативної обробки замісу. Для розв'язання проблеми контролю концентрації крохмалю в замісі необхідно вибрати і обґрунтувати застосування непрямого показника, який дозволяв би контролювати ступінь готовності замісу після його водно-теплової обробки, наприклад в'язкість або густину.

У технології виробництва етилового спирту з крохмалевмісної сировини процес переведення крохмалю в розчинний стан реалізується шляхом змішування попередньо подрібненого зерна з водою з подальшою водно-тепловою обробкою. В залежності від використовуваної технологічної схеми процес здійснюється або за класичною методикою із застосуванням надлишкового тиску в апаратах безперервного розварювання, або за низькотемпературною технологією, що включає гідродинамічну та ферментативну обробку з використанням термостабільної α -амілази.

З метою забезпечення ефективного перебігу процесу необхідно досягти однорідності замісу, що забезпечується стабільністю його параметрів. Недостатній або несвоєчасний контроль за режимами змішування може призводити до формування замісу з неоднорідною концентрацією крохмалю, що, своєю чергою,

зумовлює недоварювання або термічне пошкодження сировини, спричиняючи технологічні втрати та зменшення виходу спирту.

У зв'язку з цим виникає необхідність обґрунтування вибору показників якості замісу. Ці показники повинні, з одного боку, надавати достовірну інформацію про ступінь готовності замісу до подальших технологічних операцій, а з іншого – бути придатними для автоматизованого контролю в реальному часі. Ключовим технологічним параметром, що найбільше задовільняє цим вимогам, є концентрація розчиненого крохмалю у водно-зерновому замісі.

Як показує практика, цей параметр значною мірою залежить від характеристик зернової сировини, зокрема вологості, засміченості та вмісту крохмалю. Внаслідок цього кожна нова партія сировини потребує повторного налаштування режимів змішування. З вище викладеного матеріалу стає зрозуміло, що дана ділянка потребує застосування засобів автоматичного контролю, які будуть інтегровані в систему автоматичного керування концентрації розчиненого крохмалю в замісі, що забезпечить стабільність процесу та підвищить ефективність виробництва.

В умовах безперервного виробництва особливу актуальності набуває застосування засобів автоматизованого контролю та регулювання концентрації крохмалю в замісі, що забезпечує стабільність параметрів процесу та підвищення загальної ефективності виробництва.

Необхідно також забезпечити автоматичне керування і контроль за температурою і рН замісу, оскільки гідроліз здійснюється ферментними комплексами необхідно забезпечити оптимум дії для них по рН і температурі. В іншому випадку буде підвищена витрата ферментів, або вони взагалі працювати не будуть. Для вирішення проблеми необхідно встановити промислові датчики рН і температури в чанок замісу, або в трубопровід (що більш правильно) передачі замісу в ферментер.

Невиконання цих пунктів призводить до того, що технологія в цілому не працює. Якщо заощадити на ферментах, то не буде повного гідролізу та зросте в'язкість замісу, якщо не контролювати рН і температуру в чанку замісу, то ферменти можуть "недопрацювали", або взагалі не працювати [18].

Основною особливістю управління процесами підготовки оцукрованого замісу є та обставина, що в зв'язку з залежністю якості спирту від режиму роботи установки [63], стабілізація технологічного режиму на ділянці підготовки замісу повинна вестися дуже точно, незважаючи на діючі збурення, що надходять з потоками зерна, пари, води. Відзначено, що нелінійність статичної характеристики при недостатньо точному управлінні призводить до появи хаотичних коливань в системі.

Якщо заощадити на автоматизації керування при формуванні замісу, то практично нереально буде витримати співвідношення всіх потоків і параметрів процесу. Як результат - перевитрата ферментів і зниження виходу продукту.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз процесів виробництва спирту показав, що рівень автоматизації на різних ділянках не є однаковим. Особливо низький рівень автоматизації виявився на ділянці підготовки замісу і його водно-теплової обробки. Тому необхідність автоматизації цієї ділянки визначається потребами забезпечення стабільності показників якості замісу після його водно-теплової обробки, що впливає на ефективність подальших технологічних операцій

2. Розвиток технології виробництва спирту здійснюється в напрямі скорочення кількості окремих операцій. Використання ферментів дозволило перейти на низькотемпературні технології, використання яких скорочує енергетичні витрати. В більшості виробництв здійснюють з цією метою об'єднання процесів змішування зернової сировини з водою та ферментами, а також водно-теплову обробку отриманого замісу. В цьому випадку забезпечується сталість вхідних матеріальних потоків та стабільність ключового параметру замісу - концентрація розчиненого крохмалю в замісі. Точність виконання таких об'єднаних процесів має велике значення для нормального протікання всього подальшого процесу.

3. Автоматизацію процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки гальмує відсутність контролю параметру концентрації крохмалю який би був непридатним для системи автоматичного керування.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ

2.1 Роль і вимоги до стадії приготування замісу в процесі виробництва спирту

За останні десятиліття керування технологічними процесами стає все більш важливим для харчової промисловості через його здатність мінімізувати виробничі витрати і покращувати якість харчових продуктів. Зважаючи на те, що процес виробництва спирту відноситься до слабо формалізованих, а його стадії описуються в основному нелінійними рівняннями або взагалі не мають математичного опису, то для побудови надійної системи керування процесом, доцільно використати ланцюжок його постадійних моделей, зв'язаних між собою умовами переходу від однієї стадії процесу до іншої.

Технологічний процес виготовлення спирту складається з послідовності окремих стадій, на кожній з яких передбачено отримання проміжного продукту, що повинен мати відповідні значення технологічних показників [24]:

$$X_i = \{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^n\} \quad (2.1)$$

де i - номер стадії виробництва, n - технологічний показник напівпродукту.

Однак під впливом зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін у ході виконання технологічного процесу після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що тут відбуваються складні мікробіологічні й біохімічні процеси, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів автоматизованого корегування технологічних режимів на кожній стадії в залежності від результатів, отриманих на попередній стадії.

Сировиною, яка переробляється на спирт, є зернові культури, які містять у своєму складі крохмаль, який займає визначальне місце в технологічному процесі [28]. При нагріванні подрібненої крохмалистої сировини з одночасною обробкою α -амілазою при механіко-ферментативній обробці йде інтенсивний гідроліз крохмалю до декстринів і цукрів, що сприяє якісній підготовці сировини до подальшого оцукрювання та зброджування. Температура клейстеризації залежить переважно від природи крохмалю, розміру гранул. Так, наприклад, температура клейстеризації пшеничного крохмалю 54...62°C, житнього 50...55°C [74]. Процеси взаємодії з ферментами для крохмалю різних основних зернових культур суттєво відрізняються за характером і технологічними режимами їх протікання, що необхідно враховувати при визначенні ефективних технологічних параметрів для кожної зернової культури [21].

Особливо це стосується початкових стадій виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його водно-теплова обробка (ВТО), які визначають подальше протікання процесу виробництва спирту.

Однією з найвідповідальніших стадій виробництва спирту з крохмалевмісної сировини є розварювання, яке залежить як від характеристик зернової сировини, так і від режимів її підготовки до ВТО [18, 48]. Тому на сьогоднішній день при одержанні спирту із зерна точність технологічних режимів при проведенні першої основної стадії є однією із ключових проблем [18, 59, 91]. З іншої сторони, складність процесів на цій стадії та значні коливання характеристик вхідних матеріалів загальмували автоматизацію керування ділянкою підготовки оцукрованого сусла із зерна. Зниження рухливості технологічного середовища на стадії приготування замісу призводить до погіршення умов протікання ферментативного гідролізу крохмалю та некрохмалистих полісахарид [21, 59, 93]. Окрім того, погіршуються умови міжапаратного переміщення напівфабрикату, що викликає втрати при виробництві спирту.

2.2. Особливості проведення і контролю стадії приготування і обробки замісу

Розглянемо стадію приготування замісу і його ВТО при виробництві спирту, як сукупність певних етапів (рис.1). Пов'яжемо етапи початкової стадії виробництва спирту (одержанням замісу зерна із рідиною і його ВТО) між собою. Детальний розгляд етапів ВТО дає чітке розуміння про тісний взаємозв'язок всіх параметрів. Якщо технологічний процес триває за визначених регламентом умов, то підтримання регламентованих показників технологічних режимів забезпечує отримання напівпродукту із заданими показниками якості та забезпечує значну мінімізацію енергетичних ресурсів.



Рис. 2.1. Схема взаємозв'язаних моделей етапів приготування замісу і його ВТО [105]

Початковим етапом є очищення та подрібнення зерна, яке надходить на виробництво спирту. Основною проблемою використання зерна для виготовлення спирту є забезпечення чистоти сировини, в першу чергу усуненню мікробіологічних забруднень і механічних домішок [21]. Подрібнення зерна - важлива стадія його підготовки до розварювання, оскільки якість і рівномірність

помелу обумовлюють температурний режим водно-теплової обробки і ступінь втрат вуглеводів на цій стадії технологічного процесу. Помел повинен бути однорідним: прохід через сито діаметром 1,0 мм повинен бути не менше 95% [48, 117]. Як відомо, сировиною для виробництва спирту є пшениця, жито, кукурудза.

Наступний етап 1 передбачає підготовку розчину води з ферментом. Ферменти виконують роль каталізаторів білкового походження [54]. Застосування ферментних препаратів сприяє інтенсифікації технологічних процесів, підвищення виходу, поліпшенню якості готової продукції, забезпечує раціональне використання сировинних ресурсів [36]. Тому саме якість і кількість ферментних препаратів суттєво впливає на якість зернового сусла. Кількість використання даних препаратів визначається згідно регламенту технологічного процесу, який в свою чергу залежить від виду сировини, ступеня її подрібнення та кількісного співвідношення її з водою [93]. Особлива увага приділяється використанню ферментних препаратів селективної дії, що дозволить знизити температуру термоферментативної обробки замісів та забезпечують більш глибокий гідроліз біополімерів зерна [59].

На етапі 2 змішування розчину з зерном і отримання замісу одним із важливим моментів є дотримання співвідношень рідких та сипких складових процесу 2,5-3,0 л на 1 кг помелу. Кількість води змінюють у залежності від крохмалистості і вологості зерна з урахуванням того, щоб концентрація сусла була 18-20 % за цукроміром [9].

Обробка замісу на етапі 3 для утворення крохмалю передбачає регулювання температури замісу у залежності від дисперсності помелу зерна та змішування у відповідному співвідношенні розчину з зерном. Температурні режими замісів знаходяться в межах від 40° С до 80° С залежно від сировини [67]. Характеристиками замісу будуть концентрація сухої речовини і температура замісу. В свою чергу температура замісу визначає температурні показники, витрату пари та ступінь вивільнення крохмалю на наступній стадії – термоферментативної обробки. Складності виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники.

Наприклад виникає необхідність зниження температури замісу через різке зростання його в'язкості [4, 32]. Це пов'язано з тим, що двофазна суміш (вода-зернові частки) змінює свої структурно-механічні властивості через початок процесу клейстеризації крохмалю [32], а це в свою чергу вимагає змін технологічних режимів наступної стадії, що призводить до додаткових витрат енергоресурсів.

Процесу підварювання, під час переробки зерна, передує змішування крупки з водою. Він повинен проводитися так, щоб заміс був однорідним за температурного режиму води не вище 50 °C (бути нижче температури клейстеризації). При механіко-ферментативному способі підготовки крохмалистої сировини із застосуванням розріджуючих ферментів α -амілази процеси набухання, клейстеризації та розчинення крохмалю необхідно проводити якомога повніше, оскільки процес розварювання під тиском виключається, а витримана на цьому етапі маса прямує безпосередньо на оцукрювання та охолодження.

Тому в умовах термічної обробки замісу необхідно підібрати такий режим, який повинен забезпечити більш повний перехід крохмалю у розчинений стан. В даний час до якості зерна і зернового сусла, що отримується на його основі, висувують все більш високі вимоги, так як вона безпосередньо пов'язана з якістю готової продукції: ректифікованого спирту. Слід зазначити, що у виробництві спирту зерно прийнято оцінювати з погляду вмісту в ньому головного компонента, що зброджується – крохмалю [28]. При розробці нових технологій такий підхід не може повною мірою охарактеризувати сировину, що є багатокомпонентним субстратом бо під впливом зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін під час технологічного процесу, після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що термічний процес змішування супроводжується складними мікробіологічними й біохімічними змінами, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості, а також до додаткових енергетичних витрат. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів

автоматизованого керування процесами, особливо тими, що відбуваються на початковій стадії виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його попередньої теплової обробки. Саме ці процеси визначають ефективність при подальшому протіканні процесів виробництва спирту. На досліджуваній стадії виникає проблема вибору показників замісу, придатних для автоматичного контролю (керування), які забезпечують спрощення синтезу системи керування. Технічним результатом такого підходу є автоматизація процесу вимірювання показника якості замісу, що дозволить підвищити продуктивність підприємств та дасть можливість контролювати вихідні показники даного етапу.

Як бачимо, особливістю підготовки замісу є те, що основний показник його якості - ступінь утворення крохмалю в замісі – не контролюється, а визначається приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Очевидно, що ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки [14, 27].

2.3. Інформаційна модель процесу приготування і обробки замісу

Основними технологічними факторами початкового етапу технології приготування зернових замісів є ступінь подрібнення зерна, гідромодуль «зерно-вода» під час приготування зернових замісів, температура та тривалість водно-теплового оброблення [117]. Фракційний склад помелів розрізняється за ступенем дисперсності. Для кожної фракції помелу з метою скорочення втрат необхідний свій водно-тепловий режим щоб уникнути неповного розчинення крохмалю. Оскільки корегування технологічних режимів необхідно виконувати на попередній стадії процесу, то у складі системи управління такими процесами необхідно передбачити використання прогнозованих моделей. Ці моделі дозволять визначити скореговані значення технологічних режимів, які необхідно підтримувати на плинній стадії виробництва з урахуванням технологічних показників, отриманих на попередній стадії. Для вирішення даного завдання необхідно розробити

автоматизовану систему керування, яка б забезпечувала регулювання параметрів технологічного процесу та підтримувала їх в регламентованих межах.

На основі огляду стану проблеми процес водно-теплової обробки замісу можна представити у вигляді інформаційної моделі, що пов'язує між собою параметри чотирьох видів (рис. 2.1):

1. Показники якості виконання процесу;
2. Контрольовані і керовані параметри;
3. Контрольовані, але некеровані параметри;
4. Неконтрольовані і некеровані (збурюючі) показники.

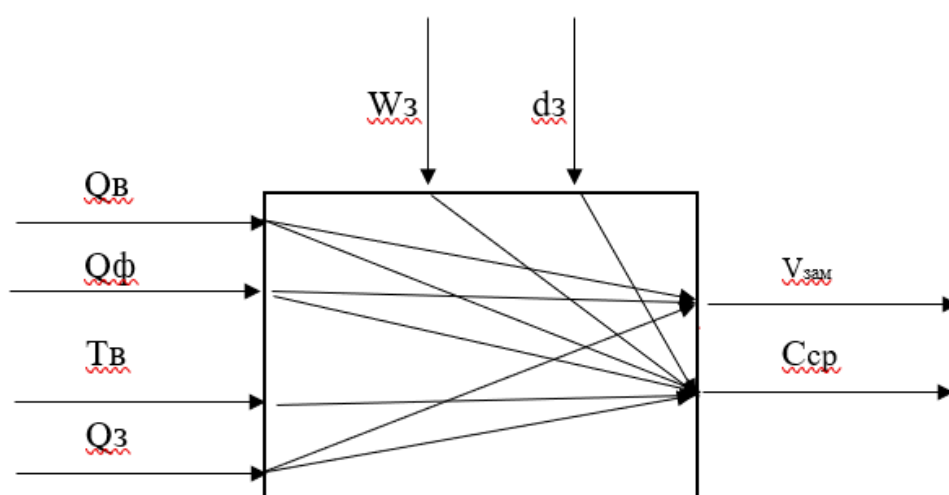


Рис. 2.2. Схематичне представлення процесу змішування:

W_z -вологість зерна, d_z -ступінь подрібнення, T_v -температура води, Q_z -витрата зерна, Q_v -витрата води, Q_f -витрата ферменту, $V_{зам}$ - об'єм замісу, $C_{ср}$ -концентрація розчиненої сухої речовини в замісі

Вхідні контрольовані і керовані параметри. Розгляд процесу замісу дозволив виділити такі основні контрольовані вхідні параметри процесу: витрата води, ферменту та зерна. З позиції системи регулювання вони можуть бути регульовані оператором або автоматизованою системою управління для досягнення бажаних параметрів процесу:

1. Порушення контролю витрати подрібненого зерна може призвести до

нерівномірної якості замісу та знизити вихід продукції, а надмірна кількість може перевантажити обладнання, що призведе до втрат продуктивності.

2. Недотримання витрат води може вплинути на концентрацію замісу. Надмірна кількість води може призвести до надмірного розрідження суміші, що негативно вплине на якість кінцевого продукту, а недостатня кількість води може ускладнити процес змішування і перешкоджати ферментації.

3. Невірне дозування ферменту може призвести до порушення процесу ферментації і як наслідок збільшення в'язкості замісу та ускладнення подальшого транспортування суміші на подальші стадії технологічного процесу виробництва спирту.

4. Зміни температурних режимів в більшу сторону можуть призвести до інактивації дії ферментів, а її пониження до погіршення процесу ферментації.

Зміни витрат пари можуть призвести до порушення температурного режиму в змішувачі: перегріву при підвищенні витрат або уповільнення процесу і реакцій гідролізу крохмалю при недостатній її кількості.

Вихідні параметри – показники якості процесу приготування замісу. Вихідні змінні відображають результат роботи процесу приготування замісу. До них відносяться об'єм замісу $V_{\text{зам}}$ та концентрація розчиненої сухої речовини в ньому $C_{\text{ср}}$:

1. Перевищення концентрації ускладнює, як і транспортування на наступні ділянки так і доступ дріжджів під час бродіння.

2. Низькі показники концентрації призводять до кількісних втрат спирту та знижують ефективність виробництва.

3. Відсутність контролю та регулювання витрати замісу призводить до дестабілізації виробництва.

Вхідні контрольовані, але некеровані параметри. Стадія приготування замісу передбачає також наявність некерованих в процесі приготування замісу параметрів, таких як температура води, вологість зерна, діаметр (ступінь подрібнення) зерна. Дані параметри формуються при підготовці сировини до процесу приготування замісу, мають задані і контрольовані значення, які

коливаються в певних межах і впливають на показники якості замісу. Збільшення вологості зерна негативно впливає на перемішування зерна, ускладнює його подрібнення, а зміна ступеня подрібнення може призвести до нерівномірного змішування, порушення процесу ферментації і як наслідок зміни концентрації сухої речовини в замісі. Вихід температурних режимів води за задані межі призводить до перегріву замісу або уповільнення хімічних реакцій в ньому, таких, наприклад, як гідратація крохмалю. Що також впливає на концентрацію розчиненої сухої речовини в замісі.

Неконтрольовані і некеровані (збурюючі) параметри. До таких параметрів відносяться ті, що характеризують коливання умов зовнішнього середовища і їх вплив на технологічне устаткування – температура повітря, атмосферний тиск і вологість, вібрації при проведенні процесу замісу тощо. Ці параметри призводять до розсіяння значень показників процесу приготування замісу. Що створює додаткові передумови для використання системи автоматичного керування процесом приготування замісу.

Актуальним завданням є дослідження впливу технологічних факторів на в'язкість зернового сусла під час підготовки його до спиртового зброджування і визначення оптимальних параметрів процесу, які характеризують підготовленість замісу для подальшої обробки.

2.4. Вибір і обґрунтування показника концентрації розчиненої сухої речовини в замісі, придатного для автоматичного контролю

Наведена модель, що описує процес приготування замісу, показала, що процедура приготування замісу проходить в умовах дії багатьох збурюючих факторів. Для забезпечення стабільності процесу необхідно створити систему автоматичного керування, яка зможе коректувати значення технологічних параметрів, які відносяться до першої групи, тобто є контрольованими і керованими. Однак керування процесом замісу можливе тільки при умові, що існує показник якості замісу, що відповідає двом вимогам:

1. Надає об'єктивну оцінку якості замісу.

2. Є придатним для автоматичного контролю і керування процесом приготування замісу.

Якість приготування замісу в виробничих умовах описується показником концентрації розчиненої сухої речовини в замісі [9]. Цей показник надає повну інформацію про ступінь готовності замісу до подальшої обробки, однак має такий недолік як складність використання. Це робить його непридатним для використання в системі автоматичного контролю. Тому виникає проблема знаходження показника якості замісу, який був би придатним для автоматичного контролю.

Аналіз літературних джерел показав, що в виробничих умовах використовують лабораторні і непрямі методи контролю показників концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Лабораторний метод контролю називають йодометричним. Принцип його дії полягає в використанні явища того, що крохмаль утворює синій комплекс із йодом, інтенсивність якого залежить від концентрації крохмалю. Інтенсивність забарвлення оцінюється візуально або за допомогою спектрофотометра.

Непрямі методи контролю передбачають вимірювання в'язкості або густину замісу, які залежить від концентрації крохмалю.

Зазвичай основними показниками замісу є концентрація сухої речовини в замісі та ступінь утворення крохмалю, які не контролюються, а визначаються приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Очевидно, що ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки. Нами визначено, що таким показником може слугувати в'язкість замісу яка обумовлює передумови стабільності теплової його обробки і усуває необхідність зміни технологічних режимів на наступній стадії [20, 59]. Для вирішення даного завдання необхідно визначити залежності між показниками приготовленого замісу і його в'язкістю.

2.4.1. Аналіз процесу контролю в'язкості для визначення ступеню розчинення крохмалю в замісі

Підготовка замісу і його термічна обробка є найважливішим технологічним процесом під час виробництва спирту, від правильного ведення якого залежить успішність наступних процесів: розварювання замісу, повнота оцукрювання і бродіння і, зрештою - вихід спирту та його якість. Процес розварювання (оцукрення) має на меті: зруйнувати клітинну структуру сировини та подрібнити, для виділення крохмалю із клітин і переведення його у розчинений стан. За традиційною технологією отримання спирту із зернових замісів також передбачається використання змішувачів-передрозварників, функціональне призначення яких є підготовка зернового замісу до розварювання, яке в свою чергу супроводжується оцукрюванням крохмалевмісної сировини, що впливає на зміну в'язкості досліджуваного середовища. Тому можна стверджувати, що ступінь оцукрювання пропорційний в'язкості сировини та вивільненому крохмалю. Із досліджень відомо, що в'язкість суспензії крохмалю у воді при підвищенні температури спочатку зменшується внаслідок зниження в'язкості води, потім підвищується, що обумовлено набуханням та клейстеризацією крохмалю [48, 69, 117].

Зміна в'язкості крохмальних суспензій у воді визначає і зміну в'язкості замісів з різної сировини, оскільки крохмаль найбільше впливає на в'язкість. В'язкість крохмалевмісного замісу в період нагрівання суспензії крохмалю за температури 35...45°C має властивість дуже повільно збільшуватися, в той час як за температури 75...85°C різко зростати і при 90°C досягає максимального значення. Різке підвищення в'язкості супроводжується інтенсивним набуханням сировини і початком клейстеризації. Процес клейстеризації практично завершується за температури 90 °C і показники в'язкості практично лишаються сталими [5, 59].

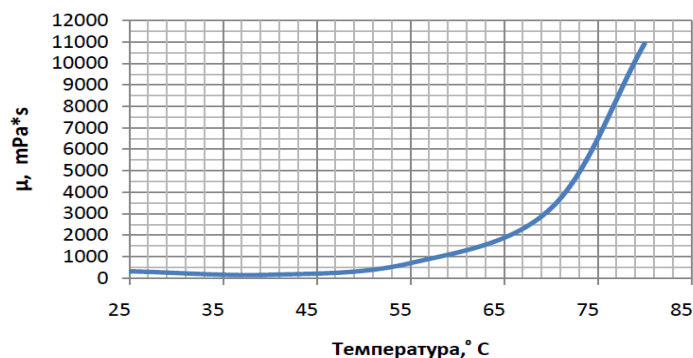


Рис. 2.4. Зміна в'язкості водно-зернової суспензії в процесі її нагріву від 25°C до 85°C [75].

Проведені дослідження науковців та аналіз отриманих результатів наукових робіт таких вчених, як Процан Н.В., С.Т. Олійнічук і С. Р. Мельник дозволили простежити динаміку клейстеризації крохмалю зерен на стадії приготування замісу та виділити наступні закономірності:

1. Підвищення температури впливає на зміну в'язкості замісу, спочатку вона зростає, а потім в результаті досягнення температури клейстеризації починає знижуватись.

2. На температуру клейстеризації, в свою чергу впливає гідромодуль замісу (чим менший гідромодуль, тим вона вища). Передумовою такого процесу є утворення спочатку крохмальної сітки, яка під дією температури і її підвищенням руйнується.

3. На зміну в'язкості також має вплив ступінь подрібнення зерна (фракція), та застосовувані ферментні препарати.

Не дивлячись на те, що в'язкість зернових замісів у спиртовому виробництві відіграє важливу роль, нині в'язкість зернових сумішей під час виробництва спирту не контролюється. Це створює перешкоди при виконанні наступних операцій і транспортування замісу на наступні операції [2, 20, 33, 34].

У сучасній теорії керування набули широкого розвитку задачі, розв'язання яких враховує лише наближене оцінювання зовнішніх збурень та параметрів моделі об'єкта, неточність отриманої інформації з технологічних, фізико-хімічних та технічних показників.

Саме тому вирішення окресленої проблематики є актуальним, особливо в розрізі впливу якості замісу на всі наступні ділянки виробництва спирту, що вплине на забезпечення енергоефективності роботи технологічного обладнання спиртового заводу, покращенню якісних та кількісних показників спиртової продукції, а також зменшення затрат на обслуговування промислових систем автоматизації [21, 26, 117].

Детальні дослідження даної ділянки нами передбачають розробку САР, яка б саме здійснювала контроль та регулювання вихідної суміші (замісу) базуючись саме на в'язкості.

Що стосується проблем автоматизації цих процесів, то перш за все відзначимо необхідність автоматичного керування і контролю за витратами зерна, води, і ферментів, оскільки неправильне співвідношення цих потоків може призвести до неповного гідролізу крохмалю і відповідно до недоотримання спирту. Для вирішення проблеми необхідно встановити витратоміри на всі перераховані вище потоки.

2.4.2. Експериментальне дослідження придатності параметрів в'язкості та густини замісу для контролю концентрації крохмалю в замісі

Для реалізації поставленої мети було проведено ряд лабораторних досліджень. В якості матеріалів було використано зразки замісів з співвідношенням зерно-вода 1:3. Нагрів суміші проводили у відповідності до технічного регламенту від 50 до 90°C. Для визначення густини замісу використано аерометр, який забезпечує швидкість та простоту виміру густини, Рис. 2.5 [28].



Рис. 2.5. Аерометр для визначення густини замісу

Для в'язкості використовувався капілярний віскозиметр ВПЖ-4. За результатами проведених досліджень в лабораторіях чотирьох спиртогорілчаних заводів України отримано наступні залежності між концентрацією сухих речовин і в'язкістю та густиною замісу при різних температурах, що представлені в таблиці 2.1.

Далі проведено побудову графічних залежностей на основі отриманих експериментальних даних. На рисунку 2.6 представлено залежність густини та в'язкості від концентрації крохмалю в замісі для різних температурних умов.

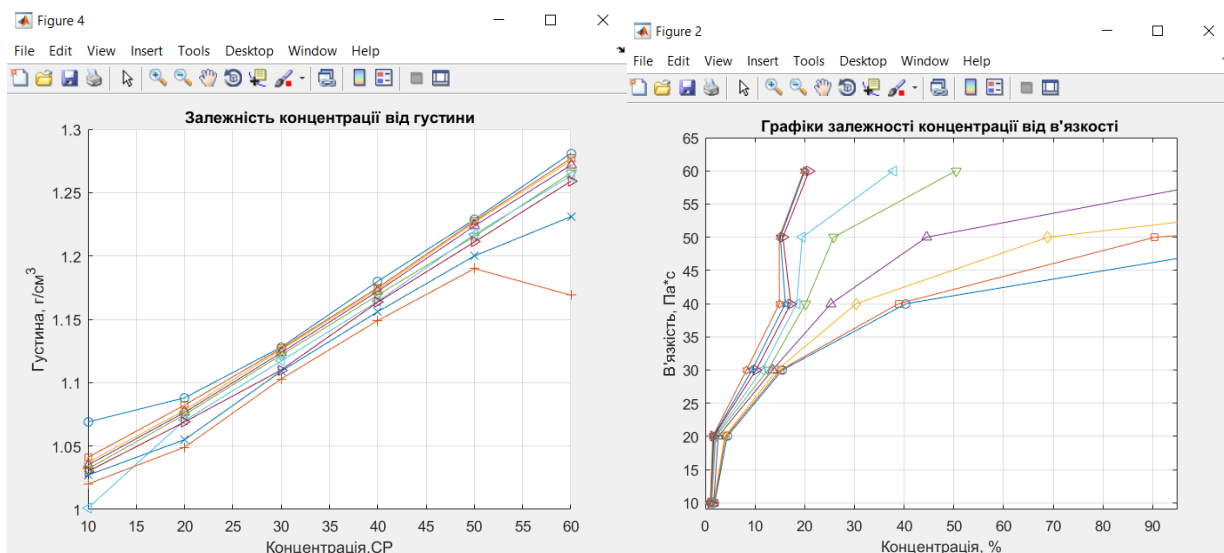
Дані залежності сформовані на основі значень табл. 2.1, які отримані з використанням власних досліджень та узагальнення показів з заводів України, що спеціалізуються на виробництві спирту.

У ході експериментів досліджено зміну в'язкості та густини замісу залежно від температури при різних значеннях концентрацій (додаток А). Діапазон досліджених концентрацій становив від 10 до 60% сухих речовин з інтервалом 10% при зміні температури від 50 до 90 °С. Отримані дані дають змогу продемонструвати збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище.

Таблиця 2.1

Залежність густини, в'язкості і концентрації сухих речовин від температури

Температура, °C	СР 10%		СР 20%		СР 30%		СР 40%		СР 50%		СР 60%	
	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с	густина, г/см ³	в'язкість, Па·с
10	1,069	1,9	1,088	4,4	1,128	15,5	1,18	40,4	1,2288	120,6	1,281	310,4
20	1,041	1,8	1,0823	4,1	1,127	15,1	1,175	38,9	1,2275	90,4	1,277	280,4
30	1,037	1,7	1,0782	3,9	1,1261	14,4	1,1736	30,4	1,2264	68,9	1,2752	184,5
40	1,035	1,69	1,0765	2,6	1,1236	13,5	1,1721	25,3	1,2236	44,5	1,2716	115,2
50	1,032	1,3	1,0747	2,1	1,1218	12,6	1,1691	20,2	1,2154	25,8	1,2656	50,4
60	1,001	1,2	1,0701	1,9	1,117	11,4	1,1642	18,4	1,217	19,5	1,2632	37,8
70	1,030	1,1	1,069	1,7	1,110	10,2	1,1635	17,2	1,211	15,6	1,259	20,9
80	1,027	1,05	1,055	1,6	1,109	9,4	1,156	16,1	1,2	15,1	1,231	20,01
90	1,02	1	1,049	1,5	1,103	8,3	1,149	14,9	1,19	14,5	1,169	19,84



а)

б)

Рис. 2.6. Залежність густини та в'язкості від концентрації – а, б для різних температурних умов

У ході експериментів досліджено зміну в'язкості та густини замісу залежно від температури при різних значеннях концентрацій. Діапазон досліджених концентрацій становив від 10 до 60% сухих речовин з інтервалом 10% при зміні температури від 50 до 90 °С. Отримані дані дають змогу продемонструвати збільшення густини, а від так і в'язкості замісу від збільшення концентрації сухих речовин від 10% і вище [28].

Проведене дослідження і аналіз параметрів процесу приготування замісу та його подальшого розварювання дозволило виокремити як показник якості замісу – його в'язкість як такий, що є більш чутливий до зміни концентрації крохмалю в замісі.

Вищевказані закономірності гарантовано забезпечують спрощення етапу вибору операційних точок при налаштуванні САР та дають можливість керувати процесом приготування замісу. Це також дозволить підприємствам, що займаються виробництвом спирту використовувати саме той технологічний параметр, який для них є найзручнішим.

2.5. Вибір і обґрунтування функціональної схеми автоматизації керування процесом приготування замісу

Складність першого етапу процесу приготування замісу, а саме змішування води, зерна і ферменту дала можливість сформувати декілька схем автоматичного керування процесом з використанням як показника якості замісу його в'язкості. Ми розробили і проаналізували наступні варіанти схем змішування, для яких оцінили їх придатність для автоматичного відтворення в виробничих умовах. (див. табл. 2.2).

В таблиці прийнято наступні позначення: Q_1 – кількість вихідної суміші після змішування води та ферменту; F_v , F_f , F_z відповідно кількість(витрата) води, ферменту та зерна.

Таблиця 2.2

Варіанти схем змішування основних компонентів замісу – зерно, вода та фермент

N	Схема змішування	Функціональний опис процесу	Зручність до керування	Надійність	Придатність до реалізації
1		$Q = \varphi(F_v, F_z, F_f)$			
2		$Q_1 = \varphi(F_v, F_f)$ $Q_2 = \varphi(Q_1, F_z)$	++	+++	+++
3		$Q_1 = \varphi(F_z, F_f)$ $Q_2 = \varphi(Q_1, F_v)$	+	+	++
4		$Q_1 = \varphi(F_v, F_z)$ $Q_2 = \varphi(Q_1, F_f)$	+	+	+

Провівши аналіз отриманих варіантів змішування в таблиці 2.2, врахувавши стабільність отримання технологічного результату, можна зробити висновок, що схема 2 має значну перевагу для подальшої реалізації, оскільки створює передумови для впровадження ефективної системи регулювання та забезпечення головного показника вихідної суміші – концентрації крохмалю в замісі. Дотримання даного параметру дозволить отримати однорідність замісу та забезпечити максимальний вихід спирту на кінцевих стадіях виробництва.

Нами було розроблено систему керування в'язкістю замісу, що забезпечила покращення якості керування процесом підготовки замісу шляхом підвищення стабільності параметрів напівпродукту після стадії приготування замісу [36].

Автоматичне приготування замісу із крахмалевмісної сировини здійснюється в чанку-змішувачі із мішалкою та пристроєм подачі пари для нагріву замісу. Автоматичне керування процесом приготування замісу проводять за допомогою системи керування, що складається із трьох контурів управління. Перший контур забезпечує задане співвідношення ферменту та гарячої води в деструктураторі крохмалю, другий контур забезпечує задане співвідношення подрібненого зерна і водного розчину деструктуратора крохмалю в замісі, третій контур забезпечує стабілізацію в'язкості крахмалевмісної маси шляхом регулювання температури T всередині бункера замісу за допомогою регулятора подачі пари (рис. 2.7).

Контур регулювання передбачає регулювання в'язкості замісу, на величину якої впливають вид сировини, ступінь помелу зерна, його характеристики, вологість зерна та інші збурення. В'язкість визначається за допомогою вимірювання потужності, яка витрачається мішалкою при заданій швидкості обертання (наприклад, 100 об/хв.). При постійній нарузі живлення мішалки потужність характеризується струмом, що використовується мішалкою. При побудові характеристики струм - в'язкість замісу значення струму живлення мішалки характеризує в'язкість замісу, значення якої подається на блок порівняння.

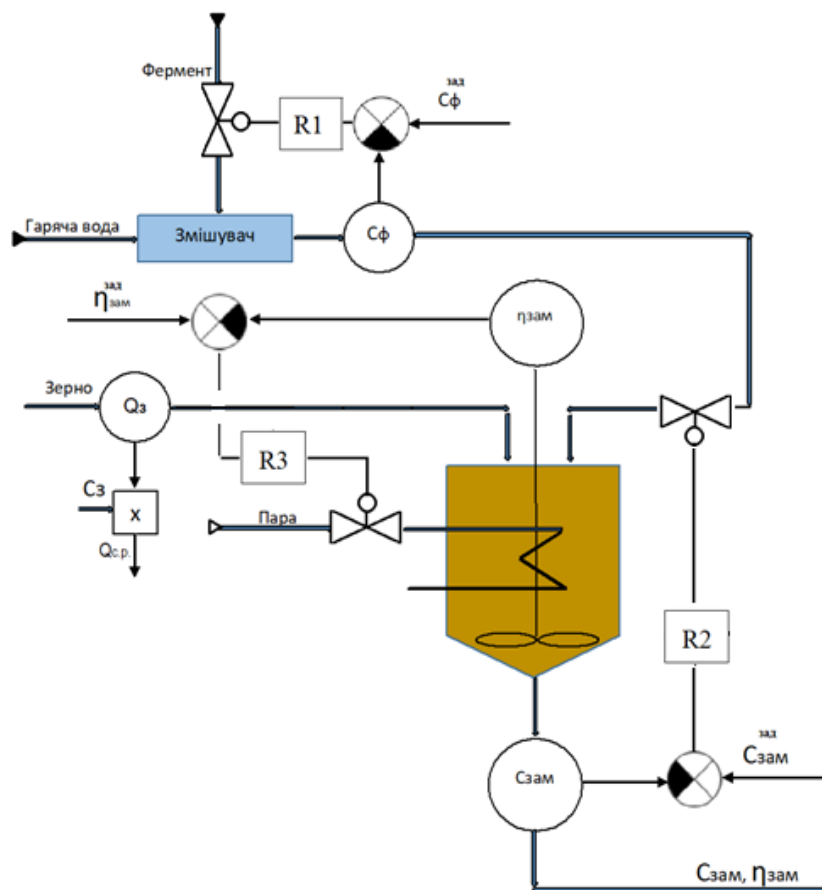


Рис. 2.7. Структурна схема триконтурної системи керування процесом підготовки замісу

Змішування гарячої води з ферментами здійснюється у відповідному співвідношенні. Задане значення концентрації ферменту з водою порівнюються з поточним значенням в елементі порівняння 1 і у разі виникнення помилки неузгодженості $E_{\phi} = (C_{\phi}^{\text{зад}} - C_{\phi})$ сигнал надходить до регулятора R1, який змінює кількість ферменту, що надходить на змішування.

Наступний контур передбачає регулювання концентрації отриманого замісу. В змішувач неперервно надходить подрібнене зерно Q_z . Сигнал відповідної концентрації зерна C_z подається в блок перемноження, де перемножується з сигналом, який відповідає витраті зерна $Q_{z.p}$. Вихідний сигнал відповідає величині $Q_z \times C_z$, що і забезпечує надходження зерна відповідної кількості і концентрації в змішувач, куди також надходить змішана вода з ферментом. На виході з змішувача відбувається контроль концентрації замісу, яка в блоці порівняння 2 порівнюється

з заданою. Помилка неузгодження $E_{\text{зам}} = (C_{\text{зам}}^{\text{зад}} - C_{\text{зам}})$ надходить до регулятора R2, який змінює кількість рідких компонентів в замісі.

Третій контур регулювання передбачає регулювання в'язкості замісу, на величину якої впливають ступінь помелу зерна, його характеристики, вологість зерна та інші збурення. В'язкість визначається за допомогою вимірювання потужності, яка витрачається мішалкою при заданій швидкості обертання (наприклад, 100 об/хв). При постійній напрузі живлення мішалки потужність характеризується струмом, що використовується мішалкою. При побудові характеристики струм - в'язкість замісу значення струму живлення мішалки характеризує в'язкість замісу, значення якої подається на блок порівняння. Отримане значення помилки неузгодженості $E_{\eta} = (\eta_{\text{зам}}^{\text{зад}} - \eta_{\text{зам}})$ надходить до регулятора R3, який змінює кількість пари, що подається в змішувач [36].

З метою перевірки ефективності запропонованої системи керування в'язкістю замісу була оцінена чутливість зміни потужності мішалки до зміни в'язкості (рис. 2.8) .

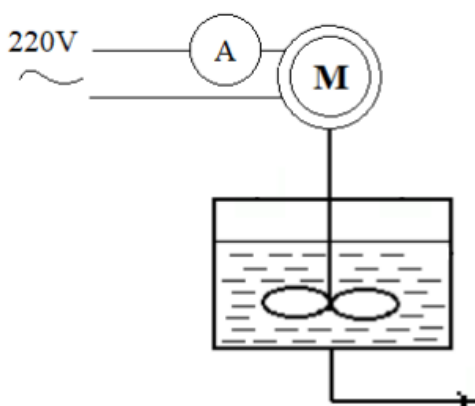


Рис. 2.8. Схема контролю в'язкості замісу [25].

При постійній напрузі живлення приводу мішалки споживана потужність може характеризуватися струмом живлення. Для отримання залежності струму, споживаного мішалкою, від в'язкості для певної конструкції мішалки були використані рідини з відомими значеннями в'язкості (вода, олію та гліцерин). За результатами отримано криву градування мішалки (рис. 2.9) та

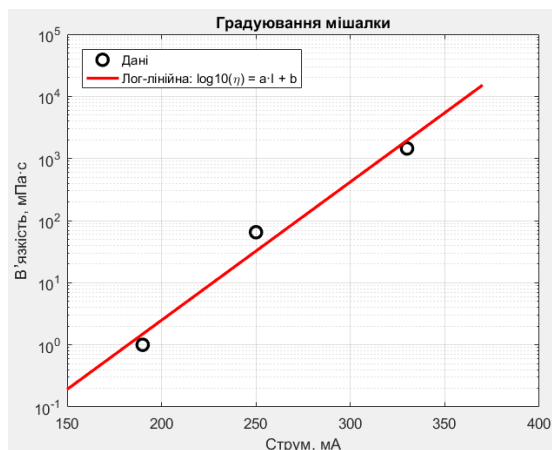


Рис. 2.9. Апроксимована залежність в'язкості від струму (логарифмічна шкала) [25].

Отримана аналітична залежність, формула 2.1.

$$\log_{10}(\eta) = a \cdot I + b \Rightarrow \eta = 10^{a \cdot I + b}, \quad (2.1)$$

де $a=0,022$ і $b=-4,06$ коефіцієнти

Отже, проведені дослідження дозволили отримати аналітичну залежність між струмом та в'язкістю, що описує характер її зміни та може бути використане для непрямого її контролю.

Висновки по розділу 2

1. Аналіз літературних джерел показав, що практично у всіх існуючих способах керування процесом підготовки зернового замісу відсутній автоматичний контроль за концентрацією крохмалю в замісі, що не дозволяє використати теплові режими обробки в степені, достатній для забезпечення ефективного проведення наступної стадії термоферментативної обробки сусла.

2. Для зменшення енергетичних та ресурсних показників процесу виробництва спирту на всіх стадіях виробництва, а також покращення якісних показників готової продукції на одній із ключових стадій у спиртовому виробництві приготування замісу – обгрунтовано необхідність і придатність використання для контролю і регулювання концентрації сухої речовини параметр

її в'язкості.

3. Розроблено і проведено порівняльний аналіз можливих функціональних схем автоматизації керування процесом приготування замісу, який дозволив визначити параметри керування процесом.

4. Показано, що використання вимірювання в'язкості контролю потужності мішалки забезпечує динаміку процесу контролю і регулювання в'язкості замісу.

5. Розроблений алгоритм поетапного відтворення процесу дозволив зв'язати в єдину систему всі етапи та технологічні режими процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки шляхом впровадження трьохконтурної системи керування процесом підготовки замісу забезпечило контроль та регулювання всіх необхідних параметрів, що дозволило вплинути на зміну режимів розварювання, а саме зменшення витрат пари, зниження витрат зброджуваних речовин на стадії бродіння та покращення якості та кількість спирту.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ КЛАСИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ТА АНАЛІЗ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ЗАМІСУ

3.1. Узагальнена модель процесу змішування

Широке впровадження у технологічний процес цифрових систем керування потребує досконалого знання зміни реологічних властивостей напівпродуктів від дії технологічних факторів. Для аналізу процесу змішування побудуємо модель, яка дозволить передбачати перебіг процесу.

Перш за все відзначимо, що процес приготування замісу в сучасному спиртовому виробництві передбачає виконання етапів:

- змішування води з ферментом до отримання його заданої концентрації в розчині деструктора крохмалю;
- змішування подрібненого зерна із розчином деструктора крохмалю до отримання заданого співвідношення зернової і рідинної фази (гідромодуль замісу);
- водно-теплова обробка замісу до отримання заданої концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Як правило, два останні етапи виконуються одночасно, що сприяє підвищенню енергоощадності процесу виробництва спирту.

Із наведених вище міркувань слідує, що при побудові системи автоматичного керування процесом приготування замісу в якості показників процесу слід вважати концентрацію розчиненого крохмалю в готовому замісі та швидкість відбору замісу із змішувача, а в якості регульованих технологічних факторів – швидкість надходження розчину деструктора крохмалю та швидкість подачі подрібненого зерна (крупки), а також тривалість водно-теплової обробки замісу до отримання заданої концентрації крохмалю. Це типова задача регулювання. Компонентами вхідної змінної є витрати вхідних потоків. Можуть мати місце такі збурення: непередбачувані зміни вхідних концентрацій, вхідних витрат внаслідок зміни тисків перед клапанами, втрат рідини через витоки, коливання температури

замісу.

На першому контурі системи керування приготуванням замісу, який передбачає змішування води з ферментом, здійснюється змішування ферменту і води, для отримання потрібної концентрації розчину деструктура крохмалу. Схема процесу зображена на рис. 3.1 [45].

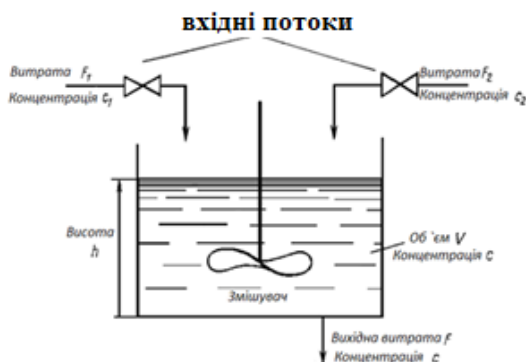


Рис. 3.1. Схема змішування

Ємність наповнюється з допомогою двох потоків, що мають змінні миттєві витрати $F_1(t)$, $F_2(t)$. В загальному випадку обидва вхідних потоки містять розчинну рідину з постійними концентраціями c_1 , c_2 .

При роботі другого контуру системи керування здійснюється змішування рідини – деструктура крохмалю з зерною сумішшю в резервуарі, що утворює вихідну концентрацію суміші. Схема змішування описується такою ж моделлю як на рис. 3.1, тільки один із вхідних потоків представляє собою потік зерна. Подібність цих моделей дозволяє описувати обидва етапи однією моделлю, яка названа узагальненою. Особливістю роботи другого контуру системи керування є керування при виконанні цього етапу процесу водно-тепловою обробкою замісу, яка проводиться одночасно з змішуванням зернової і рідинної складових замісу.

Вихідний потік має масову швидкість витікання $F(t)$. Передбачається, що вміст бака перемішується так, що концентрація вихідного потоку дорівнює концентрації $c(t)$ в баку.

Для використання отриманої моделі необхідно встановити додаткові

обмеження, що пов'язані із специфікою виробництва замісу. Припустимо, що потрібно встановити такий режим роботи системи, при якому підтримуються постійна витрата замісу $F(t)$ і постійна концентрація крохмалю в ньому $c(t)$, які є основними параметрами для ефективного керування технологічним процесом водно-теплової обробки.

Один з методів досягнення цієї мети полягає в регулюванні витрати F шляхом зміни витрати основного потоку F_1 і регулювання концентрації з допомогою зміни витрати іншого потоку F_2 при фіксованій температурі замісу [14, 79, 87].

Інший шлях для забезпечення цієї вимоги – це підтримання незмінним витрат потоків та регулювання концентрації розчиненого крохмалю в замісі з допомогою зміни швидкості розчинення крохмалю в замісі шляхом зміни температури замісу при фіксованій швидкості потоку замісу.

3.1.1. Модель процесу змішування з регулюванням концентрації крохмалю зміною витрати одного із вхідних потоків

Для керування технологічним процесом, забезпечення стійкості системи і як наслідок формування закону регулювання вихідних змінних, а саме об'єму замісу та його концентрації розглянемо модель процесу змішування у просторі стану [52, 79]. Дана модель включає лінеаризовані рівняння та повний зворотний зв'язок з урахуванням нелінійності.

Перед розглядом моделі введемо пояснення, щодо концентрації замісу, яка використовується в математичних виведеннях. Приймаємо, що після водно-теплової обробки ми говоримо про концентрацію розчиненого в замісі крохмалю.

Спочатку розглянемо рівняння балансу для ємності, яке має наступний вигляд [16, 86]:

$$\begin{aligned}\frac{dV(t)}{dt} &= F_1(t) + F_2(t) - F(t), \\ \frac{d}{dt}[c(t)V(t)] &= c_1F_1(t) + c_2F_2(t) - c(t)F(t),\end{aligned}\tag{3.1}$$

де $V(t)$ – об'єм замісу в чанку.

Миттєвий вихідний потік $F(t)$ залежить від висоти $h(t)$ наступним чином:

$$F(t) = k\sqrt{h(t)}, \quad (3.2)$$

де k – експериментальна постійна;

Якщо ємність має постійну площу поперечного перерізу S , то можна записати:

$$F(t) = k\sqrt{\frac{V(t)}{S}}, \quad (3.3)$$

тоді рівняння балансу мас приймуть вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_1(t) + F_2(t) - k\sqrt{\frac{V(t)}{S}}, \quad (3.4)$$

$$\frac{d}{dt} [c(t)V(t)] = c_1F_1(t) + c_2F_2(t) - c(t)k\sqrt{\frac{V(t)}{S}}. \quad (3.5)$$

Розглянемо спочатку випадок стаціонарного стану, коли всі величини є постійними: F_{10} , F_{20} , та F_0 – витрати відповідно води з ферментом, зерна та замісу, V_0 – об'єм змішувача, і c_0 – концентрація розчиненого крохмалю в чанку. Тоді мають місце такі співвідношення:

$$0 = F_{10} + F_{20} - F_0, \quad (3.6)$$

$$0 = c_1F_{10} + c_2F_{20} - c_0F_0, \quad (3.7)$$

$$F_0 = k\sqrt{\frac{V_0}{S}}.$$

При заданих значеннях вхідних витрат води з ферментом F_{10} і зерна F_{20} ці рівняння можуть бути вирішені відносно витрати зі змішувача F_0 , V_0 об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю в замісі c_0 . Припустимо тепер, що виникли невеликі відхилення від встановленого стану (зміна об'єму замісу або концентрації).

Напишемо:

$$F_1(t) = F_{10} + \mu_1(t), \quad (3.8)$$

$$F_2(t) = F_{20} + \mu_2(t), \quad (3.9)$$

$$V(t) = V_0 + \xi_1(t), \quad (3.10)$$

$$c(t) = c_0 + \xi_2(t), \quad (3.11)$$

де μ_1 і μ_2 розглядаються як вхідні змінні (витрата зерна та води з ферментом);

ξ_1 і ξ_2 – змінні стану (об'єму замісу та концентрація розчиненого крохмалю).

У припущенні, що зазначені чотири параметри є малими, лінеаризація (3.4) та (3.5) приводить до рівнянь [80]:

$$\dot{\xi}_1(t) = \mu_1(t) + \mu_2(t) - \frac{k}{2V_0} \sqrt{\frac{V_0}{S}} \xi_1(t), \quad (3.12)$$

$$\dot{\xi}_2(t)V_0 + c_0 \dot{\xi}_1(t) = c_1 \mu_1(t) + c_2 \mu_2(t) - c_0 \frac{k}{2V_0} \sqrt{\frac{V_0}{S}} \xi_1(t) - k \sqrt{\frac{V_0}{S}} \xi_2(t). \quad (3.13)$$

Підставляючи (9) в ці рівняння, отримаємо:

$$\dot{\xi}_1(t) = \mu_1(t) + \mu_2(t) - \frac{1}{2} \frac{F_0}{V_0} \xi_1(t), \quad (3.14)$$

$$\dot{\xi}_2(t)V_0 + c_0 \dot{\xi}_1(t) = c_1 \mu_1(t) + c_2 \mu_2(t) - \frac{1}{2} c_0 \frac{F_0}{V_0} \xi_1(t) - F_0 \xi_2(t). \quad (3.15)$$

Введемо параметр:

$$\frac{V_0}{F_0} = \theta, \quad (3.16)$$

що називається часом заповнення ємності. Виключення $\dot{\xi}_1$ із (3.15) призводить до лінеаризованого диференціального рівняння стану:

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{V_0} & \frac{1}{V_0} \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{pmatrix} u(t), \quad (3.17)$$

де вихідна змінна $x(t) = \text{col}[\xi_1(t), \xi_2(t)] = \text{col}[c(t), V(t)]$, відповідно регульований об'єм в чанку та концентрація розчиненого крохмалю в замісі, вхідна змінна $u(t) = \text{col}[\mu_1(t), \mu_2(t)] = \text{col}[F_{10}(t), F_{20}(t)]$ – регулюючі витрати води з ферментом та зерна, що надходять у чан для змішування.

Якщо визначити вихідні змінні у вигляді:

$$\eta_1(t) = F(t) - F_0 \approx \frac{1}{2} \frac{F_0}{V_0} \xi_1(t) = \frac{1}{2\theta} \xi_1(t), \quad (3.18)$$

$$\eta_2(t) = c(t) - c_0 = \xi_2(t). \quad (3.19)$$

то можна доповнити рівняння (3.17) лінеаризованим рівнянням вихідної змінної:

$$y(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t), \quad (3.20)$$

де $y(t) = \text{col} [\eta_1(t), \eta_2(t)]$.

Далі підставляємо дані, які можна отримати експериментальним способом, наприклад за даними Марилівського спиртового заводу. Вони складають:

$$F_{10} = 0,0176 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$F_{20} = 0,00874 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$F_0 = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$c_1 = 1 \text{ г/см}^3$$

$$c_2 = 1,363 \text{ г/см}^3$$

$$c_0 = 1,040 \text{ г/см}^3$$

$$V_0 = 1,2 \text{ м}^3$$

В результаті лінеаризована система рівнянь прийме вигляд [89]:

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -0,0041 & 0 \\ 0 & -0,0041 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -0,0033 & 0,323 \end{pmatrix} u(t), \quad (3.21)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0,042 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} x(t). \quad (3.22)$$

При $u(t) \equiv 0$ лінеаризована система описується рівнянням

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{pmatrix} x(t), \quad (3.23)$$

яке має рішення

$$\xi_1(t) = e^{-t/2\theta} \xi_1(0), \quad t \geq 0, \quad (3.24)$$

$$\xi_2(t) = e^{-t/\theta} \xi_2(0), \quad t \geq 0. \quad (3.25)$$

Очевидно, $\xi_1(t)$ і $\xi_2(t)$ завжди наближаються до нульового значення при зростанні t , так як $\theta > 0$. В результаті, лінеаризована система асимптотично стійка. Більш того, оскільки збіжність до положення рівноваги є експоненціальною, система експоненціально стійка.

Проведені розрахунки дають можливість зробити висновки щодо стійкості лінеаризованої системи, оскільки вона за умови відхилень об'єму замісу або концентрації повертається до рівноважного стану відносно якого була проведена лінеаризація.

Отже, проведені математичні розрахунки та дослідження моделі змішування компонентів дозволили обрати закони регулювання для двох вхідних потоків, а саме витрати води з ферментом та зерна. Для реалізації розглянутої вище схеми автоматичного керування доцільно обрати ПІД-регулятор або LQR регулятор, а також показник, вимірювання якого дозволить забезпечити автоматичний контроль концентрації крохмалю в замісі, наприклад в'язкість або густина замісу.

3.1.2. Модель процесу змішування з регулюванням концентрації крохмалю зміною температури замісу

Загальновідомою є наступна залежність тривалості розчинення крохмалю від температури для зернових культур з заданими параметрами (рис. 3.2).

На графіку показано залежність швидкості розчинення крохмалу процесу водно-теплової обробки замісу від температури. Як видно, зі збільшенням температури на кожні 10°C, швидкість реакції розщеплення крохмалю постійно збільшується. Це пов'язано з тим, що при вищих температурах ферменти, які розщеплюють крохмаль, працюють більш ефективно. При досягненні температурної позначки 80 °C, показники розчинення крохмалю знижуються і як наслідок збільшується час розчинення та сповільнюються реакції розщеплення. Аналіз впливу температури на швидкість розчинення крохмалю показав суттєвість застосування зміни температури води в замісі для керування водно-тепловою обробкою замісу для отримання заданого рівня крохмалю, розчиненого в замісі при контролі, наприклад, в'язкості замісу [72]. Для підтвердження висновку було проведено моделювання в багатоагентному програмованому середовищі NetLogo, у межах якого досліджено вплив температури на швидкість вивільнення крохмалу.

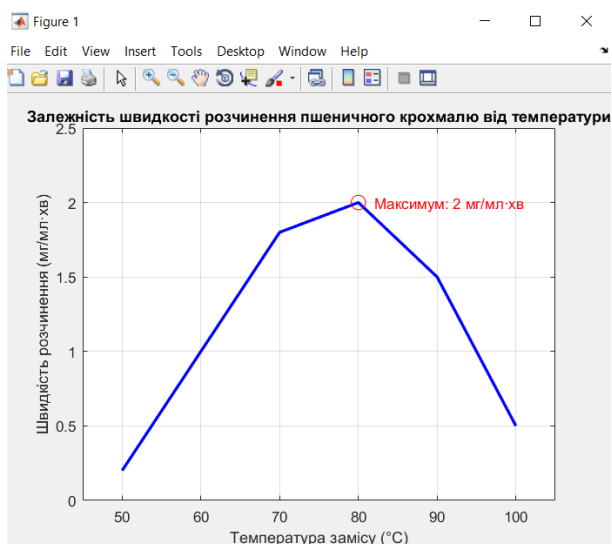


Рис. 3.2. Швидкість розчинення крохмалю від температури

Діапазон температур змінювався від 50 °C до 95 °C з інтервалом у 5 °C. За результатами проведених експериментів було визначено кількість зерен, що не розчинилися, а також проаналізовано швидкість розчинення елементів. Отримані результати містять інформацію про кількість залишкових нерозчинених зерен і ферментів за кожної температури, а також про динаміку швидкості розчинення. Візуалізацію результатів наведено на рисунку 3.3

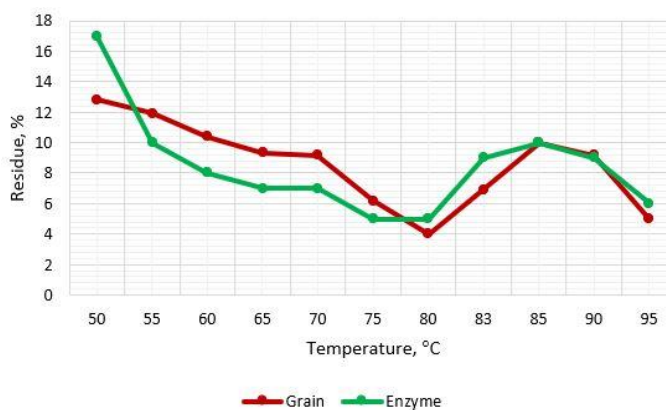


Рис. 3.3. Залежність кількості нерозчинених зерен та ферментів (у %) від температури

В результаті виконаного дослідження встановлено, що піковим моментом виникнення клейстеризації є температурний режим 75-83 °C, що узгоджується з

даними літературних джерел. У даному інтервалі при зростанні швидкості розчинення компонентів суміші спостерігається мінімальне значення нерозчинених компонентів. Подальше їх збільшення може бути пояснене зростанням динамічної в'язкості замісу, що заважає розчиненню компонентів. Встановлений температурний проміжок дозволяє припустити, що внесення ферментів саме при згаданих температурах дозволить оптимізувати виробництво.

Ґрунтуючись на проведених дослідженнях було запропоновано систему керування приготуванням замісу, особливістю застосування якої є те, що під час приготування замісу визначають його температуру і вязкість, порівнюють значення вязкості із заданим допустимим значенням і визначають похибку значення вязкості, а за величиною цієї похибки в блоці корегування формують сигнал корекції температури замісу, який змінює величину її заданого значення, а це нове значення заданої відкоректованої температури замісу порівнюють з поточним значенням, причому сигнал розходження подають на блок регулювання подачі пари для підігріву замісу [37]. Таким чином здійснюється регулювання не лише в'язкості замісу і, як наслідок, концентрації розчиненого крохмалю.

Схема реалізації запропонованого способу підготовки замісу зображена на рисунку 3.4. Для управління процесом приготування замісу використовуються три контури управління. Перший контур забезпечує задане співвідношення ферменту та гарячої води в розчині деструктуратора крохмалю, другий контур забезпечує задане співвідношення подрібненого зерна і водного розчину деструктуратора крохмалю, третій контур забезпечує стабілізацію в'язкості крохмалевмісної маси шляхом регулювання температури T всередині бункера замісу за допомогою регулятора подачі пари.

Змішування гарячої води з ферментами здійснюється у відповідному співвідношенні. Задане значення концентрації ферменту з водою порівнюються з поточним значенням в елементі порівняння 1 і у разі виникнення помилки неузгодженості $E_{\phi} = (C_{\phi}^{\text{зад}} - C_{\phi})$ сигнал надходить до регулятора R1, який змінює кількість ферменту, що надходить на змішування.

зростати і перевищувати задане значення з умов подальшого переміщення замісу, тоді поточне значення в'язкості замісу, яке вимірюється величиною значення струму, що використовується мішалкою, надходить в елемент порівняння, де співставляється із заданою в'язкістю. У разі виникнення помилки неузгодженості $E\eta = (\eta_{\text{зам}}^{\text{зад}} - \eta_{\text{зам}})$ сигнал надходить до блоку корегування КПр1, який формує сигнал корекції температури Sk1, що надходить на елемент порівняння, де відбувається порівняння з заданою температурою замісу. При виникненні помилки неузгодження формується коректоване значення температури замісу. Після чого здійснюється порівняння поточного значення з заданою відкоректованою температурою замісу. Помилка неузгодження E_t , яка виникає, надходить на регулятор подачі пари R3, яка підігріває заміс [38].

В основу процесу керування покладено залежність концентрації розчиненого крохмалю в замісі від значення його в'язкості. Ця залежність наведена в таблиці 2.1 і на рисунку 2.6.

3.2. Обґрунтування використання ПІД-регулятора для регулювання підготовкою замісу

Для регулювання параметрів процесу замісу, а саме концентрації та об'єму замісу використаємо найросповсюдженіший класичний PID-регулятор. Оскільки саме цей регулятор легко реалізується, надійний, забезпечує стабільність процесу, дозволяє адаптувати роботу процесів під вказані умови та підтримувати параметри в допустимих межах [81, 82].

Розглянемо змішувальний бак як багатовимірну систему. Бак має два підведення живлення; відповідні потоки можуть регулюватися виконавчими органами (вентиллями). Концентрація в кожному з потоків постійна і не може бути змінена. Бак має один вихідний отвір, і задача управління полягає в створенні системи керування, яка б автоматично регулювала витрати через вентилі живлення таким чином, щоб підтримувати витрату і концентрацію крохмалю в вихідному потоці постійними відповідно до заданих значень (рис. 3.1) [80].

Вхідними параметрами процесу є масові витрати потоків, що надходять в

змішувач: зерно та фермент з водою при заданих значеннях температури замісу, степеню подрібнення зерна, гідромодуля суміші. Вихідними параметрами (показниками процесу приготування замісу) є витрата замісу і концентрація розчиненого в ньому крохмалю.

Можуть мати місце такі збурення: відхилення вхідних концентрацій, вхідних витрат внаслідок зміни тисків перед клапанами, втрати рідини через витоки та інше.

Система регулювання, яка розглядається (рис. 3.4) є замкнутою, оскільки в ній присутній регулятор, який використовує дані про зміну об'єму та концентрації замісу на виході з ємності, так і значення заданих вхідних витрат і концентрації для формування сигналу, який регулює положення клапанів

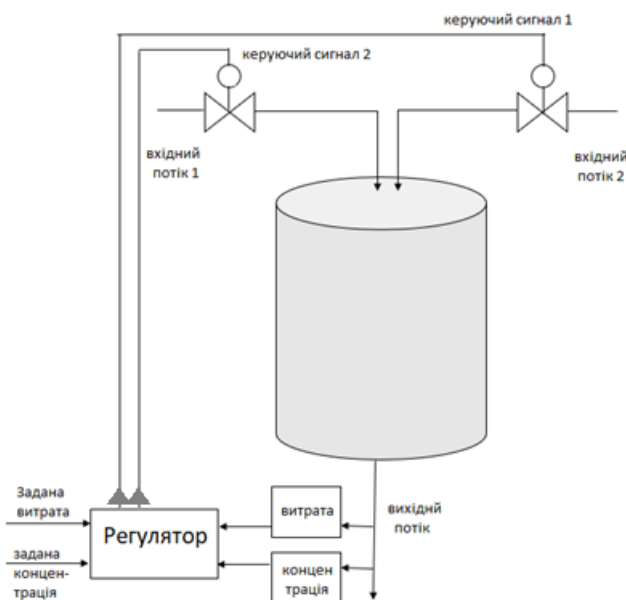


Рис. 3.4. Схема САР змішувальним баком

3.2.1. Дослідження динаміки процесу керування підготовкою замісу при використанні ПІД-регулятора

За результатами проведеної лінеаризації системи (3.17), яка має загальний вигляд:

$$\dot{x} = Ax + Bu(t), \quad (3.21)$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{pmatrix} \text{ і } B = \begin{pmatrix} \frac{1}{\frac{c_1-c_0}{V_0}} & \frac{1}{\frac{c_2-c_0}{V_0}} \end{pmatrix}$$

З врахування попередніх записів, було отримано динамічну систему регулювання:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= -0,0041\xi_1 + \mu_1 + \mu_2 \\ \dot{\xi}_2 &= -0,0041\xi_2 - 0,0033\mu_1 + 0,323\mu_2, \end{aligned} \quad (3.22)$$

де $\xi_1(t)$, $\xi_2(t)$ –регульована концентрація та об'єм замісу;

$\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$ – регулюючі витрати води з ферментом та зерна, що надходять у чан для змішування.

Оскільки досліджувана модель змішування компонентів має два потоки – вода з ферментом та зерно, а отже система має два незалежні контури регулювання і як наслідок закон регулювання має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= -(k_{p1}\xi_1(t) + k_{i1} \int_0^t \xi_1(t)dt + k_{d1} \frac{d\xi_1(t)}{dt}), \\ \mu_2 &= -(k_{p2}\xi_2(t) + k_{i2} \int_0^t \xi_2(t)dt + k_{d2} \frac{d\xi_2(t)}{dt}), \end{aligned} \quad (3.23)$$

де k_p, k_i, k_d – коефіцієнти ПД-регулятора,

$\xi_1(t), \xi_2(t)$ відповідно похибки в момент часу t .

Реалізація закону ПД-регулювання проведена в програмному середовищі Matlab/Simulink (додаток Б), структурна схема подана на рисунку 3.5.

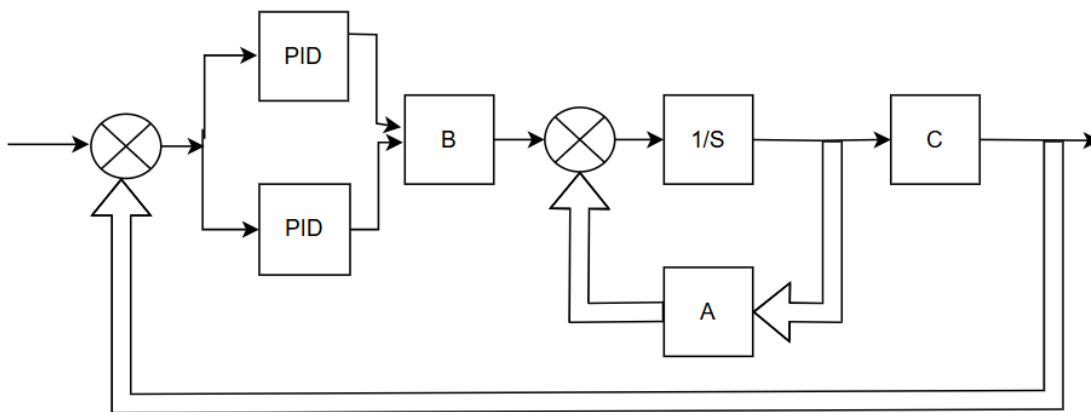


Рис. 3.5 – Структурна схема реалізації PID-регулятора

В моделі передбачено наповнення ємності двома потоками $F_1(t)$, $F_2(t)$. Це поточні витрати води з ферментом та зерна, які система змінює в будь-який момент часу, для заповнення змішувача з метою досягнення заданої концентрації розчиненого крохмалю та швидкості потоку (виготовлення) замісу. Обидва вхідних потоки містять постійні концентрації c_1 , c_2 . Вихідний потік має об'ємну швидкість потоку $F(t)$. Відповідно до розглянутої математичної моделі введемо допущення, що вміст бака перемішується так, що концентрація вихідного потоку дорівнює концентрації $c(t)$ [16].

Виконаємо серію дослідів для різних операційних точок, що відповідають заданим значенням об'єму замісу та його концентрації, що наведені у таблиці 3.1. Параметри симуляції, були отримані з реальних виробництва таких як спиртовий завод в м. Луцьку, Борокський спиртовий завод та Марилівський спиртовий завод.

Таблиця 3.1

Параметри симуляції процесу змішування для різних заданих об'ємів замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю

№	Заданий об'єм замісу в чанку, м ³	Концентрація розчиненого крохмалю, г/ см ³
1	1	1,04
2	1,6	1,09
3	1,3	1,09

Налаштування параметрів PID-регулятора проведемо з використанням

класичного методу Зіглера-Нікольса та автоматичних налаштувань у середовищі Matlab/Simulink з блоком PID Controller.

У відповідності до методики Зіглера-Нікольса для розрахунку параметрів регулятора спочатку необхідно задати пропорційну k_p складову ПД-регулятора, яка забезпечить коливання в системі керування з постійним періодом коливання, а всі інші коефіцієнти відповідно прирівнюються до нуля. Після досягнення такого результату всі інші коефіцієнти розраховуються згідно формул, що подані [109, 118]:

$$k_p = 0,6K_M$$

$$k_i = \frac{0,6K_M}{0,5 \times T}$$

$$k_d = 0,6K_M \times 0,125 \times T$$

Внаслідок проведених розрахунків отримано такі коефіцієнти $k_p = 18$, $k_i = 18$, $k_d = 4.5$.

Після проведеної серії експериментів відповідно до значень заданих об'ємів замісу в чанку та концентрацій розчиненого крохмалю, що вказані у таблиці 3.1 ми отримали наступні результати перехідних характеристик із застосуванням ПД-регулятора (рис. 3.6-3.18):

1) експеримент для заданого об'єму 1 м^3 при заданих значеннях коефіцієнтів регулювання k_p , k_i , k_d (позиція №1 з таблиці 3.1):

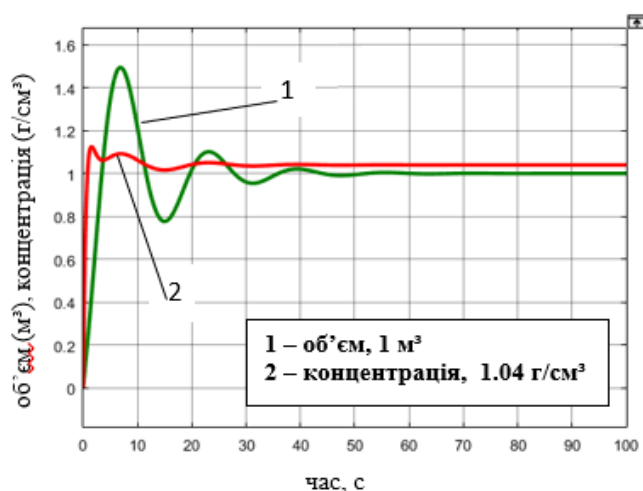


Рис. 3.6. Перехідні характеристики першого експерименту

2) експеримент для об'єму $1,6 \text{ м}^3$ при заданих значеннях коефіцієнтів регулювання k_p, k_i, k_d (позиція №2 з таблиці 3.1):

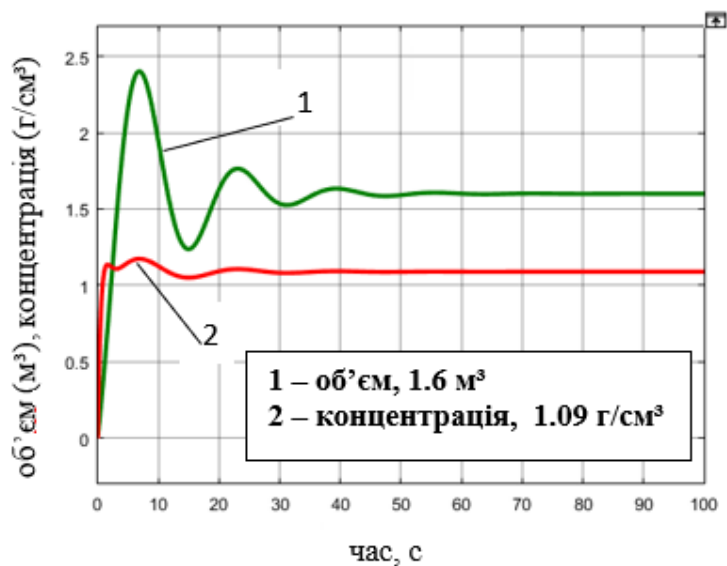


Рис. 3.7. Перехідні характеристики другого експерименту

3) експеримент для об'єму $1,3 \text{ м}^3$ при заданих значеннях коефіцієнтів регулювання k_p, k_i, k_d (позиція №3 з таблиці 3.1):

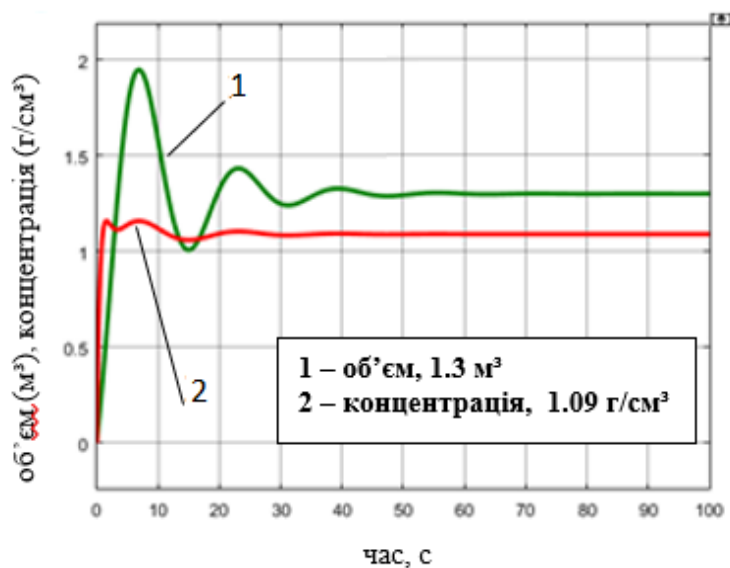


Рис. 3.8. Перехідні характеристики третього експерименту

Отримані характеристики демонструють динамічні реакції системи на

збурення чи зміну вхідних параметрів, для двох характеристик: об'єму та концентрації. Проаналізувавши отримані перехідні характеристики можна зробити висновки:

1. Об'єм (зелена крива на графіках): система демонструє різну амплітуду коливань об'єму замісу та час регулювання від 50 до 60 с. Це має негативний вплив на динаміку системи, а саме відсутність стабільності об'єму та перевитрат вхідних матеріалів.

2. Концентрація (червона крива на графіку): система теж демонструє перерегулювання від 7% до 10%, час регулювання системи керування знаходиться в межах 30-40 с, що негативно відображається на якості замісу та ускладнює його подальше перекачування на наступні стадії і вимагає збільшення енергетичних витрат для його обробки.

З отриманих характеристик та показників якості робимо висновки, що розраховані параметри ПД-регулятора за методом Зіглера-Нікольса потребують корегування для покращення умов регулювання.

Для зміни показників якості системи керування необхідно збалансувати значення коефіцієнтів регулятора пропорційної k_p , інтегральної k_i та диференційної k_d складових.

Скористаємось другим методом Зіглера-Нікольса, який ще називають «метод відкритого контуру», оскільки для розрахунку параметрів регулятора спочатку досліджують реакцію системи керування на одиничний стрибок і лише потім проводять розрахунки k_p, k_i, k_d згідно формул 3.24-3.26 [109, 118].

$$k_p = 1,2 \frac{T}{K \times L} \quad (3.24)$$

$$T_i = 2 \times L \quad (3.25)$$

$$T_d = 0,5 \times L \quad (3.26)$$

За другим методом отримали такі коефіцієнти регулятора: $k_p = 2,04$, $T_i = 2$, $T_d = 0.5$.

Проведемо симуляцію процесу для об'ємів та концентрації розчиненого крохмалю в замісі використовуючи дані з таблиці 3.1. Перехідні характеристики

зображено на рисунку 3.9-3.11.

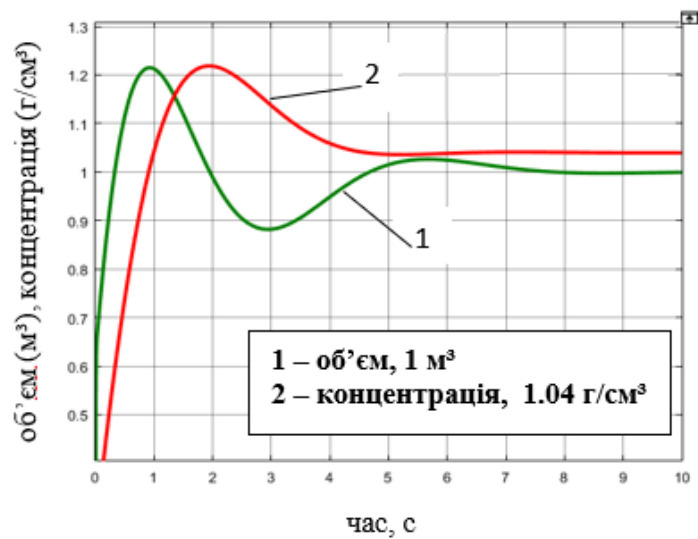


Рис. 3.9. Перехідні характеристики для об'єму $1 m^3$

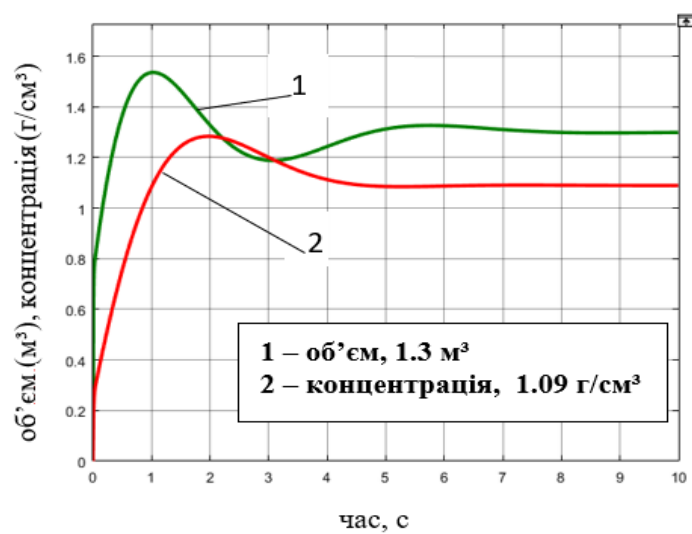


Рис. 3.10. Перехідні характеристики для об'єму $1,3 m^3$

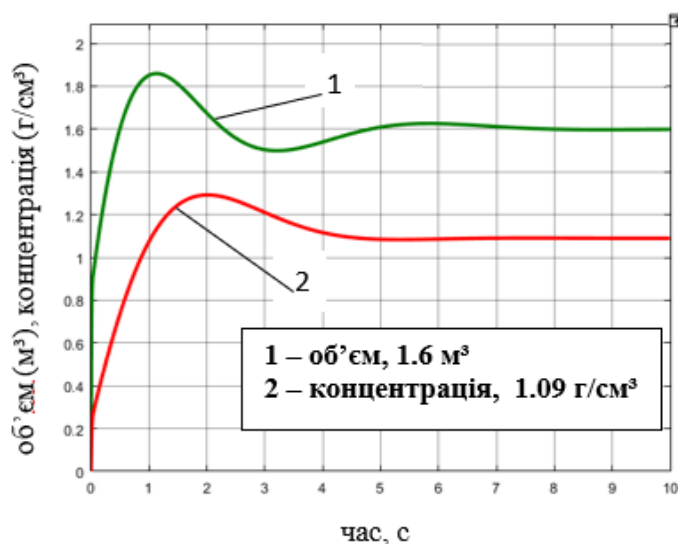


Рис. 3.11. Перехідні характеристики для об'єму $1,6 \text{ m}^3$

За результатами отриманих характеристик можна зробити такі висновки:

1. Об'єм (зелена крива на графіках): демонструє наявність перегулювання, яке становить від 15 % до 20 %, але поряд з тим час регулювання становить лише 7-8 с.
2. Концентрація (червона крива): присутнє перегулювання, яке становить від 11 % до 19 % і час регулювання 5-6 с.

Отримані перехідні характеристики демонструють покращення динаміки об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в чанку замісу. Проте даний метод не забезпечує одночасну стабілізацію двох параметрів, які є взаємозалежними.

Наступний метод для налаштування параметрів PID-регулятора передбачає використання вбудованого блоку в середовищі Matlab/Simulink. Для об'єму замісу використано дані з таблиці 3.1: $k_p = 0,12, k_i = 0,005, k_d = 0,17$; $k_p = 0,07, k_i = 0,002, k_d = 0,28$; $k_p = 0,14, k_i = 0,006, k_d = 0,30$. Також для концентрації розчиненого крохмалю (табл. 3.1.): $k_p = 0,47, k_i = 0,038, k_d = 0,37$; $k_p = 0,07, k_i = 0,002, k_d = 0,32$; $k_p = 0,068, k_i = 0,0022, k_d = 0,31$. Результати симуляції (рис. 3.12-3.14) демонструють різні реакції системи та керування параметрів.

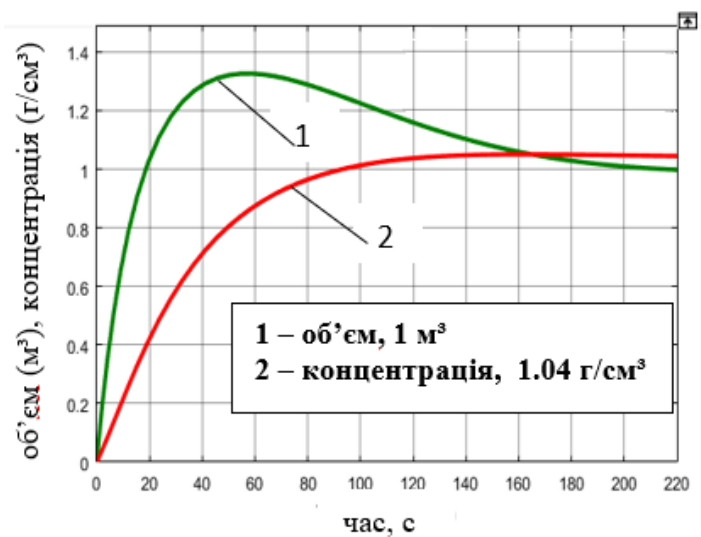


Рис. 3.12. Реалізація PID-регулятора для об'єму 1 m^3 замісу при автоматичних налаштуваннях k_p, k_i, k_d .

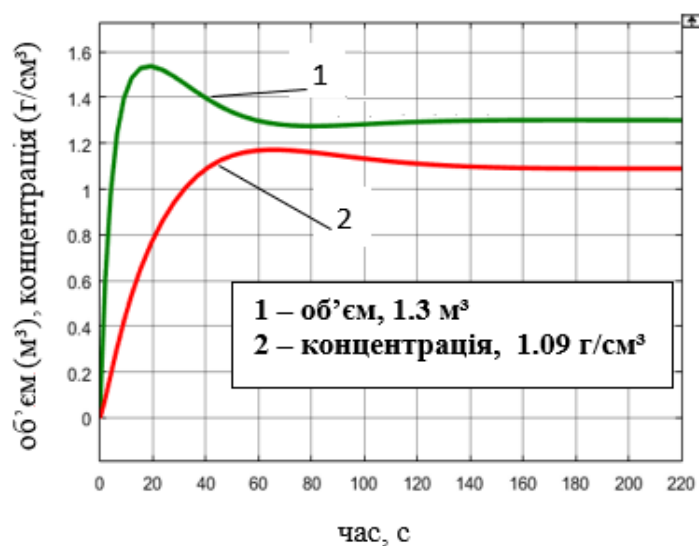


Рис. 3.13. Реалізація PID-регулятора для об'єму 1,3 m^3 замісу при автоматичних налаштуваннях k_p, k_i, k_d .

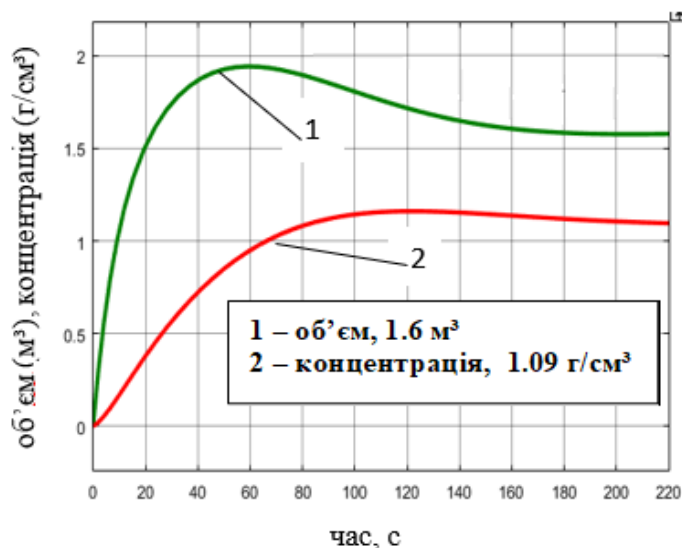


Рис. 3.14. Реалізація PID-регулятора для об'єму 1.6 m^3 замісу при автоматичних налаштуваннях k_p, k_i, k_d .

За результатами автоматичного налаштування параметрів ПД-регулятора на рисунку 3.10 бачимо зміну динаміки характеру перехідних процесів, що демонструє стабілізацію концентрації, відсутність коливань в порівнянні із першим методом Зіглера-Нікольса, але зберігається перегулювання для об'єму до 20% та збільшення часу регулювання від 140 с до 200 с.

Із переліку запропонованих методик розрахунку параметрів коефіцієнтів PID-регулятора за отриманими перехідними характеристиками, приймаючи до уваги показники якості найбільш підходящим є другий метод Зіглера-Нікольса. Зведені дані показників системи керування об'ємом та концентрацією розчиненого крохмалю в чанку замісу подані в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1

Показники якості перехідних характеристик

№	Номер методу	Об'єм		Концентрація	
		$\delta, \%$	$t_p, \text{с}$	$\delta, \%$	$t_p, \text{с}$
1	Метод 1	50 %	50-60 с	7-10 %	30-40 с
2	Метод 2	15-20 %	7-8 с	11-19 %	5-6 с
3	Метод 3	20 %	140-200 с	0,9 %	120-160 с

Практичне дослідження динаміки процесу керування підготовкою замісу при використанні ПІД-регулятора було проведено із використанням двох контролерів DS1104 фірми dSPACE. Програмування та відтворення моделі, що відображає поведінку системи здійснювалось засобами MATLAB/Simulink. Для забезпечення функціонування контролера та можливості передачі та отримання сигналів було проведено ряд налаштувань, зокрема підключення до цифрово-аналогового (ЦАП) і аналогово-цифрового (АЦП) перетворювачів, а також узгодження MATLAB/Simulink з спеціалізованим пакетом ConrolDesk для моніторингу та управління процесом в реальному часі: задання регульованих параметрів об'єму замісу, концентрації крохмалю, параметрів регулятора k_p, k_i, k_d та збурень. Моделювання процесу керування зображена на рисунку 3.15.

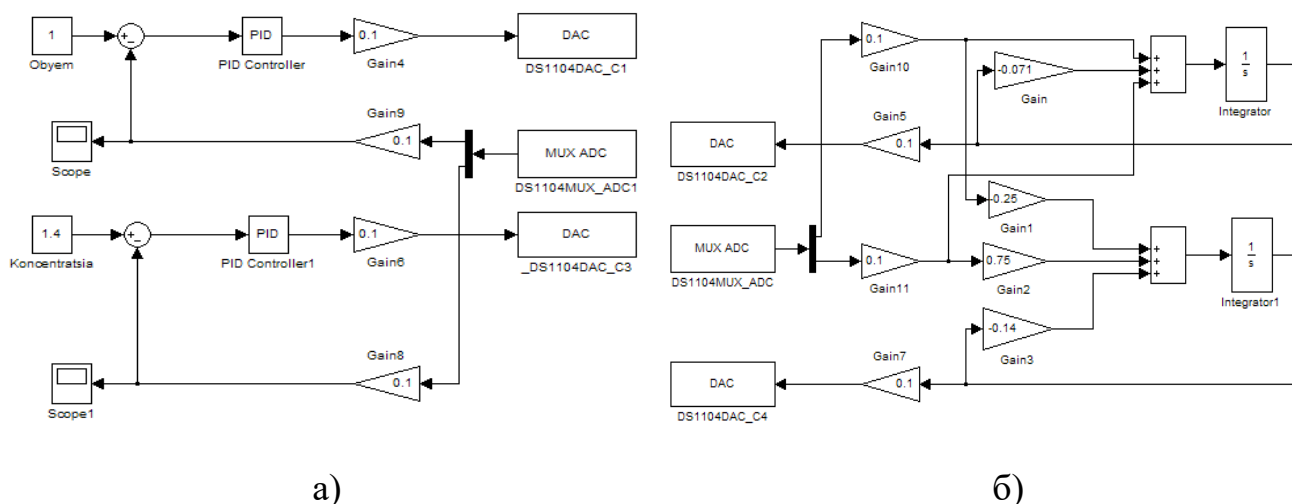


Рис. 3.15. Simulink моделі для симуляції технологічного процесу і взаємодії між двома контролерами DS1104: а) – модель управління; б) – модель об'єкта.

Таким чином, змінюючи операційні точки, що відповідають заданим значенням об'єму замісу та його концентрації, ми можемо побачити реакцію системи та її стабілізацію(рис. 3.16).

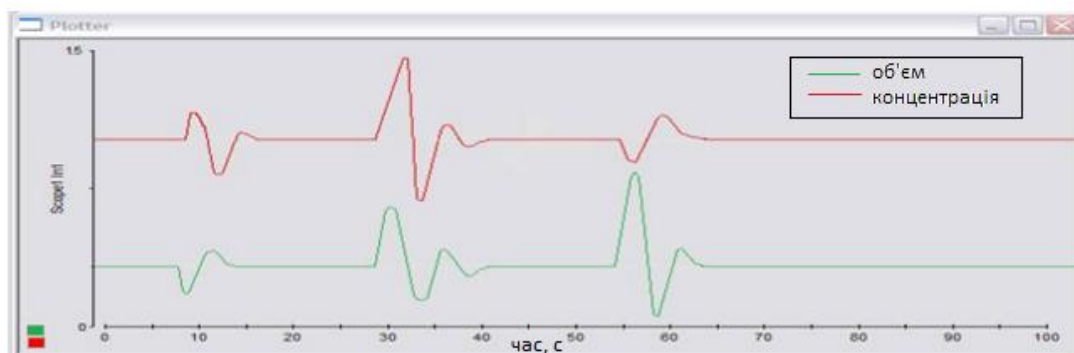


Рис. 3.16. Коливання зумовлені відхиленням концентрації розчиненого крохмалю та об'єму в чанку замісу

За результатами симуляції і практичного дослідження роботи ПІД-регулятора з можна зробити наступний висновок, спостерігається значне перегулювання об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю, що є не бажаним для досліджуваного процесу. Це призводить до перевитрат вхідних матеріалів. Ці недоліки вимагають необхідність розгляду іншого типу регулятора.

Висновки до розділу 3

1. Побудована узагальнена модель процесу змішування дозволила визначити якісні показники приготування замісу при побудові системи автоматичного керування процесом, а саме концентрацію розчиненого крохмалю в готовому замісі та його об'єму.

2. Проведений аналіз процесу приготування замісу показав доцільність застосування системи керування приготуванням замісу, яка використовує під час приготування замісу контроль його температури і вязкості.

3. Експериментальне дослідження процесу із використанням контролерів DS1104 фірми dSPACE підтвердило наявність перегулювання при регулюванні об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю, що в свою чергу призводить до надлишкових витрат вхідних матеріалів,

4. Під час проведеного дослідження проаналізовано здатність застосування класичного ПІД-регулятора для системи з двома входами та двома виходами (MIMO-система). Встановлено, що ефективність такого регулювання знижена

через взаємозв'язки між каналами. Зокрема спостерігається ускладнення стабілізації системи керування збільшенням часу регулювання та наявністю перегулювання від 15-20%. В зв'язку з цим доцільно використати для керування процесом приготування замісу LQR - регулятор.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Адаптація LQR регулятора до процесу керування приготуванням замісу

Проведені дослідження використання PID-регулятора для автоматичного керування процесом приготування замісу показали, що його пряме застосування є недоцільним через значні коливання значень показників процесу, а саме параметрів об'єму замісу та концентрації розчиненого крохмалю (див. перехідні характеристики, п. 3.2.1).

Для покращення регулювання концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу доцільно використати робастне стабілізаційне керування процесом, яке забезпечує плавність перехідних режимів [58, 110]. Це, в свою чергу, забезпечує економію витрат вхідних матеріалів, покращення якості замісу та безперебійне надходження замісу заданої якості на наступні етапи виробництва.

Регулятор (LQR - linear quadratic regulator) дозволяє мінімізувати цільову функцію, за рахунок обрання відповідного закону регулювання параметрів об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю в суслі.

Лінеаризована система рівнянь, що описує простір станів (див. 3.17), має вигляд:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2\theta} \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{V_0} & \frac{1}{V_0} \\ \frac{c_1 - c_0}{V_0} & \frac{c_2 - c_0}{V_0} \end{pmatrix} u(t),$$

де вихідна змінна $x(t) = \text{col}[c(t), V(t)]$, відповідно регульована концентрація розчиненого крохмалю та об'єм замісу в чанку; вхідна змінна $u(t) = \text{col}[F_{10}(t), F_{20}(t)]$ – регулюючі витрати води з ферментом та зерна, що надходять у чанок.

Для того, щоб спрямувати систему в цільові значення $x(t) = \bar{x}$, зробимо заміну $x(t) = \bar{x} + y$, $u = \bar{u} + v$, де y є нова незалежна змінна і $\bar{u}$ вибирається з умови [51]:

$$A\bar{x} + B\bar{u} = 0.$$

Отримаємо:

$$\bar{u} = -B^{-1}A\bar{x} \quad (4.1)$$

і система $\dot{y} = Ay + Bv$ матиме нульове положення рівноваги.

Отже, для отримання зворотного зв'язку необхідно знайти невідому матрицю K , загальний вид якої наступний [97]:

$$u = \bar{u} - K(x - \bar{x}), \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{10} \\ F_{20} \end{bmatrix} - K \left(\begin{bmatrix} V \\ C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_0 \\ C_0 \end{bmatrix} \right),$$

де x – це значення поточного стану концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу в чанку; u – керуючий сигнал для вхідних витрат води з ферментом та зерна; $\bar{u}$ – номінальні значення витрат води з ферментом та зерна; $\bar{x}$ – цільові значення концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу в чанку.

Знайдена матриця коефіцієнтів має бути такою, щоб система (4.1) зворотнього зв'язку мала наступні властивості [97]:

- $u(x)$ досягає асимптотичної стійкості рівноваги;
- мінімізувала функціонал якості (4.3).

$$J = \int_0^\infty [(x - \bar{x})^T Q (x - \bar{x}) + (u - \bar{u})^T R (u - \bar{u})] dt, \quad (4.3)$$

$$J = J_x + J_u$$

де $Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{bmatrix}$; $R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$ – вагові матриці відхилень станів x (концентрація розчиненого крохмалю та об'єм замісу в чанку) та керувань u (витрати води з ферментом та зерна) від номінальних значень $\bar{x}$ та $\bar{u}$ відповідно.

Оптимальна траєкторія стану $x(t) = x_{opt}(t)$, продукована регулятором, мінімізує набір цілей (слідє цільового оптимальним чином), відображених у

функціоналі (4.2). Закон керування $u(x)$ спрямовує систему асимптотично до цільового значення фазового вектора $x(t)$. Матриці Q та R розраховуються або ж довільно вибираються так, щоб забезпечити умову позитивної визначеності згідно цілей задачі [103].

Розглянемо тепер квадратичну форму $V = (x - \bar{x})^T P (x - \bar{x})$, де P - це стала симетрична матриця з додатними значеннями. Ця функція демонструє на скільки віддалений стан системи x від заданого $\bar{x}$ (цільового) і повторює форму еліпсів в просторі станів. За умови, якщо $V < 0$ (за винятком $x = \bar{x}$, де $V = 0$), це свідчить про те, що система під дією керуванням LQR-регулятора поступово повертається до заданого значення $\bar{x}$ [97, 114].

На базі відомої теоретичної бази, розв'язуємо алгебраїчне рівняння Ріккати:

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P = -Q \quad (4.4)$$

і отримуємо матрицю коефіцієнтів $K = R^{-1}B^T P$ [98, 121].

Для розв'язання цих рівнянь використовуємо чисельні методи Matlab, які описані нижче. Адаптований регулятор, забезпечує стійке положення рівноваги, його надійність впливає з рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана [114]. При цьому можна досягти оптимальності та стійкості з будь-якою кількістю початкових станів.

Центр управління, яким є контролер в системі керування, оцінює стан системи після збурень, а далі встановлює параметри матриці керувань. Закон керування забезпечує стан системи, що стабілізується та досягає заданих значень, а помилки системи сходяться до нуля. Використовуючи Control System Toolbox програмного середовища MatLab обчислюємо унікальне рішення X матричного рівняння Ріккати. Для обчислення відповідних матриць, які визначають закон керування системи використовуємо команду *sare*, що дає розв'язок матричного рівняння Ріккати. Для отримання розв'язку та керуючих функцій, що спрямовують стани системи до їх заданих значень виконуємо підбір вагових матриць R і Q . Вони обираються з умови мінімуму функціоналу якості, при мінімальних енергетичних

та матеріальних витратах, що визначаються функціоналом якості, таким чином, щоб запобігти небажаним відхиленням станів системи від динамічної рівноваги [51].

Для удосконалення закону керування матрицю Q можна параметризувати величинами, що відповідають розміру збурення та відповідного внеску використовуваних стратегій, які пов'язані з обмеженнями. Матриця R моделює зусилля, пов'язані з рухом полюсів системи, які для стійкості системи розміщуються в лівій комплексній півплощині [97].

Внесок реалізації стратегій контролюючого впливу стосовно кожної окремо фазової змінної враховується в матриці R . В свою чергу, матриця Q вибирається додатно визначеною, вона обмежена.

Параметри матриці Q дозволяють контролювати величини фазових змінних і, отже, відносне затухання системи. Властивості розробленого лінійно-квадратичного (LQR) контролера вважаються такими, що забезпечують добре затухаючу систему управління, яка адекватно апроксимує як бажану, так і фактичну поведінку, що спричинена збурюючими впливами [64, 65].

4.2. Методологія проведення виробничого дослідження використання LQR регулятора

4.2.1. Визначення параметрів моделювання

Одним із ключових аспектів математичного моделювання є визначення параметрів досліджуваного процесу, що забезпечує адекватне відображення реального процесу приготування замісу. Дані, що відповідають даним системи керування, було отримано на основі математичного моделювання процесу підготовки замісу (див. 3.17):

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2\theta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\theta} \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{v_0} & \frac{1}{v_0} \\ \frac{c_1 - c_0}{v_0} & \frac{c_2 - c_0}{v_0} \end{pmatrix} u(t)$$

Чанок заповнюється за допомогою двох потоків зі змінними миттєвими

витратами – води з ферментом та зерна. Обидва вхідні потоки містять розчинну рідину з постійними концентраціями. Вихідними параметрами є об'єм замісу в чанку і концентрація розчиненого в ньому крохмалю.

Дослідження, наведені в розділі 3 для двохпараметричної системи автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно теплової обробки на основі використання класичного PID-регулятора, показали, що реалізація регулювання не забезпечує одночасного регулювання та стабілізації двох взаємоз'язаних параметрів, а саме об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в замісі. Важливість забезпечення стабільного значення концентрації впливає на відсотковий вміст спирту, а забезпечення стабільного значення об'єму замісу на попередження інфікування замісу при утворенні його залишкових запасів. Тому для оптимізації процесу керування обома параметрами запропоновано використати LQR-регулятора, який враховує взаємоз'язки між параметрами та покращує їх динаміку.

4.2.2. Особливості налаштування LQR-регулятора для керування процесом приготування замісу

В розділі 2 було досліджено та встановлено, що у процесі приготування замісу важливими є регулювання таких параметрів, як об'єм приготовленого замісу і концентрація розчиненого в ньому крохмалю. Поширені параметри процесу змішування для різних заданих об'ємів замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю, які доцільно використати для симуляції наведені в табл. 3.1, які використаємо для дослідження LQR-регулятора (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Параметри симуляції процесу змішування для різних заданих об'ємів замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю

№ експерименту	Заданий об'єм замісу в чанку, м ³	Концентрація розчиненого крохмалю, г/ см ³
1	1	1,045
2	1,6	1,04

Для розрахунку параметрів LQR-регулятора скористаємось програмним середовищем Matlab використавши класичну теорію linear quadratic regulator з метою налаштування системи керування та перевірки доцільності використання такого закону регулювання.

У LQR-регуляторах показником ефективності системи є функція витрати J (див. 4.3), яка мінімізується регулятором, відповідно матриці Q і R – це матриці стану та керування дозволяють визначити важливість відхилень, а також витрати енергії системи. Тому вкрай важливо, щоб вони були розраховані точно, для забезпечення успішної роботи системи керування. Для забезпечення точності розрахунків використаємо декілька методик, зокрема вбудований алгоритм в програмному середовищі Matlab та метод Брайсона [57]. Або ж можна скористатись алгоритмом, що наведений у додатку В.

Для розрахунку використаємо програмне середовище Matlab і вбудовану функцію $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$, яка передбачає введення вхідних матриць A , B , та Q і R . Для симуляції скористаємось даними з таблиці 4.1 та вихідні $\xi_1(t)_{ref} = 1$, $\xi_2(t)_{ref} = 1,045$ і початкові стани $\xi_1(t)_{init} = 1$, $\xi_2(t)_{init} = 1$. Значення матриць Q і R використаємо по замовчуванню одиничними. Відповідна перехідна характеристика має вигляд (рис. 4.1):

Вхідні матриці:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0041 & 0 \\ 0 & -0,0041 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -0,0033 & 0,323 \end{bmatrix}$$

Відповідно вагові матриці:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.7928 & -0.5918 \\ 0.6042 & 0.7843 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнт підсилення керування становить

$$\bar{u} = \begin{pmatrix} -0.0089 \\ 0.130 \end{pmatrix}$$

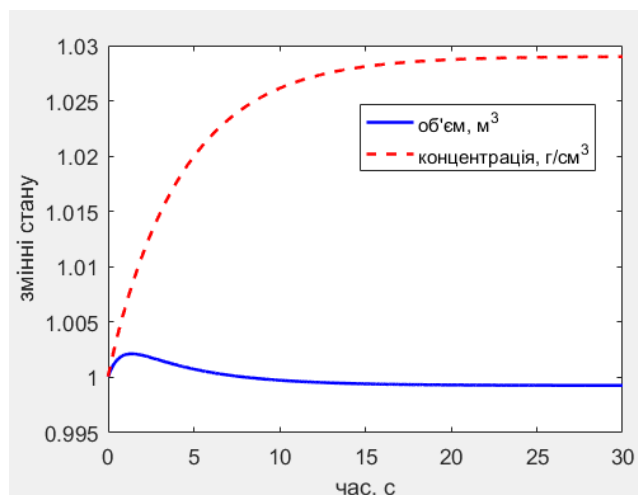


Рис. 4.1. Динаміка зміни об'єму та
концентрації крохмалю в замісі для

$$\xi_1(t)_{ref} = 1, \xi_2(t)_{ref} = 1,045$$

Скористаємось також методом Брісонса для визначення коефіцієнтів вагових матриць Q і R за формулами 4.5-4.6 [60]:

$$Q_i = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } x_i^2}, \quad (4.5)$$

$$R_i = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } u_i^2}. \quad (4.6)$$

Початкові значення коефіцієнтів для досліджуваної системи керування у нашому випадку мають вигляд:

$$Q = \begin{bmatrix} 1/x_1^2 & 0 \\ 0 & 1/x_2^2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1/u_1^2 & 0 \\ 0 & 1/u_2^2 \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

де x_1, x_2 – максимальний об'єм замісу в чанку і макимальна концентрація розчиненого крохмалю; u_1, u_2 – максимальна витрата води з ферментом та максимальна витрата зерна.

Для розрахунку коефіцієнта зворотнього використаємо також середовище Matlab $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$ з введенням вхідних матриць A, B, та Q і R.

Вхідні матриці:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0041 & 0 \\ 0 & -0,0041 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -0,0033 & 0,323 \end{bmatrix}$$

Вагові матриці:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,69 & 0 \\ 0 & 0,54 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 3228 & 0 \\ 0 & 3228 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнт підсилення керування:

$$K = \begin{bmatrix} 0,000413 & 0,00025 \\ 0,000413 & -0,000323 \end{bmatrix}$$

Вектор керування:

$$u = \begin{bmatrix} 0.0002472 \\ 0.0002461 \end{bmatrix}$$

За результатами розрахунку отримано перехідну характеристику (4.2):

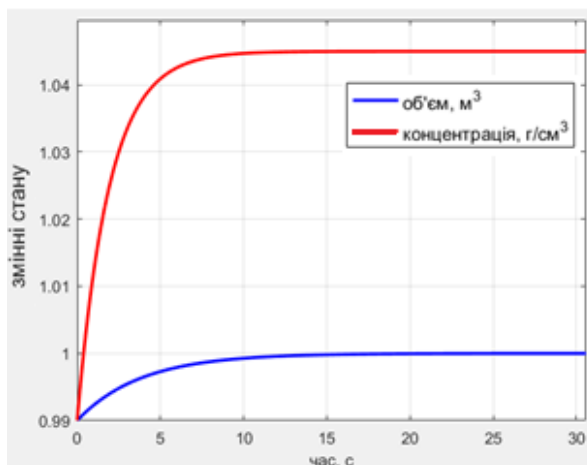


Рис. 4.2. Динаміка зміни значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі для $\bar{x} = (1; 1,045)$ при початковому налаштуванні

За результатами проведеної симуляції, можна зробити висновок, що даний регулятор придатний для двопараметричної системи керування об'ємом та концентрацією розчиненого крохмалю в замісі. Аналіз отриманих перехідних характеристик, дозволив зробити наступні висновки:

1. Використання вбудованих функцій в Matlab забезпечують розрахунок параметрів LQR-регулятора, перехідні характеристики мають час регулювання 20с при очікуваному 2-5с, а також є незначне перерегулювання.

2. Налаштування регулятора за методом Брісонса демонструє повільну

стабілізацію параметрів системи керування до встановленого значення $\bar{x} = (1; 1,045)$.

Оскільки запропоновані методики не забезпечили очікуваного часу регулювання 2-5 с, змодельємо нові параметри LQR-регулятора на основі нових значень коефіцієнтів зворотньої дії K [71], які були розраховані в середовищі Matlab за допомогою функції $[K, P, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$ при різних варіаціях матриць Q і R . Результати розрахунку подані в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Зведені дані проведених експериментів налаштування LQR-регулятора

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1 & -0,1 \\ -0,1 & 1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 20,7291 & 18,9720 \\ 23,6260 & -20,3500 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 69,9510 \\ 8,7245 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1 & -0,1 \\ -0,1 & 1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 6,5699 & 4,5022 \\ 7,2862 & -5,0084 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 22,0593 \\ 2,8581 \end{pmatrix}$
3	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 4,2598 \\ 0,8615 \end{pmatrix}$

Експеримент 1. Проведемо налаштування LQR-регулятора для вихідних та початкових значень станів, що використовуються в цій симуляції $\xi_1(t)_{ref} = 1,6$, $\xi_2(t)_{ref} = 1,04$, $\xi_1(t)_{init} = 1$, $\xi_2(t)_{init} = 1$.

Для моделювання системи використовуємо середовище MATLAB. Елементи матриць вибираються таким чином, щоб обмежити надмірне навантаження керуючих вхідних даних та отримання заданих значень об'єму замісу в чанку і концентрації розчиненого крохмалю відповідно.

Відповідно до алгоритму розраховуємо вагові матриці:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & -0,1 \\ -0,1 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{bmatrix}$$

та матрицю коефіцієнтів стабілізуючого регулятора:

$$K = \begin{bmatrix} 20,7291 & 18,9720 \\ 23,6260 & -20,3500 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнт підсилення керування становить

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} 69,9510 \\ 8,7245 \end{bmatrix}$$

Аналогічним чином проведемо експеримент 2 і експеримент 3 за даними таблиці 4.1.

Експеримент 2. Для вагових матриць:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & -0,1 \\ -0,1 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix}$$

Отримуємо коефіцієнти:

$$K = \begin{bmatrix} 6,5699 & 4,5022 \\ 7,2862 & -5,0084 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнт підсилення керування ϵ

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} 22,0593 \\ 2,8581 \end{bmatrix}$$

Експеримент 3. Для вагових матриць:

$$Q = \begin{bmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{bmatrix}$$

отримуємо матрицю коефіцієнт регулятора:

$$K = \begin{bmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{bmatrix}$$

Коефіцієнт підсилення керування ϵ :

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} 4,2598 \\ 0,8615 \end{bmatrix}$$

Результати проведених трьох експериментів для заданого значення $\bar{x} = (1.6; 1.04)$ для яких обчислено кілька варіантів керування залежно від вибору вагових матриць R і Q . Траєкторії стабілізації для динамічної системи відповідно зображені на рис. 4.3 і рис. 4.4. Часові залежності фазових векторів системи демонструють стійку поведінку.

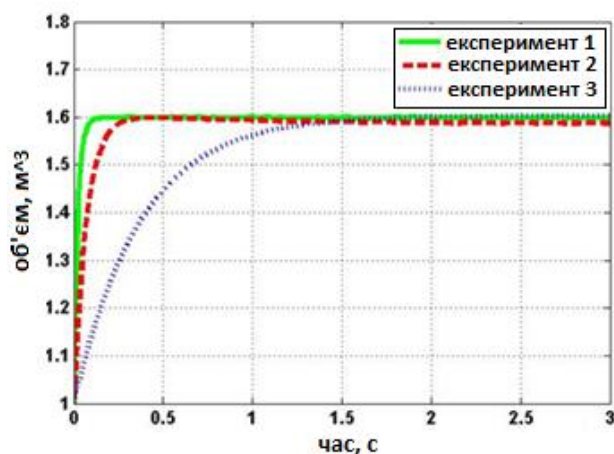


Рис. 4.3. Динаміка зміни об'єму замісу в чанку

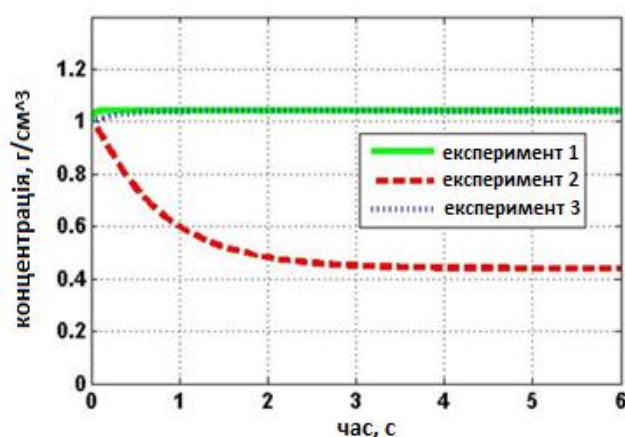


Рис. 4.4. Динаміка зміни концентрації розчиненого крохмалю в заміс

Моделювання траєкторій стабілізованої системи, показали що вектори стану слідує заданим значенням під дією отриманих законів керування/

У цьому контексті представлена модель може бути інтегрована з аналогічними моделями оцінки стану для створення повної моделі керування, яка включає в себе вектор виходів і вектор станів.

За результатами отриманих траєкторій, які демонструють роботу регулятора, а саме керування та стабілізацію об'єму замісу в чанку та концентрації розчиненого крохмалю в замісі можна зробити наступні висновки:

1. Розраховані матриці Q та R забезпечують швидке досягнення бажаного значення рис. 4.3 (рішення 1, 2) та рис. 4.4 (рішення 1);
2. Керуючий сигнал отриманий в експерименті (рішення 3 рис. 4.4-4.4) реалізує надійне керування з точним досягненням заданого значення та забезпечує

плавність траєкторії.

Отже, проведені експерименти, які передбачали налаштування LQR-регулятора при різних значеннях коефіцієнтів показали доцільність використання комбінованого методу розрахунку параметрів регулятора, оскільки отримані траєкторії забезпечують бажані значення за мінімальних зусиль керування та найкоротші проміжки часу.

4.3. Результати використання LQR- регулятора в виробничих умовах

Наступним етапом після налаштувань LQR- регулятора є застосування його у виробничих умовах спиртогорілчаних заводів України: спиртовий завод в м. Луцьку, Марилівський спиртовий завод (Чернівецька обл.), ТОВ «Біопаливно-енергетична компанія» (м. Луцьк) та Борокський спиртовий завод (Львівська обл.).

Таблиця 4.3

Експериментальні та розрахункові дані

№	Назва заводу	Дані з виробництва	Обраховані вхідні параметри
1	2	3	4
1	ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ» (луцький спиртовий завод)	$F_{10} = 0,0022 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_{20} = 0,0018 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_0 = 0,0020 \text{ м}^3/\text{с}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,037 \text{ г/гм}^3$ $c_0 = 1,02 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 6 \text{ м}^3$	$\theta = 3000$ $A = [-0.00016 \ 0; 0 \ -0.00016]$ $B = [1 \ 1; -0.0033 \ 0.0028]$ $(C1-c0)/V0=-0,0033$ $(C2-c0)/V0=0,0028$
2	Марилівський спиртовий завод	$F_{10} = 0,0176 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_{20} = 0,00874 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_0 = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,363 \text{ г/см}^3$ $c_0 = 1,040 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 1,2 \text{ м}^3$	$\theta = 120\text{с}$ $\theta = \frac{1,2}{0.01} = 120$ $A = [-0.0041 \ 0; 0 \ -0.0041]$ $B = [1 \ 1; -0.0033 \ 0.323]$ $(C1-c0)/V0=-0,033$ $(C2-c0)/V0=0,323$
3	ТОВ «Біопаливно-енергетична компанія»	$F_{10} = 0,0033 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_{20} = 0,0017 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_0 = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,074 \text{ г/см}^3$ $c_0 = 1,03 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 7 \text{ м}^3$	$\theta = 3500\text{с}$ $\theta = \frac{V0}{F0} = 3500$ $A = [-0.0042 \ 0; 0 \ -0.0042]$ $B = [1 \ 1; -0.0043 \ 0.0062]$ $(C1-c0)/V0=-0,0043$ $(C2-c0)/V0=0,0062$

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4
4	Борокський спиртовий завод	$F_{10} = 0,0016 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_{20} = 0,0011 \text{ м}^3/\text{с}$ $F_0 = 0,0013 \text{ м}^3/\text{с}$ $c_1 = 1 \text{ г/см}^3$ $c_2 = 1,08 \text{ г/см}^3$ $c_0 = 1,04 \text{ г/см}^3$ $V_0 = 3,5 \text{ м}^3$	$\theta = 2692$ $A = [-0.00018 \ 0; 0 \ -0.00018]$ $B = [1 \ 1; -0.01 \ 0.01]$ $(C1-c0)/V0=-0,01$ $(C2-c0)/V0=0,01$

Випробування LQR-регулятора в виробничих умовах були проведені на українському спиртовому заводі в режимі реального часу із подальшим аналізом в середовищі MATLAB. Ділянка приготування замісу, яка приймає участь у дослідженні зображена на рисунку 4.5. Луцького спиртового заводу на якому проводились експерименти та розрахунки параметрів регулятора.



Рис. 4.5. Стадія приготування замісу на Луцькому спиртогорілчаному заводі

Технологічний процес виробництва спирту, зокрема приготування замісу наступний. Зерно, що надходить на виробництво спочатку очищують від домішок,

далі відбувається процес подрібнення, що є важливим етапом його підготовки, оскільки якість і рівномірність подрібнення визначають температурний режим водно-теплової обробки і ступінь втрат вуглеводів на цьому етапі технологічного процесу. Далі помел змішують з водою у співвідношенні 1:3 (гідромодуль). Концентрацію розчиненого крохмалю підтримують на рівні 15-20%. Температуру замісу підтримують в межах 50-90°C для оптимальної дії ферментних препаратів таких як целюлаза і α -амілаза які надходять у воду, що подається в чанок. Процес перемішування триває від 15 до 30 хв. Після чого заміс насосом подається у відділення гідроферментативної обробки сировини.

В процесі експериментальних досліджень з фахівцями підприємства були відпрацьовані оптимальні технологічні режими з застосуванням енергозберігаючої технології спиртових бражок при низькотемпературній водно-тепловій та термоферментативній обробці зернової сировини з використанням концентрованих ферментів селективної дії, що також створює необхідні умови для подальшого широкомасштабного впровадження цієї технології на заводах галузі.

Зокрема, експериментальні дані Марилівського та Луцького спиртових заводів наведені на рис. 4.6-4.7.

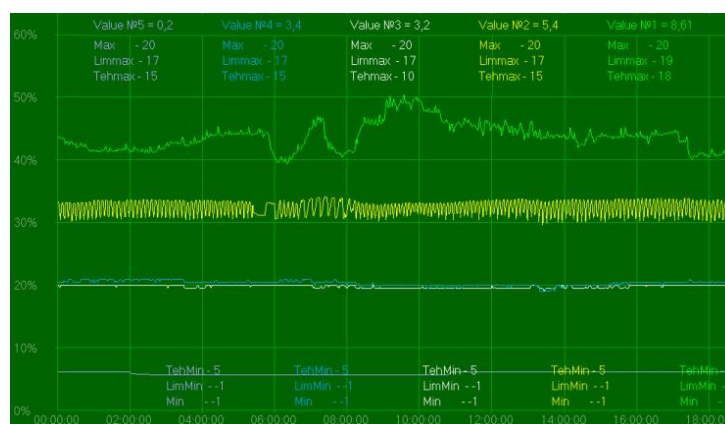


Рис. 4.6. Тестові досліді: витрата зерна (зелений колір); норія поточна (струм) 1 (жовтий колір); зерноочисна машина струм (ток) (білого кольору); струм (момент) шнека зерноочисної машини (синій колір); норія поточна (ток) 2 (сірий колір).



Рис. 4.7. Тестові експерименти: споживання води (зелений колір); гідравлічний модуль (жовтий колір); температура води (синій колір).

Технологічні режими (рис. 4.6-4.7) і відповідні дані були проаналізовані та застосовані для отримання заданих значень ключових параметрів динамічної системи, що були обґрунтовані (див. розділ 2), а саме об'єм в чанку замісу і концентрація розчиненого крохмалю та налаштування необхідних параметрів LQR-регулятора (див. п.4.2.2).

Після збору даних проведені перетворення у відповідні одиниці, проаналізовані, а потім використані для моделювання регулятора та системи керування в цілому.

За допомогою інструментів MATLAB CFTool Data Analyzing обчислюємо задані значення станів системи відповідно до наведених експериментів.

Для проведення симуляцію в середовищі MATLAB було використано дані отримані на спиртовому заводі.

Результати моделювання системи з використання LQR-регулятора з розрахунком коефіцієнта зворотньої дії K у відповідності матриць Q і R для заданих значень $\bar{x} = (1,6; 1,04)$ та $\bar{x} = (1; 1,045)$ подано нижче (4.8-4.11).

Для розрахунку коефіцієнту зворотньої дії K та відповідних значень матриць використано дані з таблиці 4.4, які були отримані з Луцького спиртового заводу

Таблиця 4.4

Параметри симуляції

Величини	Фактичні початкові значення	
	Початкові дані	Задані значення
Витрата води	$F_{10} = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$	$F_{10} = 0,0176 \text{ м}^3/\text{с}$
Витрата зерна	$F_{20} = 0,005 \text{ м}^3/\text{с}$	$F_{20} = 0,00874 \text{ м}^3/\text{с}$
Витрата замісу	$F_0 = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$	$F_0 = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$
Концентрація води	$c_1 = 1$	$c_1 = 1 \text{ кмоль}/\text{м}^3$
Концентрація зерна	$c_2 = 2 \text{ кмоль}/\text{м}^3$	$c_2 = 1,363 \text{ кмоль}/\text{м}^3$
Концентрація замісу	$c_0 = 1,5 \text{ кмоль}/\text{м}^3$	$c_0 = 1,04 \text{ кмоль}/\text{м}^3$
Об'єм замісу в чанку	$V_0 = 1.1 \text{ м}^3$	$V_0 = 1.2 \text{ м}^3$
Час	$\theta = 50 \text{ с}$	$\theta = 50 \text{ с}$

Проведемо ряд симуляцій для Луцького та Марилівського спиртових заводів. Беручи до уваги отримані початкові дані матриць Q і R, врахувавши отримані показники якості перехідного процесу з врахуванням мінімізації функціоналу якості, а саме відхилень станів концентрації розчиненого крохмалю та об'єму замісу в чанку.

Для симуляції були використані дані, що представлені в таблиці 4.2:

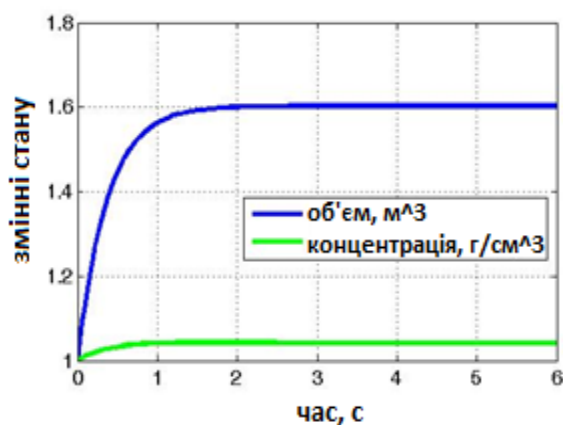


Рис. 4.8. Динаміка зміни значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі для $\bar{x} = (1,6; 1,04)$ при початковому налаштуванні

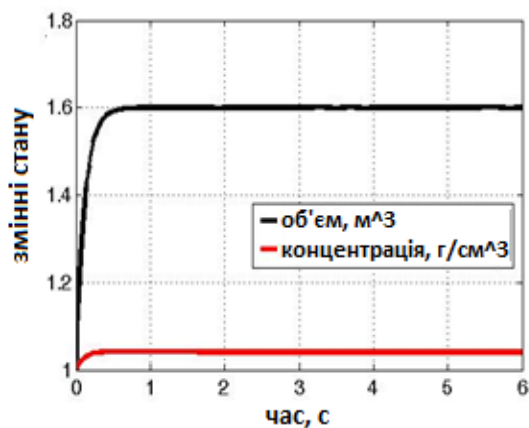


Рис. 4.9. Підібрані значення об'єму та концентрації крохмалю в замісі по завершенню підбору матриць для значень $\bar{x} = (1,6; 1,04)$

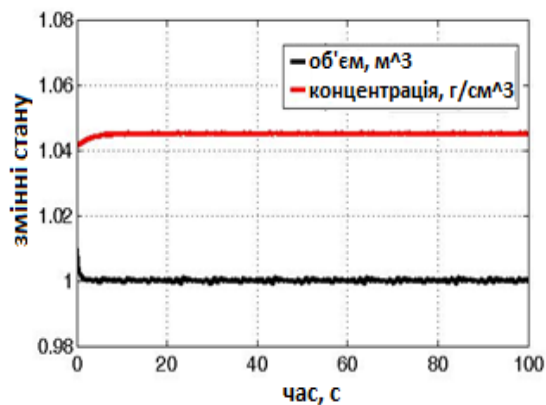


Рис. 4.10. Динаміка зміни значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі для $\bar{x} = (1; 1,045)$ при початковому налаштуванні

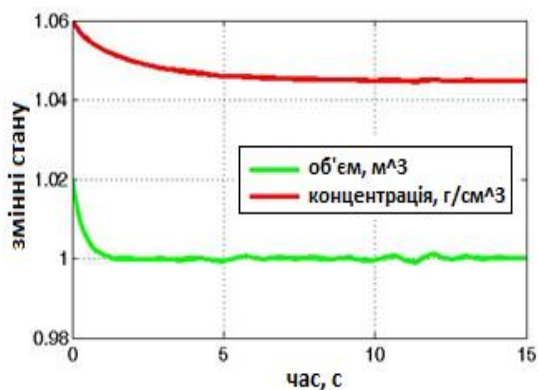


Рис. 4.11. Підібрані значення об'єму та концентрації крохмалю в замісі по завершенню підбору матриць для значень $\bar{x} = (1; 1,045)$

Моделювання 1. Для вхідних матриць, які відповідають виробничим даним (див. табл. 4.2):

$$A = \begin{bmatrix} -0,26 & 0 \\ 0 & -0,52 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0,161 & -0,02 \end{bmatrix}$$

вибрані вагові матриці:

$$Q = \begin{bmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{bmatrix}$$

В результаті отримуємо стабілізований коефіцієнт підсилення керування:

$$K = \begin{bmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{bmatrix}$$

$u_1=4,2598$, $u_2=0,8615$. Отриманий робастний коефіцієнт підсилення керування для задаючого значення $\bar{x}_1 = (1,6; 1,04)$ дає траєкторію керованого стану для номінальних значень об'єму замісу в чанку та значення концентрації розчиненого крохмалю в замісі, результати моделювання представлені на рис. 4.8.

Моделювання 2. Оптимально підібрані вагові матриці:

$$Q = \begin{bmatrix} 1,1 & -0,01 \\ -0,01 & 1,1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{bmatrix}$$

В результаті отримуємо оптимізований коефіцієнт підсилення керування

$$K = \begin{bmatrix} 4.0042 & 2.4680 \\ 4.2916 & -2.0918 \end{bmatrix}$$

$u_1= 14.0806$, $u_2= 1.8917$ Результати моделювання представлені на рис. 4.9.

Моделювання (3). Для вхідних матриць, які відповідають виробничим даним.

$$A = \begin{bmatrix} -0,0041 & 0 \\ 0 & -0,0041 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -0,0033 & 0,323 \end{bmatrix}$$

вибрані вагові матриці

$$Q = \begin{bmatrix} 1,2 & -0,1 \\ -0,1 & 1,2 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,4 \end{bmatrix}$$

В результаті отримуємо стабілізований коефіцієнт підсилення керування

$$K = \begin{bmatrix} 1,3893 & -1,1290 \\ 1,0289 & 1,2902 \end{bmatrix}$$

$u_1 = 2,5908$, $u_2 = 0,7714$. Результати моделювання представлені на рис. 4.10.

Моделювання 4. За допомогою алгоритму оптимізації отримуємо оптимізовані вибрані вагові матриці, які мають вигляд

$$Q = \begin{bmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{bmatrix}$$

В результаті отримуємо стабілізований коефіцієнт підсилення керування

$$K = \begin{bmatrix} 1,5376 & -1,2587 \\ 1,1357 & 1,4195 \end{bmatrix}$$

$u_1 = 2,8455$, $u_2 = 0,8495$, а відносні траєкторії станів показані на рис. 4.11.

Проведене моделювання дозволило сформулювати закони регулювання для системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки із застосуванням LQR-регулятора для Луцького та Марилівського спиртового заводу.

Таблиця 4.5

Зведені дані налаштування LQR-регулятора для спиртогорілчаних заводів

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,5376 & -1,2587 \\ 1,1357 & 1,4195 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 2,8455 \\ 0,87245 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,2 & -0,1 \\ -0,1 & 1,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,4 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,3893 & -1,1290 \\ 1,0289 & 1,2902 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 2,5908 \\ 0,7714 \end{pmatrix}$
3	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,1 \\ -0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,2030 & 0,2614 \\ 1,2532 & -0,3443 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 4,2598 \\ 0,8615 \end{pmatrix}$
4	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & -0,01 \\ -0,01 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 4,0042 & 2,4680 \\ 4,2916 & -2,0918 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 14,0806 \\ 1,8917 \end{pmatrix}$

Отримані характеристики відображають роботу системи керування використанням LQR-регулятора, а саме побудовані:

1. Наявність плавної траєкторії, без коливань та відсутності перегулювання

(рис. 4.9-4.12), демонструє швидше досягнення заданих значень об'єму в чанку замісу та концентрації розчиненого крохмалю та регулювання двох взаємозалежних параметрів на відміну від PID-регулятора.

2. Розрахунок коефіцієнта K для відповідних матриць Q та R забезпечив швидше досягнення заданих значень для $\bar{x} = (1,6; 1,04)$ при $t=2$ с (рис. 4.8), для $\bar{x} = (1; 1,045)$ при $t=9$ с (рис. 4.10) та по завершенню підбору матриць для значень $\bar{x} = (1,6; 1,04)$ при $t=0,5$ с (рис. 4.9) і для $\bar{x} = (1; 1,045)$ при $t=5$ с (рис. 4.11).

3. Розраховані параметри регулятора забезпечують стабільність параметрів, стійкість системи керування та відповідність часу очікуваним вимогам.

4. Як відомо, що параметри вагових матриць Q і R є головними компонентами LQR -регулятора, які впливають на точність та плавність керування та формують значення коефіцієнта зворотньої дії. Зокрема матриця Q по діагоналі містить коефіцієнти, які відповідають за вагу (пріоритетність) керованого параметру, а матриця R коефіцієнти ваги керування, що забезпечують плавне або різке керування системою.

Попередні розрахунки LQR-регулятора містять дані у матрицях Q такі, що враховують рівнозначне керування об'ємом та концентрацією розчиненого крохмалю в замісі. Незважаючи на те, що контролюючих параметрів є два, але особлива увага приділяється все ж об'єму в чанку замісу.

Обґрунтуванням такого висновку є те, що під час процесу приготування замісу відбувається інтенсивне перемішування всіх компонентів в чанку замісу, під дією температури відбувається розчинення крохмалю з подрібненого зерна, що призводить до зміни в'язкості і як наслідок відбувається налипання на стінках чанку. Коливання показників об'єму замісу може спричинити інфікування замісу, оскільки зменшення показника супроводжує формування залишків замісу на стінках, які не охоплені масою, а наступне його відновлення спричиняє перенесення інфекції у загальний об'єм. Це призводить не лише до зупинки виробництва, ліквідації сформованої партії замісу, але і до витрат сировини. Щодо відхилень концентрації замісів, то цей показник теж є важливим. Зменшення значень концентрації розчиненого крохмалю впливає на кількість виробленого

спирту, а перевищення спричиняє труднощі для перекачування на наступні стадії. Тому зваживши два контролюючих параметра зробили висновок, що по пріоритетності контролю та регулювання є об'єм.

Проведемо моделювання системи керування з різними пріоритетами параметрів матриці Q , використовуючи протилежні значення вагових коефіцієнти для забезпечення точності регулювання ключових вихідних параметрів системи.

Використаємо вхідні дані матриць з таблиці 4.1, що відповідають даним з Луцького та Марилівського спиртового заводу:

Експеримент 1. Вхідні матриці:

$$A = \begin{bmatrix} -0,26 & 0 \\ 0 & -0,52 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0,161 & -0,02 \end{bmatrix}$$

Зведені дані розрахунків подані у таблиці 4.4, а перехідні характеристики подані на рисунку 4.12

Таблиця 4.6

Зведені дані налаштування LQR-регулятора для Луцького спиртового заводу

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,1 \\ 0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 0,4487 & 0,2614 \\ 0,4709 & -0,1895 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,2878 \\ 0,2740 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,1 \\ 0,1 & 1,1 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,5720 & 2,7218 \\ 1,8080 & -1,8040 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 1,0657 \\ 1,0036 \end{pmatrix}$
3	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,03 & 0 \\ 0 & 0,03 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 4,119 & 0,570 \\ 4,187 & -0,491 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 2,497 \\ 2,490 \end{pmatrix}$
4	$\bar{x} = (1,6; 1,04)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,1 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,2269 & 0,0683 \\ 1,2331 & -0,0465 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,7392 \\ 0,7377 \end{pmatrix}$

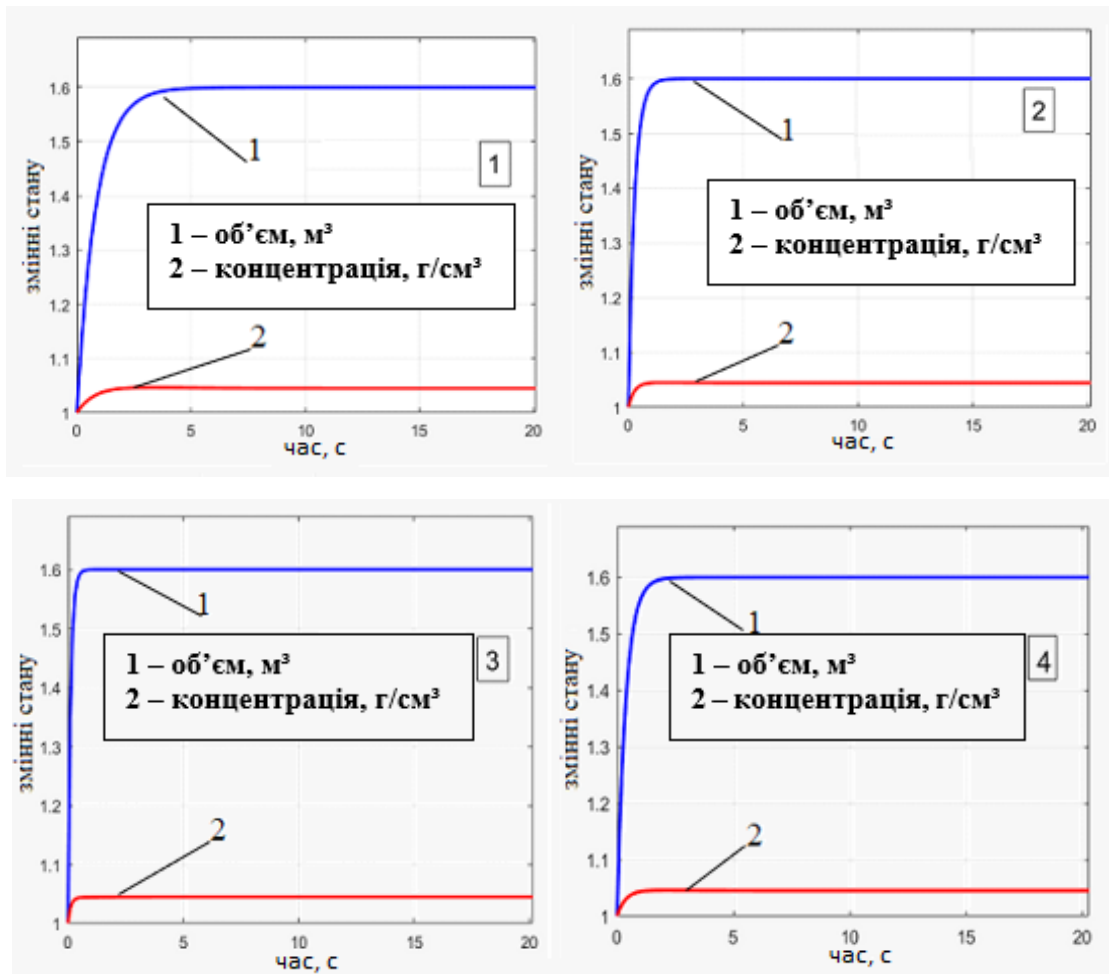


Рис. 4.12. Динаміка зміни значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі за умови пріоритетності параметрів для Луцького спиртового заводу

Також проведемо моделювання для матриць:

$$A = \begin{bmatrix} -0,0041 & 0 \\ 0 & -0,0041 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -0,0033 & 0,323 \end{bmatrix}$$

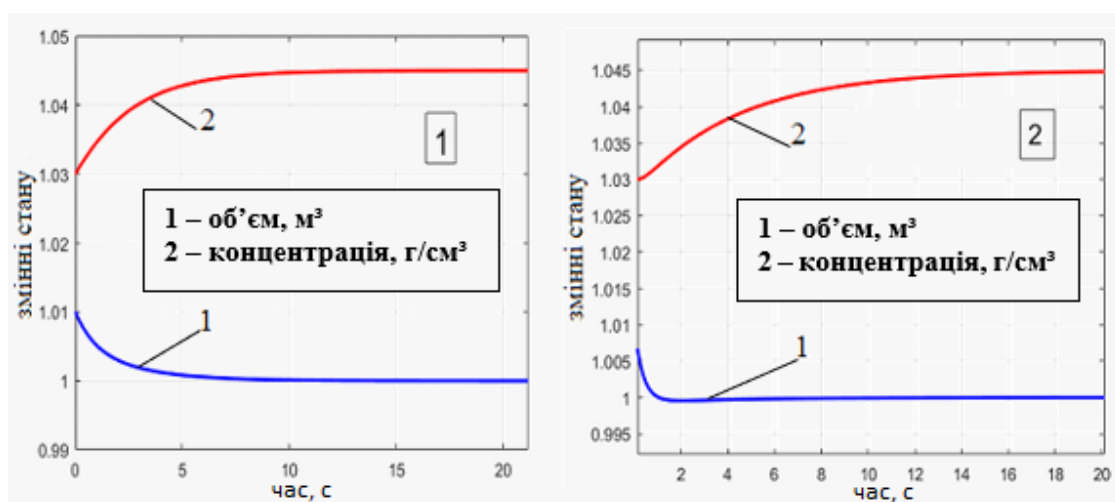
Зведені дані розрахунків подані у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Зведені дані налаштування LQR-регулятора для Марилівського спиртового заводу

№	Цільове значення	Вагові матриці		Матриця стабілізуючих контролюючих коефіцієнтів	Керуючий сигнал
	$\bar{x}$	Q	R	K	$\bar{u}$
1	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 0,3 & -0,1 \\ -0,1 & 1,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,4 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 0,7552 & -1,0621 \\ 0,4166 & 1,3459 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,0235 \\ 0,0160 \end{pmatrix}$
2	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,2 & -0,1 \\ -0,1 & 0,3 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,511 & 0,641 \\ 1,306 & 0,745 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,0265 \\ 0,033 \end{pmatrix}$
3	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 0,3 & -0,1 \\ -0,1 & 1,2 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 0,8491 & -1,0309 \\ 0,5217 & 1,6937 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,0240 \\ 0,0202 \end{pmatrix}$
4	$\bar{x} = (1; 1,045)$	$Q = \begin{pmatrix} 1,2 & -0,1 \\ -0,1 & 0,3 \end{pmatrix}$	$R = \begin{pmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,4 \end{pmatrix}$	$K = \begin{pmatrix} 1,308 & -0,553 \\ 1,131 & 0,643 \end{pmatrix}$	$\bar{u} = \begin{pmatrix} 0,0214 \\ 0,0017 \end{pmatrix}$

За результатами проведених розрахунків параметрів LQR-контролера, отримано перехідні характеристики, що зображені на рисунку 4.13.



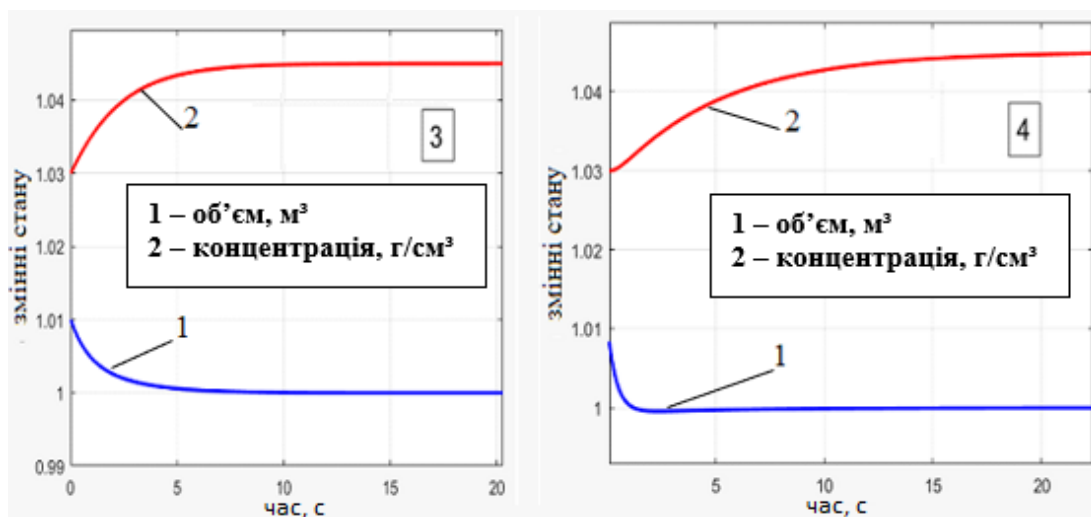


Рис. 4.13. Динаміка зміни значень об'єму та концентрації крохмалю в замісі за умови пріоритетності для Марилівського спиртового заводу

Побудовані перехідні характеристики відображають динаміку зміни двох параметрів, відстежується стабільність об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в замісі, а також час регулювання, що характерний для матриць з ваговими коефіцієнтами в яких передбачена пріоритетність параметрів керування.

Проведене моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки дозволило розрахувати коефіцієнти зворотньої дії K для оптимальних параметрів матриці Q і R і LQR-регулятора, а також розробити систему автоматичного керування із застосуванням пріоритетності параметру об'єму над концентрацією розчиненого крохмалю в чанку замісу.

Висновки до розділу 4

1. Синтезований LQR-регулятор забезпечив оптимальне керування врахувавши динамічні особливості та взаємозалежність параметрів процесу приготування замісу та його водно-теплову обробку. Покращено динаміку процесу регулювання замісу та очікуваних критеріїв якості для умов Луцького спиртогорілчаного заводу.

2. Отримані результати вибору параметрів LQR-регулятора також були

використані для умов Марилівського та Львівського спиртових заводів з метою підвищення загальної ефективності виробництва спирту та очікуваним результатом 5%-го за рахунок покращення показників якості системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення та нове рішення науково-прикладної задачі створення ефективної системи автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

1. Аналіз існуючого стану автоматизації на ділянках приготування спирту шляхом отриманих залежностей між концентрацією сухих речовин, густиною та в'язкістю замісу дав змогу створити ефективну систему автоматичного керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки. Розроблені алгоритми дали змогу об'єднати всі стадії процесу в єдину автоматизовану систему.

2. За результатами експериментальних досліджень сформовано залежність концентрації розчиненого крохмалю в замісі від густини, в'язкості, а також температури, що дало можливість обрати координати керування та розробити багатоконтурну систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки.

3. Запропонований підхід до моделювання процесу приготування замісу та його водно-теплової обробки забезпечив можливість синтезу керуючих впливів і кількісну оцінку інформативних параметрів: концентрації та об'єму замісу. Для ефективного контролю показника в'язкості використано непрямий давач – потужність мішалки.

4. Застосування розробленої системи автоматичного керування взаємоз'язаним процесом дало можливість підвищити ефективність технологічного процесу та якість суслу.

5. За результатами моделювання, а також експериментальних досліджень системи керування з взаємопов'язаними контурами регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю замісу встановлено, що застосування PID-регулятора в цій системі не забезпечує потрібні параметри якості в динамічних

режимах.

6. Досліджено, що поєднання ПІД-регулятор з контролером DS1104 фірми dSPACE не забезпечує потрібної точності регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в замісі, що обмежує його застосування в багатоконтурній системі керування.

7. Запропонований LQR-регулятор для автоматизованої системи автоматичного керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки забезпечив покращення показників якості системи та підвищив швидкодію регулювання об'єму та концентрації розчиненого крохмалю в замісі.

Таким чином виконані в дисертаційній роботі дослідження є подальшим розвитком теорії автоматизації технологічного процесу виготовлення етилового спирту, що в сукупності дає змогу створити автоматизовану систему керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки. Розроблені підходи з використанням LQR-регулятора можуть бути поширені і на інших спиртових заводах

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бліщ Р. О. Інтенсифікація технологічних процесів виробництва спирту активацією гідролітичних ферментів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.07/ Нац. ун-т харч. технологій. Київ, 2003. 18 с.
2. Бліщ Р. О., Колеснікова К. В., Колінська Д. Й. Вплив виду крохмалевмісної сировини та способу одержання спиртової бражки на якість бражного дистиляту. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2005. № 536: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 84-86.
3. Боярчук Я. А. Інноваційна технологія виробництва спирту з крохмалевмісної сировини: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ : Нац. ун-т харчових технологій, 2016. 21 с.
4. Воробюк С. П., Древецький В. В. Використання нейронних мереж при автоматизації процесу водо-теплової обробки замісу. Збірка тез Шостої міжнародної науково-практичної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси” (ІРТК–2013), Київ : НАУ, 2013. С. 100-102.
5. Гулий І. С., Українець А. І., Шиян П. Л., Мудрак Т. О., Фіщенко А. М., Кириленко Р. Г., Сизько В. Б., Жолнер І. Д., Сосницький В. В., Артюхов В. Я., Михайлів А. Т. Технологічні особливості переробки жита в спирт. Харчова і переробна промисловість. 2004. № 1. С. 18-20.
6. Гулий І. С., Шиян П. Л., Фіщенко А. М., Мудрак Т. О., Сизько В. Б., Байизбеков У. А., Ібаков Е. К. Впровадження енерго– та ресурсозберігаючої технології спиртових бражок із крохмалевмісної сировини на мелясних спиртових заводах. Харчова і переробна промисловість. 2002. № 3. С. 16.
7. Гулий І., Шиян П., Фіщенко А., Мудрак Т. Впровадження енерго– та ресурсозберігаючої технології спиртових бражок із крохмалевмісної сировини на мелясних заводах. Харчова і переробна промисловість. 2002. № 3. С. 16–17.
8. Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздєв О. В. [та ін.] Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв : навч. посіб. Вінниця: Нова Книга, 2008. 488 с.

9. Древецький В. В., Воробюк С. П., Кутя В. М. Контроль величини сухого залишку замісу по в'язкості зерно–мучної суміші. Вісник Інженерної Академії України. 2012. № 3-4. С. 180-182.

10. Жолнер І., Сосницький В., Гулий І. С., Українець А. І., Шиян П. Л., Артюхов В. Я., Михайлів А. П. Основні напрямки енерго– та ресурсозбереження в спиртовому виробництві. Харчова і переробна промисловість. 2003. № 7. С. 4 -6.

11. Жолнер І., Сосницький В., Гулий І., Ельперін І., Шиян П., Артюхов В. Сучасні тенденції розвитку та впровадження систем автоматизації та управління у спиртовій галузі. Харчова і переробна промисловість. 2005. № 6. С. 65-68.

12. Кириленко Р. Г. Удосконалення енерго– та ресурсозберігаючої технології спиртової бражки з крохмалевмісної сировини: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.07 – Технологія продуктів бродіння / Національний університет харчових технологій. Київ, 2007. 19 с.

13. Корнієнко В. І. Автоматизація оптимального керування процесами дроблення і здрібнювання руд: монографія. Дніпро : Національний гірничий університет, 2013. 190 с.

14. Коротинський А. П., Коржик М. В. Робастне управління реактором у виробництві мастил на основі мильних загусників. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2017. № 1. С. 123-127.

15. Кічура Д. Б., Мигаль М. Є. Удосконалення технології одержання спирту з крохмалевмісної сировини. Матеріали міжнар. наук.–практ. конф. «Perspective directions of scientific research: theoretical and practical value», 20 листоп. 2020 р., Бухарест, Румунія. С. 75.

16. Кузьмич О. І., Маркіна Л. М., Якимчук Л. М. Моделювання та розробка системи керування процесом змішування на базі процесу водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 30-31, Луцький НТУ, 2018. С. 220-227.

17. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. для студ. вищ.

навч. закл. за напрямом "Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології". Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 236 с.

18. Маринченко В. О., Домарецький В. А., Шиян П. Л., Швець В. М., Циганков П. С., Жолнер І. Д. Технологія спирту / під ред. проф. В. О. Маринченка. Вінниця: Поділля-2000, 2003. 496 с.

19. Маркіна Л. М., Сазик В. О. Дослідження впливу рівнів автоматизації процесу виробництва спирту на якість кінцевого продукту. Актуальні проблеми автоматизації та управління: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Вип. 3. 2015. С. 17–21.

20. Мудрак Т. О., Куц А. М., Ковальчук С. С. Удосконалення технології зброджування сусла високих концентрацій. Матеріали VII Міжнар. спеціаліз. наук.-практ. конф. «Ресурсо– та енергоощадні технології виробництва та пакування харчової продукції – основні засади її конкурентоздатності» (м. Київ, 13 верес. 2018 р.). Київ: Нац. Ун-т харчових технологій, 2018. С. 67-69.

21. Олійнічук С. Т., Процан Н. В., Ткаченко Л. В. Вплив технологічних факторів на в'язкість житнього сусла. Продовольчі ресурси. 2017. № 9. С. 244-248.

22. Паламарчук І. П., Янович В. П., Купчук І. М. Дослідження амплітудно–частотних та енергетичних характеристик віброторної дробарки для виробництва спирту. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 3 (71). С. 130-134.

23. Паламарчук І. П., Янович В. П., Купчук І. М. Обґрунтування технології та обладнання для попередньої обробки крохмалевмісної сировини при виробництві спирту. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 4 (72). С. 112-116.

24. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно–теплової обробки при виробництві спирту. Наукові нотатки. Вип. 75. Луцьк, 2023. С. 22-26.

25. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Оптимізація процесу керування приготуванням замісу в спиртовому виробництві. Перспективні технології та прилади, Вип. 20, м. Луцьк, червень 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 82-87.

26. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Оптимізація процесу керування приготуванням замісу в спиртовому виробництві. Перспективні технології та прилади. 2022. Вип. 20. С. 82–87.

27. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Основні принципи автоматичного керування процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування: матеріали (тези) IX Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 30 трав. - 1 черв. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 30-33.

28. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Сазик В. О. Вибір показників якості підготовки крохмалевмісного замісу автоматичного керування процесом. Перспективні технології та прилади, м. Луцьк, грудень 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 111-117.

29. Паляниця Л. Я., Ворожбит О. С., Мельник С. Р., Березовська Н. І., Мельник Ю. Р. Ферментативна обробка зернової сировини у виробництві спирту. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2006. № 529: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 103-106.

30. Олійнчук С. Т. Повторне використання барди для приготування замісу. Харчова і переробна промисловість. 1999. № 7. С. 22-23.

31. Подпратов Г. І., Рожко В. І., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. Київ : Аграрна освіта, 2014. 393 с.

32. Процан Н. В. Удосконалення технології спиртової бражки з жита : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.05 – технологія цукристих речовин та продуктів бродіння / Ін-т продовол. ресурсів НААН України. Київ, 2018. 190 с.

33. Процан Н. В. Удосконалення технології спиртової бражки з жита. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2018. № 4. С. 54-58.

34. Процан Н. В., Ковальчук Л. В. Активація ферментів під час розварювання житніх замісів підвищеної концентрації. Технологічний аудит та резерви виробництва. 2020. № 1(19). С. 241-245.

35. Смітюх Я.В. Автоматизоване управління брагоректифікаційною установкою на основі сценарного підходу: дис. на здобуття наук.ступеня к.т.н.: спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Київ, 2007. 282 с.

36. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалевмісної сировини: пат. на корисну модель 151663 Україна. МПК (2022) C12C 7/04, G05B 15/00 / Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М.; заявл. 14.02.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 34. 3 с.

37. Спосіб приготування пивного суслу : пат. № 92482 UA : МПК C12C 7/00 / А.Є. Мелетьєв, С.І. Літвинчук, Л.В. Проценко, О.І. Дерій; заявл. 11.10.2007, опубл. 10.11.2010. 3 с.

38. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмаловмісної сировини: пат. № 152727: № u202202896; Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М ; заявл. 12.08.2022; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14. 3 с.

39. Спосіб виробництва етилового спирту з зернової сировини: пат. 83949 Україна, МПК C12P 7/06 / № u200612482; заявл. 31.10.2006; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10. 6 с.

40. Спосіб підготовки крохмалевмісної сировини до спиртового зброджування : пат. 56595 А Україна, МПК C12G 3/00 / Олійнічук С. Т., Левандовський Л. В., Жуковський В. А.; заявл. 29.07.2002; опубл. 15.03.2003, Бюл. № 5.

41. Спосіб підготовки крохмалевмісної сировини до теплової обробки та оцукрювання : пат. 58098 Україна, МПК C12P 7/06, B02C 19/00/ Килимник М. Г., Жихарєв Ю. В., Жолнер І. Д. [та ін.]; заявл. 01.10.2002; опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7.

42. Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.) редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. Суми : Сумський державний університет, 2020. 386 с.

43. Ткаченко Л. В. Розробка технології спиртового зброджування мелясного сусла з біологічним підкисленням : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.07/ Український державний університет харчових технологій. Київ, 2000. 19 с.

44. Українець А. І., Шиян П. Л., Мудрак Т. О., Боярчук Я. А. Спосіб виробництва спиртових бражок з крохмалевмісної сировини: пат. на корисну модель 103235 Україна, МПК С12Р 3/00, С12F 3/00; заявл. 27.05.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.

45. Українець А. І., Шиян П. Л., Сосницький В. В. Перспективні напрямки енергозбереження в спиртовому виробництві. Харчова і переробна промисловість. 2006. № 4. С. 4–12.

46. Циганков С., Фельдман А. Низькотемпературне оцукрювання зернової сировини. Харчова і переробна промисловість. 1996. № 1. С. 22-23.

47. Шиян П. Л., Боярчук Я. А., Мудрак Т. О., Куц А. М. Удосконалення технології одержання спирту з крохмалевмісної сировини. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2016. № 1. С. 225-232.

48. Шиян П. Л., Сосницький В. В., Олійнічук С. Т. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: монографія. Київ : Видавничий дім «Асканія», 2009. 424 с.

49. Agachi P.S. e.a. Model based control. Weinheim (Germany): Willey VCH, 2006. 290p.

49. Albertos P. A., Sala P. Multivariable Control Systems: An Engineering Approach. New York (USA): Springer, 2004. 340 p.

50. Alcohol Textbook: Ethanol Production, Chemistry and Utilization / ed. by K. A. Jacques, T. P. Lyons, D. R. Kelsall. 4th ed. Nottingham : Nottingham University Press, 2003. 527 p.

51. Anderson B. D. O., Moore J. B. Optimal Control: Linear Quadratic Methods. London : Prentice –Hall International, Inc., 1998. 395 p.

52. Anderson B. D., Moore J. B. Optimal Control. Linear Quadratic Methods. Canberra: Prentice–Hall International, Inc., 1989.

53. Barta Z., Reczey K., Szengyel Z., Reczey K. Bioethanol Production from A-Starch Milk and B-Starch Milk as Intermediates of Industrial Wet-Milling Wheat Processing. *Energies*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 330-345.

54. Bothast R. J., Schlicher M. A. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005. Vol. 67, No. 1. P. 19-25.

55. Brizuela E., Uria M., Lamanna R. Predictive Control of a Multi-Component Distillation Column Based on Neural Networks. *International Workshop on Neural Networks for Identification, Control, Robotics, and Signal/Image Processing (NICROSP '96)*. 1996. P. 2-70.

56. Brizuela E., Uria M., Lamanna R. Predictive Control of a Multi – Component Distillation Column Based on Neural Networks. *International Workshop on Neural Networks for Identification, Control, Robotics, and Signal/Image Processing (NICROSP '96)*. 1996. P. 2-70.

57. Bryson A.E.: *Control of spacecraft and aircraft*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2015.

58. Cardona Alzate C. A., Sánchez Toro O. J. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. *Energy*. 2006. Vol. 31, Issue 13. P. 2447-2459.

59. Casey G. P., Ingledew W. M. Ethanol tolerance in yeasts. *Crit. Rev. in Microbiology*. 1986. Vol. 13, No. 3. P. 219-280.

60. Chen Chi-Tsong. *Linear System Theory and Design : 3-тє вид. : Oxford Univ. Press*, 1998. 352 p.

61. Corriou J. P. *Process Control: Theory and Applications*. New York (USA) : Springer, 2004. 752 p.

62. Di Mascio R., Barton G. W., Romagnoli J. A. Model-based Control of an Industrial Distillation Column. *Control 92: Enhancing Australia's Productivity Through Automation, Control and Instrumentation. Preprints of Papers*. Barton, ACT : Institution of Engineers, Australia, 1992. P. 309–315.

63. Diehl M. [et al.]. An efficient algorithm for nonlinear model–predictive control of large scale systems. Part 2. Experimental evaluation for a distillation column. *Anwendungsaufsatz*. 2003. No. 1. P. 22-29.

64. Durbin J., Koopman S. J. *Time Series Analysis by State Space Methods*. London: Oxford University Press, 2001. 253 p.

65. Durbin J., et al. *State Space and Unobserved Component Models*. London : Cambridge University Press, 2004. 394 p.

66. Dharan A., Storhaug S.H.O., Karimi H.R.: LQG control of a semi-active suspension system equipped with MR rotary brake, Department of Engineering, Faculty of Engineering and Science, University of Agder, N-4898 Grimstad, Norway, 2012.

67. D'Amore T., et al. A study of ethanol tolerance in yeast. *Crit. Rev. in Biotechnology*. 1990. Vol. 9, No. 4. P. 287-304.

68. Echaroj S., Ong H. C., Chen X. Simulation of Mixing Intensity Profile for Bioethanol Production via Two-Step Fermentation in an Unbaffled Agitator Reactor. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 20. P. 5457.

69. Folly R., Berlim R., Salgado A., França R., Valdman B. Adaptive control of feed load changes in alcohol fermentation. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 1997. Vol. 14, No. 4.

70. Goncalves E., Maciel Filho R. Alcohol Production Process Modelling Based on Indicators using Transactional Software, *Industrial Automation and Manufacturing Execution Systems–MES*. *Chemical Engineering Transactions*. 2013. Vol. 32. P. 1327-1332.

71. Hespanha J. P. *Lecture notes on LQR/LQG controller design*. 2005 50 p.

72. Humeniuk L., Markina L., Satsyk V., Humeniuk P., Lashch A. Application of multiagent programming for modeling the viscous state of mash in alcohol production. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15, № 1. P. 27-32.

73. Jana A. K. Inferential state estimator design for a batch. *International Journal of Modeling, Identification and Control*. 2007. Vol. 2. No. 2. P. 75-87.

74. Kelsall D. R., Lyons T. P. Grain dry milling and cooking procedures: extracting sugars in preparation for fermentation. *The Alcohol Textbook: A Reference for the Beverage, Fuel and Industrial Alcohol Industries*. Nicholasville, Kentucky: Alltech Inc., 2003. p. 13-20.

75. Khalid A., Hameed A., Tahir M. F. Wheat quality: A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. P. 1053196.

76. Kim D. H. Tuning of PID Controller Using Gain/Phase Margin and Immune Algorithm. *IEEE Mid-Summer Workshop on Soft Computing in Industrial Applications*. Helsinki, Finland, 2005. P. 6-74.

77. Kim D. H., Cho J. H. Intelligent Tuning of PID Controller with Disturbance Function Using Immune Algorithm. *Int. Conf. on Computational Intelligence for Measurements and Applications*. 2004. Vol. 1. P. 286-291.

78. Kiuchi T., Yoshida M., Kato Y. Energy Saving Bioethanol Distillation Process with Selfheat Recuperation Technology. *Journal of the Japan Petroleum Institute*. 2015. Vol. 58, № 3. C. 135-140

79. Kuzmych O., Hajjaji A., Aitouche A., Bosche J., Telmoudi A. Sum of squares based nonlinear control design. Application to biodiesel engine. *IEEE Conference Publications: 2015 4th Int. Conf. on Systems and Control (ICSC)*, Hammamet, Tunisia. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/CoDIT.2017.8102564.

80. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear Optimal Control Systems*. New York : Wiley–Interscience, 1972. xxv, 575 p.

81. Liu, G. P., & Daley, S. (2001). Optimal-tuning PID controller design in the frequency domain with application to a rotary hydraulic system. *Control Engineering Practice*, 7(7), 821-830.

82. Lee, C., & Chen, R. (2015). Optimal self-tuning PID controller based on low power consumption for a server fan cooling system. *Sensors*, 15(5), 11685-11700.

83. Lee W., Weekman V. W. *Advanced Control Practice in the Chemical Industry*. *AIChE Journal*. 1976. Vol. 22. P. 27.

84. Lenz C. Automatic brewing plant: U.S. Patent US 3,563,157. – Filed: 15.10.1968; Granted: 16.02.1971. – Assignee: Conrad Lenz, Freising, Germany.

85. Li J., Zhao T., Xu Y., Wu X., Bean S. R., Wang D. Fuel ethanol production from starchy grain and other crops: An overview on feedstocks, affecting factors, and technical advances. *Renew. Energy*. 2022. Vol. 188. P. 223-239.

86. Luyben W. L. *Chemical Reactor Design and Control*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. 419 p.

87. Markina L., Palchevskiy B., Hrudetskiy R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State–Space Modeling and Optimal Control Technology. *Proceedings of the 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Athens, Greece, 2023. P. 1-7.

88. Method for Automatic Control of the Process of Alcohol Production from Starch–Containing Raw Materials : Patent SU652211. Application No. 2435712/28-13; filed on 28.12.1976; published on 15.03.1979, Bulletin No. 10. 3 p.

89. Method for Automatic Control of the Process of Cooking Starch-Containing Raw Materials : Patent SU787459. Application No. 2681395/28-13; filed on 14.08.1978; published on 17.12.1980, Bulletin No. 7. 4 p.

90. Method for Automatic Control of the Process of Cooking Starch-Containing Raw Materials : Patent SU907062. Application No. 290082/28-13; filed on 16.06.1980; published on 23.02.1980, Bulletin No. 7. 4 p.

91. Method for automatic control of alcohol production from starch–containing grain. Patent SU751828: No. 2561226/28-13; filed on 26.12.1977; published on 30.07.1980, Bulletin No. 28. 3 p.

92. Mitchell W. H., Mitchell J. B. Simple, efficient automated all-grain beer brewing system: U.S. Patent US 9,228,163 B1. Filed: 12.12.2011; Granted: 05.01.2016. Assignee: PicoBrew, Inc., Seattle, WA (US).

93. Mojović L., Nikolić S., Rakin M., Vukasinović M. Production of bioethanol from corn meal hydrolyzates. *Fuel*. 2006. Vol. 85, No. 12–13. P. 1750–1755.

94. NPCS Board of Consultants & Engineers. Industrial Alcohol Technology Handbook. Delhi: Asia Pacific Business Press, 2010. 552 c.
95. Nakaiwa M. [et al.]. Operating an Ideal Heat Integrated Distillation Column with Different Control Algorithms. Computers & Chemical Engineering. 1998. Vol. 22. P. 389-393.
96. Nakaiwa M. та ін. Operating an Ideal Heat Integrated Distillation Column with Different Control Algorithms. Computers and Chemical Engineering. 1998. Vol. 22. P. 389-393.
97. Ogata K. Modern Control Engineering. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997. 1015 p.
98. Paraskevopoulos P. N. Modern Control Engineering. New York : CRC Press, 2002. 736 p.
99. Patrascu E., Rapeanu G., Hopulele T. Current Approaches to Efficient Biotechnological Production of Ethanol. Innovative Romanian Food Biotechnology. 2009. Vol. 4 (March). P. 10-17.
100. Petre E., Selișteanu D., Roman M. Advanced nonlinear control strategies for a fermentation bioreactor used for ethanol production. Bioresour Technol. 2021. Vol. 328.
101. Power R. F. Enzymatic conversion of starch to fermentable sugars. The Alcohol Textbook: A Reference for the Beverage, Fuel and Industrial Alcohol Industries. – Nicholasville, Kentucky : Alltech Inc., 2003. P. 21-28.
102. Qin Y., Zhai C. Global Stabilizing Control of a Continuous Ethanol Fermentation Process Starting from Batch Mode Production. Processes. 2024. Vol. 12. Art. 819.
103. Rahman A., Ali S.M.: Design And analysis Of A quadratic optimal control system For A type One plant model. Department of Electronics and Communication Engineering, National University of Singapore, Singapore; School of Mechanical & Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 2013
104. Ramsey J. Remotely operable and self–automated beer brewing system: U.S. Patent Application US 2015/0329808 A1. – Filed: 15.05.2014; Published: 19.11.2015.

105. Reyes–Valeria E., Enriquez–Caldera R., Camacho–Lara S., Guichard J. LQR Control for a Quadrotor using Unit Quaternions: Modeling and Simulation. 2013. P. 172-178.
106. Robertson G. H., Wong D. W. S., Lee C. C., Wagschal K., Smith M. R., Orts W. J. Native or raw starch digestion: a key step in energy efficient biorefining of grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006. Vol. 54. P. 353-365.
107. Romagnoli J. A., Palazoglu A. Introduction to process control. New York : CRC Press, 2012. 536 p.
108. Rueda A. [et al.]. Non–linear predictive control for a distillation column. Proc. 44 IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conf., Spain, Dec. 12-15, 2005. P. 5155–5161.
109. Shi Z. Auto-tuning of reference model based PID controller using immune algorithm. Proc. of the World Congress on Computational Intelligence. 2002. P. 483-488.
110. Sima V. Algorithms for Linear–Quadratic Optimization. New York: CRC Press, 1996. 366 p.
111. Singh V e.a. Online estimator for distillation column using ANN. Proc. of International Control Conference ICC2006, Glasgow, 30 Aug. – 1 Sept. 2006. P.74-80.
112. Singh V. [et al.] Online estimator for distillation column using ANN. Proceedings of the International Control Conference (ICC 2006), Glasgow, 30 Aug. – 1 Sept. 2006. P. 74–80.
113. Skupin P., Laszczyk P., Goud E. C., Vooradi R., Ambati S. R. Robust nonlinear model predictive control of cascade of fermenters with recycle for efficient bioethanol production. *Comput. Chem. Eng.* 2022. Vol. 160.
114. Verser D. W., Eggeman T. J. Process for producing ethanol from corn dry milling: U.S. Patent US7888082B2. – Date of patent: Feb. 15, 2011. – Appl. No.: 12/324,015; filed Nov. 26, 2008.
115. Vorobyuk S., Drevetskiy V. Process automation of continuous quality control of mixture preparation at the distillery. *IAPGOŚ*. 2014. No. 4. P. 59-61.

116. Wongsurakul P., Termtanun M., Kiatkittipong W., Lim J. W., Kiatkittipong K., Pavasant P., Kumakiri I., Assabumrungrat S. Comprehensive Review on Potential Contamination in Fuel Ethanol Production with Proposed Specific Guideline Criteria. *Energies*. 2022. Vol. 5. P. 2986.

117. Xu Q. S., Yan Y. S., Feng J. X. Efficient hydrolysis of raw starch and ethanol fermentation: a novel raw starch–digesting glucoamylase from *Penicillium oxalicum*. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2016. Vol. 9. Article 216.

118. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controller. *Transaction of ASME*. 1942. Vol. 64. P. 759-768.

119. Zumoffen D. та ил. Predictive functional control applied to multicomponent batch distillation column. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Elsevier Science, 2005.

Додаток А

А.1. Залежності температури, густини, вязкості

Таблиця 1

Залежність температури, густини, вязкості, концентрація сухих речовин -10%

Температура, °С	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,069	1,9
20	1,041	1,8
30	1,037	1,7
40	1,035	1,69
50	1,032	1,3
60	1,031	1,2
70	1,030	1,1
80	1,027	1,09
90	1,02	1,094

Таблиця 2

Залежність температури, густини, вязкості, концентрація сухих речовин -20%

Температура, °С	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,088	4,4
20	1,0823	4,1
30	1,0782	3,9
40	1,0765	2,6
50	1,0747	2,1
60	1,0701	1,9
70	1,069	1,7
80	1,055	1,6
90	1,049	1,5

Таблиця 3

Залежність температури, густини, вязкості, концентрація сухих речовин -30%

Температура, °C	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,128	15,5
20	1,127	15,1
30	1,1261	14,4
40	1,1236	13,5
50	1,1218	12,6
60	1,1176	11,4
70	1,109	10,2
80	1,108	9,4
90	1,103	8,3

Таблиця 4

Залежність температури, густини, вязкості, концентрація сухих речовин -40%

Температура, °C	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,18	40,4
20	1,175	38,9
30	1,1736	30,4
40	1,1721	25,3
50	1,1691	20,2
60	1,1642	18,4
70	1,1635	17,2
80	1,156	16,1
90	1,149	14,9

Таблиця 5

Залежність температури, густини, вязкості , концентрація сухих речовин -50%

Температура, °C	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,2288	120,6
20	1,2275	90,4
30	1,2264	68,9
40	1,2236	44,5
50	1,2154	25,8
60	1,217	19,5
70	1,211	15,6
80	1,2	15,1
90	1,19	14,5

Таблиця 6

Залежність температури, густини, вязкості, концентрація сухих речовин -60%

Температура, °C	Густина, кг/м ³	вязкість
10	1,281	310,4
20	1,277	280,4
30	1,2752	184,5
40	1,2716	115,2
50	1,2656	50,4
60	1,2632	37,8
70	1,259	20,9
80	1,231	20,1
90	1,169	19,84

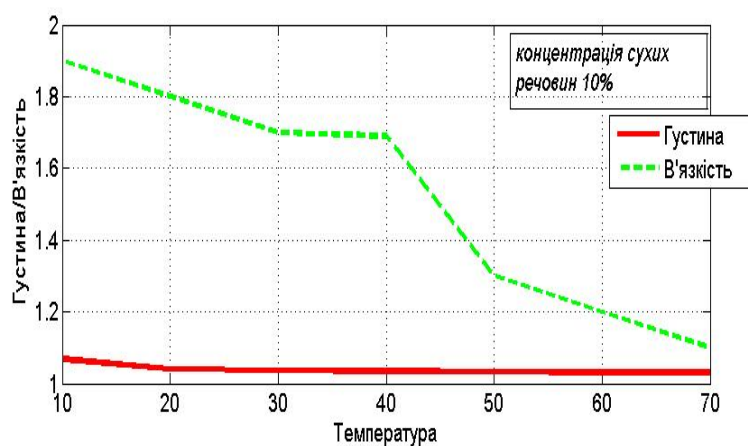


Рис. 1. Залежність густини і вязкості температури (СР–10%)

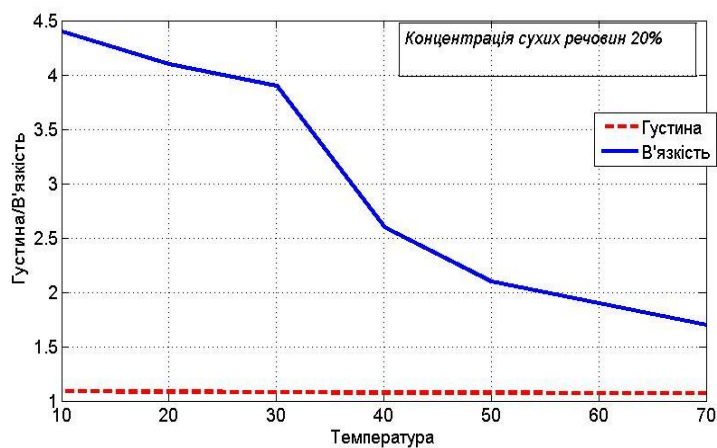


Рис. 2. Залежність густини і вязкості температури (СР–20%)

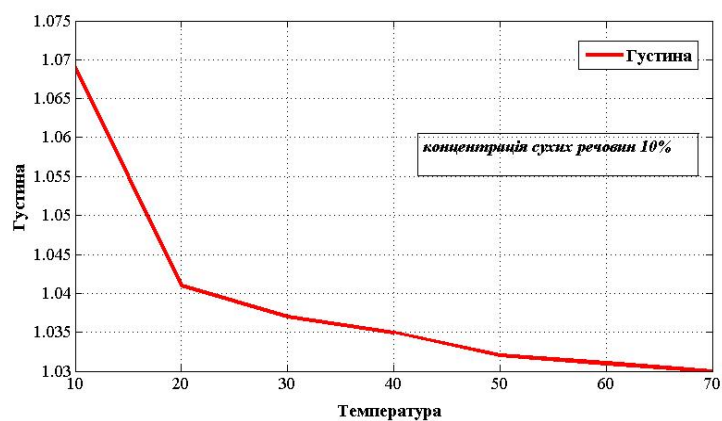


Рис. 3. Залежність густини від температури (СР–10%)

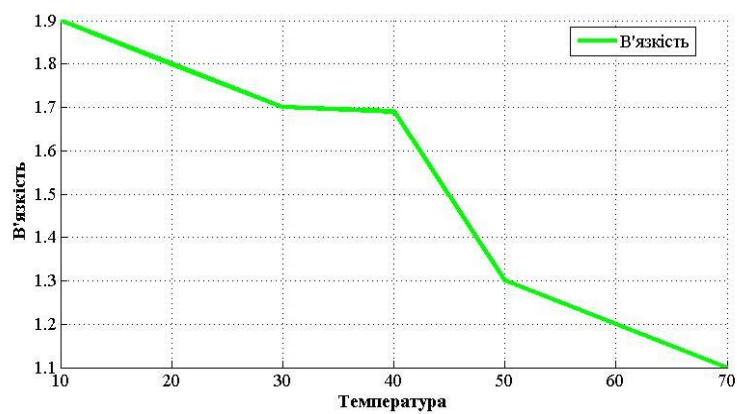


Рис. 4. Залежність в'язкості від температури (СР–10%)

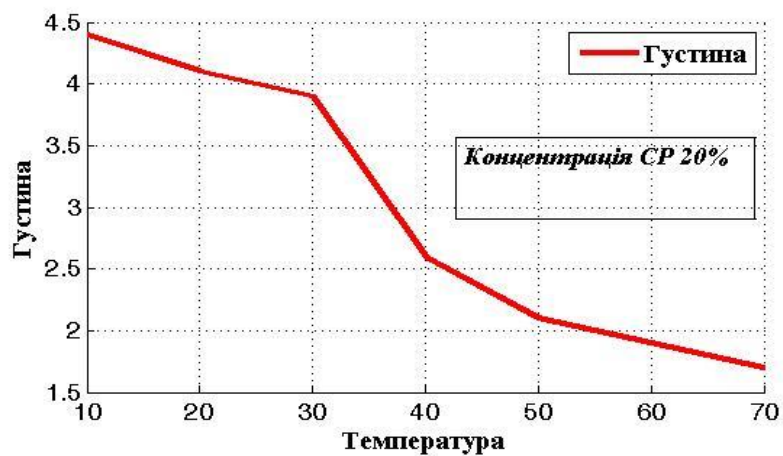


Рис. 5. Залежність густини від температури (СР–20%)

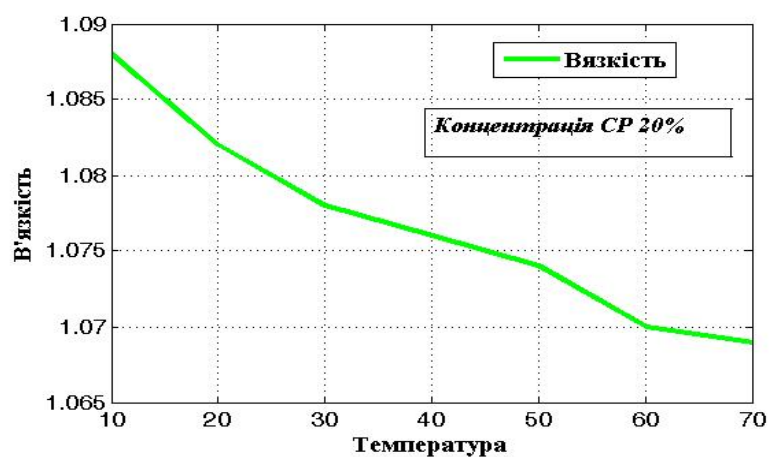


Рис. 6. Залежність в'язкості від температури (СР–20%)

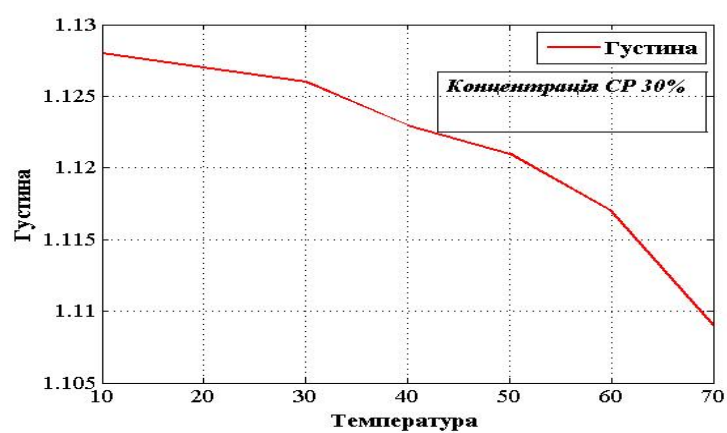


Рис. 7. Залежність густини від температури (СР–30%)

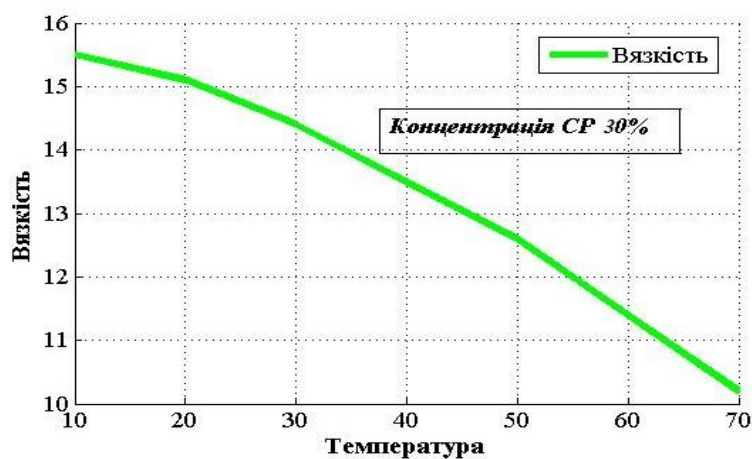


Рис. 8. Залежність в'язкості від температури (СР–30%)

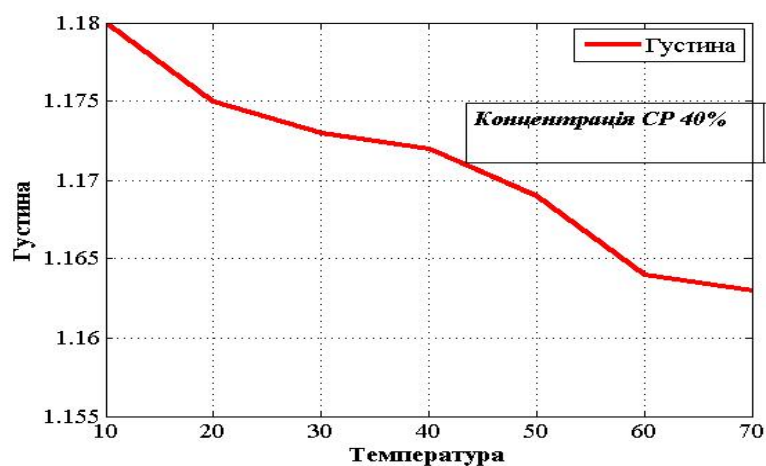


Рис. 9. Залежність густини від температури (СР–40%)

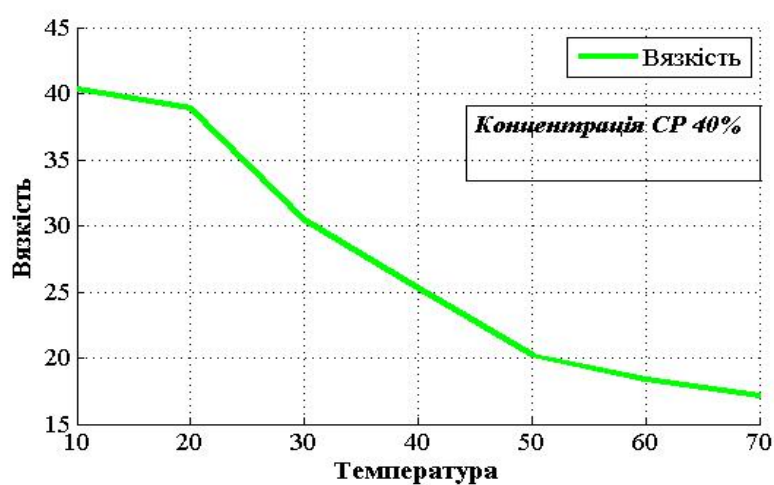


Рис. 10. Залежність в'язкості від температури (СР–40%)

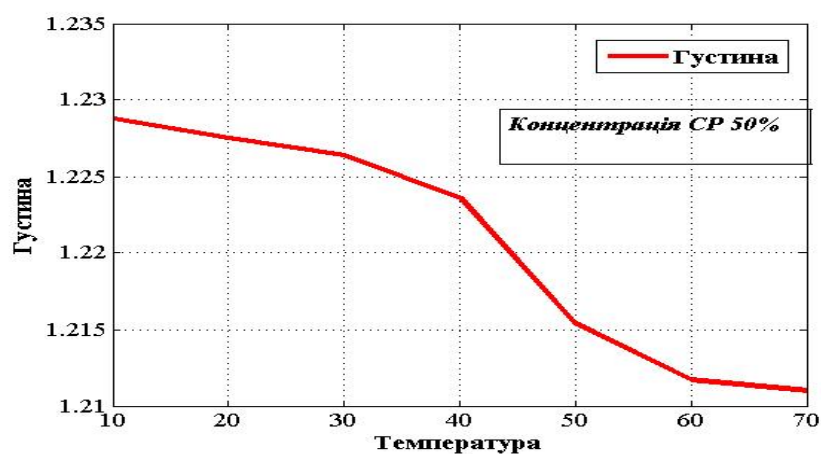


Рис. 11. Залежність густини від температури (СР–50%)

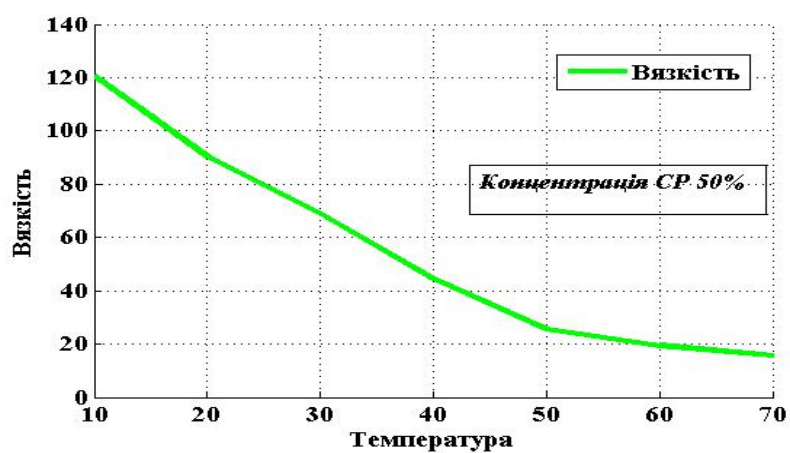


Рис. 12. Залежність в'язкості від температури (CP–50%)

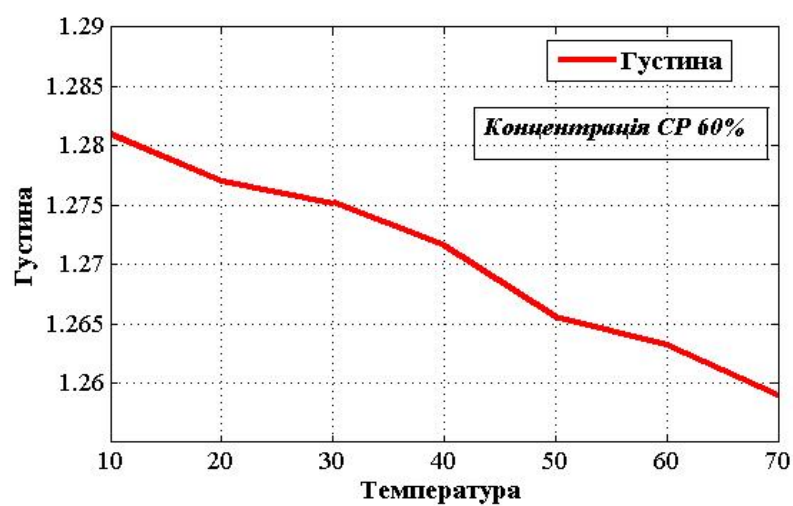


Рис. 13. Залежність густини від температури (CP–60%)

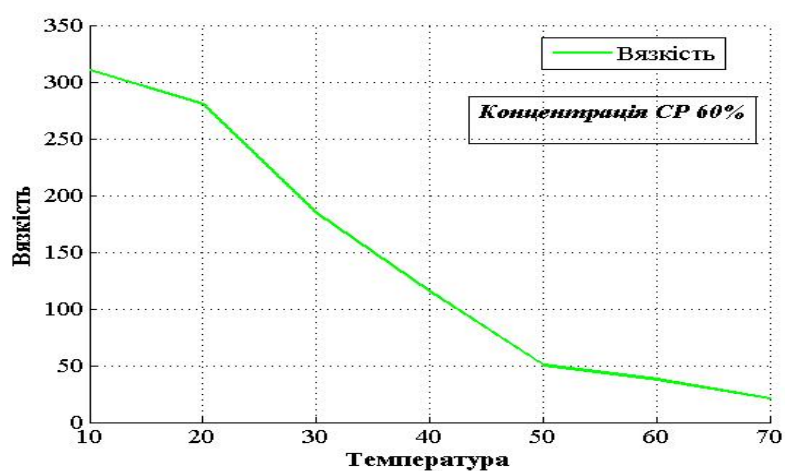


Рис. 14. Залежність в'язкості від температури (CP–60%)

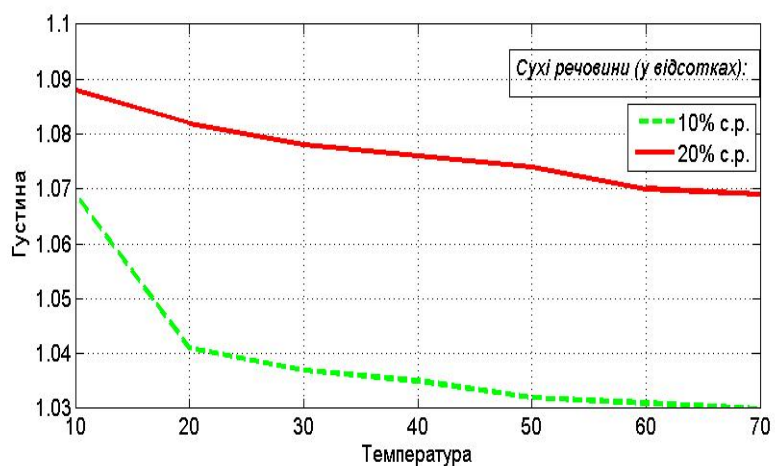


Рис. 15. Залежність густини від температури (СР–10% та 20%)

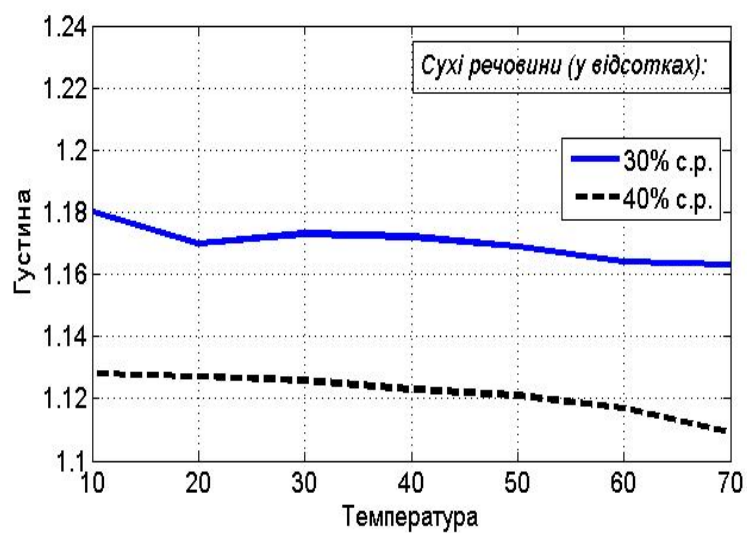


Рис. 16. Залежність густини від температури (СР–30% та 40%)

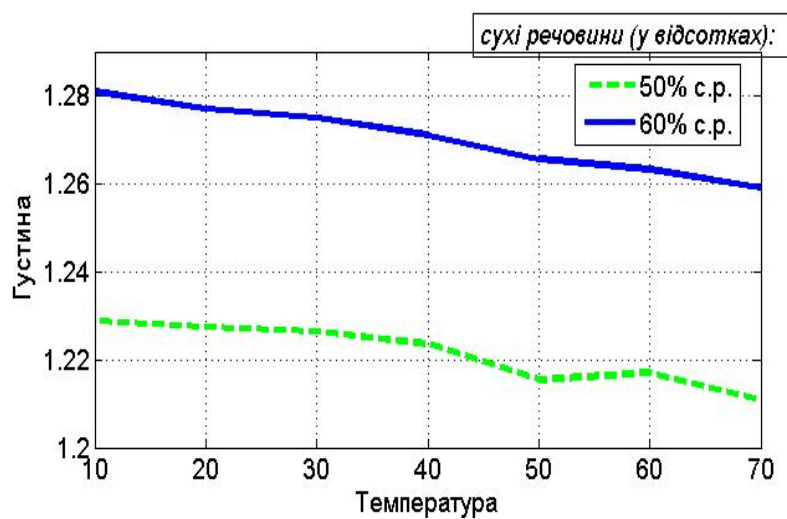


Рис. 17. Залежність густини від температури (СР–50% та 60%)

Додаток Б

Моделі системи керування процесом приготування замісу та його водно-теплової обробки з PID-регулятором

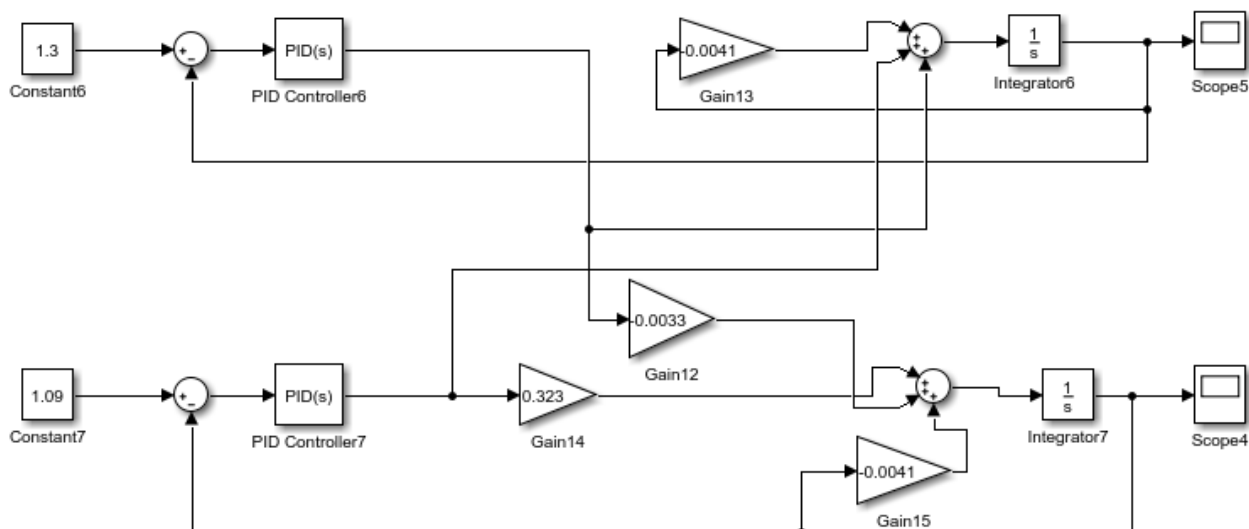


Рис. 17 Модель PID-регулятора в програмному середовищі Matlab / Simulink

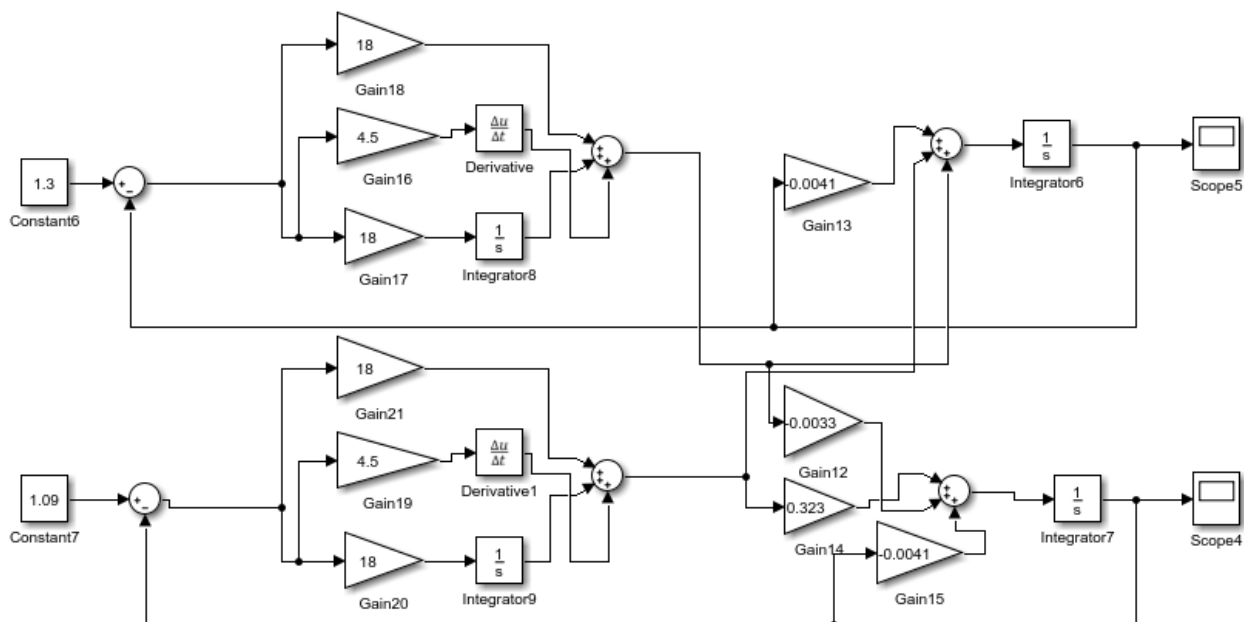


Рис. 18. Модель PID-регулятора в програмному середовищі Matlab / Simulink з розрахованими параметрами за Зіглером-Нікольсоном

Додаток В

В.1. Алгоритм для оптимізації пошуку параметрів LQR-регулятора

Алгоритм для оптимізації пошуку параметрів LQR-регулятора:

1) Ініціалізація.

Ввід початкових даних - елементів q_{11} ; q_{12} ; q_{21} ; q_{22} матриці Q .

2) Розрахунок коефіцієнтів функції Ляпунова.

Перевірка умови: матриця Q має бути позитивно визначена.

Розрахунок функції Ляпунова $V = \Delta x^T Q \Delta x$, де Δx - відхилення станів.

3) Розрахунок критерію якості J .

4) Оптимізація функції Ляпунова та критерію якості. Застосування ітераційної процедури:

1 крок.

Групуємо параметри q_{11} , q_{12} , q_{21} , q_{22} в вектор $C = (q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22})$.

2 крок.

Для фіксованих початкових значень вектора

$C = \{q_{11}^0, q_{12}^0, q_{21}^0, q_{22}^0\}$ обраховуємо функціонал згідно п.3.

3 крок.

Виконуємо збільшення першого елемента вектора на малу величину $q_{11}^1 \rightarrow q_{11}^0 + \Delta q$, залишаючи без змін інші координати. Обрахуємо функцію Ляпунова і функціонал J_1 , згідно п.3. Після цього зменшимо перший елемент вектора на малу величину $q_{11}^2 \rightarrow q_{11}^0 - \Delta q$, залишаючи без змін інші координати. Обрахуємо функцію Ляпунова і функціонал J_2 . Серед цих трьох обрахованих значень функціоналу вибираємо мінімальне і фіксуємо відповідне йому значення q_{11} .

4 крок. Послідовний перехід до другої координати $q_{12}^1 \rightarrow q_{12}^0 \pm \Delta q_i$ та третьої $q_{21}^1 \rightarrow q_{21}^0 \pm \Delta q_i$ для збереження симетричності, що є обов'язковою умовою для подальшого розв'язку рівняння Рікатті, далі виконання аналогічних дій. Після цього приймається таке значення, при якому значення J максимальне.

5 крок.

Виконання аналогічних розрахунків стосовно інших координат вектора C .

Перший цикл обчислень завершено.

6 крок. Другий цикл ітерацій. Після повторення процедури стосовно всіх координат з відхиленням Δq , вибирається нове, менше відхилення $\Delta q_1 < \Delta q$, і процедура повторюється з новим відхиленням.

7 крок.

Третій цикл ітерації. Після завершення другого циклу ітерації відхилення знову зменшується, тобто $\Delta q_2 < \Delta q_1$, і процедура триває до потрібного ступеня точності.

В.2. Блок-схема алгоритму для пошуку оптимальних параметрів LQR-регулятора

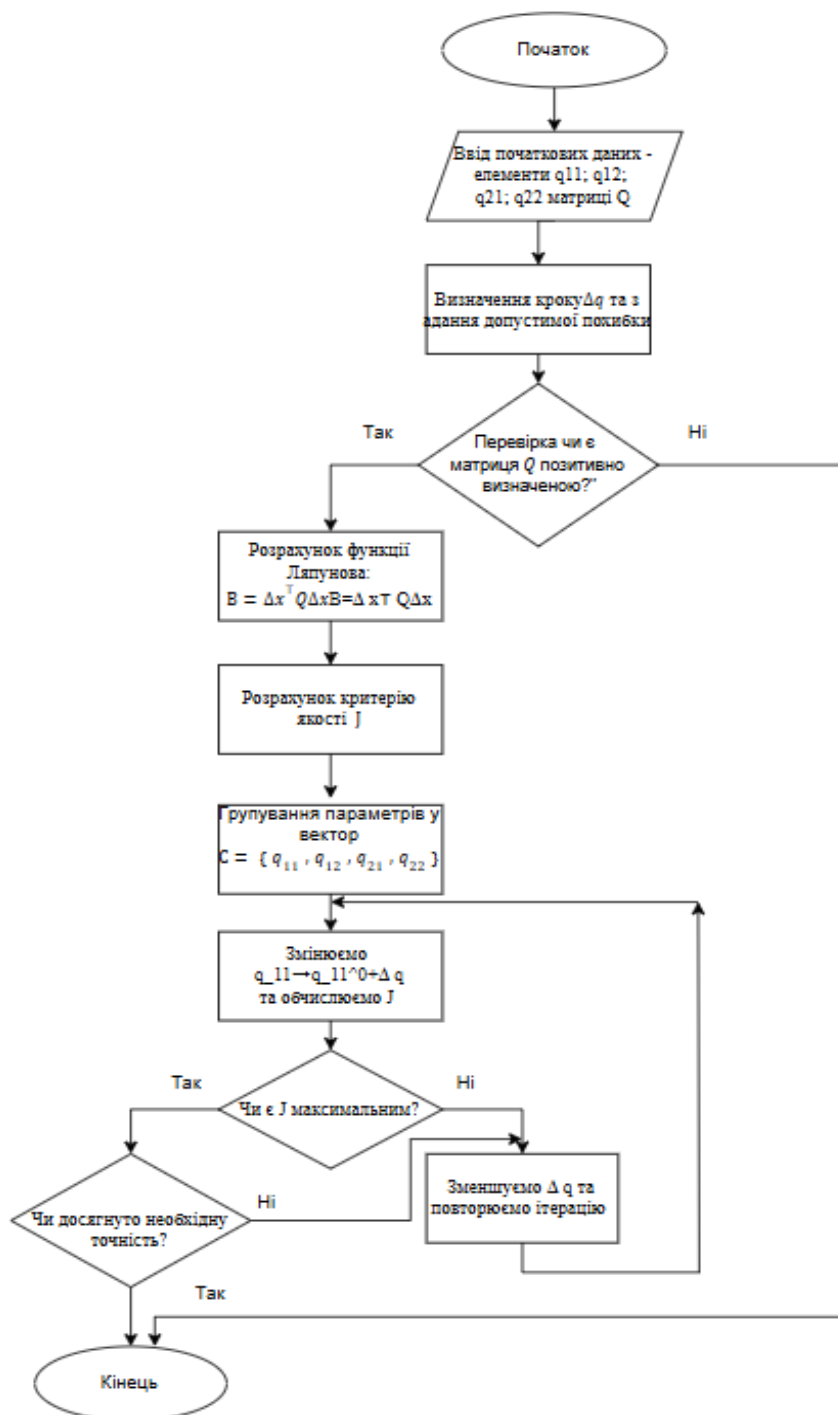


Рис. 19. Блок-схема алгоритму

Додаток Г

Акт про використання в практичній діяльності

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Директор ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ»
 (Черхавий М.Р.)
 05 2025 р.

АКТ

про використання в практичній діяльності ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ» результатів дослідження ст. викладача Маркіної Л.М. за темою дисертаційної роботи «Автоматизація процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

Комісія, у складі представників ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ», головного інженера Гушинця Олега Степановича, механіка по виробничих питаннях Корнійчука Віктора Леонідовича та представників Луцького національного технічного університету, завідувача кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій д.т.н., професора Повстяного Олександра Юрійовича, д.т.н., професора Пальчевського Богдана Олексійовича, старшого викладача Маркіну Людмилу Миколаївну, склали цей акт про те, що ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ» прийняли до використання та впровадження наступні результати досліджень Маркіної Л.М.:

- алгоритмічні рішення для системи автоматичного керування, спрямовані на підвищення ефективності процесу приготування замісу;
- розроблену систему автоматичного керування водно-тепловою обробкою на основі контролю температури та в'язкості замісу з метою стабілізації параметрів процесу;
- розроблений алгоритм пошуку параметрів LQR-регулятора для покращення динаміки керування об'ємом замісу та концентрацією крохмалю в ньому.

Від ТОВ «ВЕСТ ВЕЙ»
 Головний інженер
 Гушинець О. С.
 Механік по виробничих питаннях
 Корнійчук В. Л.

Від ЛНТУ
 Завідувач кафедри автоматизації та
 комп'ютерно-інтегрованих технологій,
 д.т.н., професор
 Повстяной О. Ю.
 д.т.н., професор
 Пальчевський Б. О.
 ст.викладач
 Маркіна Л. М.

Додаток Д

Довідка про використання в навчальному процесі



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, тел.: +38(0332)74-61-03
 e-mail: rector@lntu.edu.ua, web: www.lntu.edu.ua
 код ЄДРПОУ 05477296

13.06.2025р. № *1094/01-13* на № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційного дослідження

МАРКІНОЇ Людмили Миколаївни на тему:

«Автоматизація процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві»

Результати дисертаційного дослідження *МАРКІНОЇ Людмили Миколаївни* на тему *«Автоматизація процесів приготування замісу із зернової сировини та його водно-теплової обробки у спиртовому виробництві»* використані для вдосконалення навчальних курсів за освітньою програмою «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» з освітніх компонент «Теорія автоматичного керування» і «Автоматизація технологічних процесів та виробництв». Отримані результати дозволяють оновити та конкретизувати технічні підходи до побудови систем керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта. Застосування отриманих матеріалів сприяє підвищенню практичної орієнтованості підготовки здобувачів освіти та формуванню фахових компетентностей у сфері автоматизації.

Проректор з науково-педагогічної
роботи та досліджень



Олена ЛЮТАК

Додаток Е

Е.1. Патент на корисну модель



Е.2. Патент на корисну модель

Додаток Є

Список наукових публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи

Статті у наукових виданнях, включених у бази даних Scopus та Web of Science:

1. Gumeniuk L., Markina L., Satsyk V., Humeniuk P., Lashch A. Application of multi-agent programming for modeling the viscosity state of mash in alcohol production. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 27–32.
2. Markina L., Palchevskyi B., Hrudetskyi R., Smoliankin O., Melnychuk Y., Khrystynets N. Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology, 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2023, pp. 38-45.

Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М., Садик В. О. Вибір показників якості підготовки крохмалевмісного замісу автоматичного керування процесом. *Перспективні технології та прилади*, м. Луцьк, грудень 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 111-117.
4. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту. *Наукові нотатки*, Вип. 75, Луцьк, 2023. С. 22-26.
5. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Оптимізація процесу керування приготуванням замісу в спиртовому виробництві. *Перспективні технології та прилади*, Вип. 20, м. Луцьк, червень 2022 р. Луцьк: ЛНТУ, 2022. С. 82-87.
6. Маркіна Л. М., Садик В. О., Смолянкін О. О. Використання нечіткої логіки в системі автоматичного регулювання концентрації замісу при виробництві спирту. *Перспективні технології та прилади*, Вип. 19, м. Луцьк, грудень 2021 р. Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 78-84.
7. Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. Моделювання процесу замісу у змішувальному

баку при виробництві спирту. World Science, № 6 (34), Vol. 2, June 2018. С. 52-56.

8. Кузьмич О. І., Маркіна Л. М., Якимчук Л. М. Моделювання та розробка системи керування процесом змішування на базі процесу водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 30-31, Луцький НТУ, 2018. С. 220-227.

9. Маркіна Л. М., Городинський Д. С. Методи нечіткої логіки в управлінні процесом водно-теплової обробки при виробництві спирту. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, № 12, 2013. С. 123-128.

Тези доповідей на наукових конференціях, симпозіумах та семінарах:

10. Мачуга О. І., Решетило О. М., Смолянкін О. О., Маркіна Л. М., Садик В.О. Аспекти підвищення ефективності виробництва спирту завдяки автоматизації технологічного процесу приготування замісу. Актуальні проблеми автоматизації та управління, матер. XII Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Луцьк, 30 листопада 2024 р., Вип. 12, Луцьк, 2024. С. 41-44.

11. Маркіна Л. М., Гуменюк Л. О., Садик В. О., Гуменюк П. О. Застосування штучного інтелекту в моделюванні в'язкості замісу спиртового виробництва на основі мультиагентних систем. Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції з проблем вищої освіти і науки ТК-2024, Луцьк, Україна, 28–30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 11-13.

12. Маркіна Л. М. PID регулятори в системах автоматичного регулювання. Прогресивні напрямки розвитку автоматизованих технологічних комплексів, зб. наук. праць VIII Міжнар. наук.-техн. конф. ТК-2024, м. Луцьк, 28-30 травня 2024 р. Луцьк: ЛНТУ, 2024. С. 39-40.

13. Lyudmila Markina, Viktor Satsyk, Oleksandr Reshetylo, Roman Hrudetskyi, Oleh Smoliankin and Nadiia Kuts. "Effective Ethanol Production Based on Intelligent Robust Control", Published in: Conference Program – 2024 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 11-13, 2024, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 11 OCTOBER 2024, paper ID 129.

14. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Основні принципи автоматичного керування

процесом підготовки крохмалевмісного замісу для виробництва спирту. Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування, матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 30 травня-1 червня 2023 р. Луцьк, 2023. С. 30-33.

15. L. Markina, B. Palchevskyi, R. Hrudetskyi, O. Smoliankin, Y. Melnychuk and N. Khrystynets, "Optimization of Ethanol Production Using State-Space Modeling and Optimal Control Technology," Published in: Conference Program - 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, October 13-15, 2023, Conference Timetable: p.2 - FRIDAY 13 OCTOBER 2023, paper ID 6224.

16. Маркіна Л. М. Комп'ютерні технології для дослідження систем автоматичного регулювання. Сучасні тенденції та перспективи розвитку науки, освіти та технологій, зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., Житомир, 10 квітня 2023 р. Житомир, 2023. С. 57-58.

17. Маркіна Л. М. Особливості автоматизації водно-теплової обробки при виробництві спирту. Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», 13 жовтня 2022 р., Івано-Франківськ.

18. Садик В. О., Маркіна Л. М., Плахотна А. О. Роль виконавчих механізмів у формуванні закону регулювання на прикладі водно-теплого балансу змішувача при виробництві спирту. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». – Вип. 4. Луцьк: Луцький НТУ, 2016. С. 47-53.

19. Маркіна Л. М., Садик В. О. Дослідження рівнів автоматизації процесу виробництва спирту на якість кінцевого продукту Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». – Вип. 3. Луцьк: Луцький НТУ, 2015. С. 17-21.

20. Маркіна Л. М. Аналіз автоматизованих систем управління при виробництві спирту. Актуальні проблеми автоматизації та управління : Всеукр. наук.-практ.

інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк : Луцький НТУ, 2014. С. 82–86.

21. Маркіна Л. М. Модель регулювання концентрації зернових замісів. Актуальні проблеми автоматизації та управління : Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. молодих учених та студентів. Вип. 1. Луцьк : Луцький НТУ, 2014. С. 70–76.

Патенти:

22. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмальовмісної сировини: пат. № UA151663; заявка № u202200653; заявл. 14.02.2022; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 34.

23. Пальчевський Б. О., Маркіна Л. М. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмаловмісної сировини: пат. № UA152727; заявка № u202202896; заявл. 12.08.2023; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14.