

Національний університет харчових технологій

Національний університет харчових технологій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Грама Михайло Петрович

УДК 004.8.032.26, 658.012.011.56:658.512

ДИСЕРТАЦІЯ

Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних
регуляторів

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

15 «Автоматизація та приладобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 М.П. Грама

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Сідлецький Віктор Михайлович, кандидат технічних наук,
доцент

Київ - 2023

АНОТАЦІЯ

Грама М.П. Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних регуляторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти та науки України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності функціонування випарної установки для забезпечення якісних показників процесу випарювання шляхом удосконалення системи автоматизованого управління процесом випарювання за рахунок розробки і включення до її складу інтелектуальних регуляторів та підсистем прогнозування та підтримки прийняття рішень. У дослідженні проведено аналіз процесу випарювання вологи з бурякового соку як об'єкта автоматизації. Для того щоб підвищити ефективність функціонування системи автоматизації у даній роботі досліджується використання інтелектуальних регуляторів в системі керування випарною установкою, що покращує показники якості процесу регулювання.

Розроблена модель випарної установки цукрового заводу, у якій використано інтелектуальне керування. У даній роботі широко застосовуються інтелектуальні регулятори. Серед таких регуляторів є нечіткий та нейромережевий регулятори.

Розроблено модель прогнозування для системи нечіткого та нейромережевого регулювання. Використання інтелектуальних систем в автоматизації процесу випарювання бурякового соку передбачає виникнення великої кількості варіантів розвитку подій, частина яких може призводити до виникнення позаштатних та аварійних ситуацій. Саме тому дуже важливо завчасно запобігти їх появі. Для цього у даній роботі застосовано прогнозування стану даної системи. Також відбувається прогнозування технічного стану випарної установки на короткий час. Задача прогнозування технічного стану полягає у діагностиці сукупності показників стану

системи. Прогнозування роботи випарної установки за методом нечітких локальних тенденцій відбувається за допомогою нечітких моделей часових рядів.

Розроблено алгоритми та структури системи нечіткого та нейромережевого регулювання. Для того, щоб на основі прогнозованих даних користувач швидко міг приймати рішення розроблено людино-машинний інтерфейс таким чином, щоб він міг надати об'єктивно вірні підказки користувачу. З цією метою було використано підсистему прийняття рішень. У даній роботі було обрано метод розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів для розробки підсистеми прийняття рішень.

Розроблено людино-машинний інтерфейс системи. Для реалізації системи використовувалось сучасне програмне та технічне забезпечення. У даному проекті використовується ПЛК фірми Schneider Electric Modicon M340.

Одержані результати можуть бути використані при проектуванні, розробці та впровадженні нових, або при вдосконаленні існуючих систем автоматизації випарних установок цукрового заводу.

Результати роботи пройшли досліду перевірку на цукрових заводах ВАТ «Шамраївський цукровий завод» та Філія «Жданівський цукровий завод» ТОВ «Цукорагропром», що підтверджено відповідними довідками.

Ключові слова: цукор, випарювання, регулювання, ПІ-регулятор, нейромережевий, сік, модель, випарна установка, нейро-нечіткий, нейро-нечіткі регулятори, керування, прогноз поведінки, тиск пари, автоматизоване керування, випарювання, сироп, прогнозування, модельне прогнозне керування, оптимальне керування, енергозбереження, система керування, нейроконтролер, Neural Network Predictive Controller, модель простору станів, ПІД-регулятор, помилка прогнозування, система автоматичного регулювання, автоматизація, управління, моделювання, об'єкт керування, імітаційна модель, продуктивність, енерговитрати, автоматизована система, алгоритм, інтелектуальний, методи прогнозування, нейронна мережа.

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Justification of the neuro-fuzzy regulation in evaporator plant control system. *Ukrainian Food Journal* 2019;8:873–890.

<https://doi.org/10.24263/2304-974x-2019-8-4-17>

«Ukrainian Food Journal» включено у перелік наукових фахових видань України з технічних наук, категорія А, індексується в Web of Science Core Collection, Index Copernicus, Google Scholar, EBSCO, UlrichsWeb, Online Library of University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing, European Reference Index for Humanities and the Social Sciences, Info Base Index, Chemical Abstracts Service Source Index, FSTA (Food Science and Technology Abstracts)).

2. Грама М, Сідлецький В, Ельперін І. Аналіз системи автоматизації випарної установки з нейромережевим регулятором. *Наукові праці Національного університету харчових технологій* 2020;26:7–15.

http://sw.nuft.edu.ua/Archiv/2020/swnuft_26_6.pdf

«Наукові праці Національного університету харчових технологій» включено у перелік наукових фахових видань України з технічних наук, категорія Б, індексується в Index Copernicus, Google Scholar, EBSCOhost.

3. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Intelligent automatic control of sugar factory evaporator operation using behavior prediction subsystem. *Ukrainian Food Journal* 2022;11:148–163.

<https://doi.org/10.24263/2304-974x-2022-11-1-14>

«Ukrainian Food Journal» включено у перелік наукових фахових видань України з технічних наук, категорія А, індексується в Web of Science Core Collection, Index Copernicus, Google Scholar, EBSCO, UlrichsWeb, Online Library of University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing, European Reference Index for Humanities and the Social Sciences, Info Base Index, Chemical Abstracts Service Source Index, FSTA (Food Science and Technology Abstracts)).

4. Грама М, Сідлецький В. Порівняння роботи підсистем прогнозування в автоматизованій системі керування випарним апаратом. *Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»* 2022;67:59–75.

«Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики»» включено у перелік наукових фахових видань України з технічних наук, категорія А.

Тези доповідей та матеріали конференцій

5. Грама М, Сідлецький В. Інтелектуальна система управління випарною станцією, як інтегрованою складовою системи MES рівня. V Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами», Київ, Україна, Листопад 22, 2018;135-136.

<https://drive.google.com/file/d/1JVwhxgpb0Kh0TfuO4W31FF4JOJzJHxos/view>

6. Грама М, Сідлецький В. Інтелектуальна система управління випарною станцією, як інтегрованою складовою системи MES рівня. 85 Ювілейна Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», Київ, Україна, Квітень, 11-12, 2019;369.

<https://drive.google.com/file/d/1n8npElQfwLcfG50yXi8sOvapikE3YJ5a/view?usp=sharing>

7. Грама М. Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних регуляторів. VI Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами», Київ, Україна, Листопад, 20, 2019;31-32.

https://drive.google.com/file/d/1HRpBoS22Y5bmLmonSmW-NUZ_JP7Zwp0u/view

8. Грама М., Сідлецький В. Автоматизоване керування випарною станцією на основі інтелектуальних регуляторів. VII Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами», Київ, Україна, Листопад 26, 2020;34-35.

https://drive.google.com/file/d/1uqm12pA_MKFlcB1wJMGySg_Y_NuyguFR/view

9. Грама М. Сідлецький В. Автоматизоване керування випарною станцією на основі інтелектуальних регуляторів. 87 Ювілейна Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», Київ, Україна, Квітень, 15-16, 2021;348.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2021/Part%202.pdf>

10. Грама М. Сідлецький В. Автоматизоване керування випарною установкою на основі інтелектуальних регуляторів.. VII Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами», Київ, Україна, Листопад 26, 2021;31-32.

https://drive.google.com/file/d/1F_XOymRYbUgyH5-T49VPYyTCel2YsH2W/view

11. Грама М, Сідлецький В. Аналіз процесу випарювання як об'єкту автоматизації. 88 Ювілейна Міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», Київ, Україна, Квітень-Травень, 2022;268.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2022/Part%202.pdf>

12. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Comparison Between PID and Fuzzy Regulator for Control Evaporator Plants. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2019.

<https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783428>

13. Korobiichuk I, Sidletskyi V, Ladaniuk A, Elperin I, Hrama M. Use of Methods of Tensor Analysis in the Evaporator Plant Operating System. Advances in Intelligent Systems and Computing 2019:502–12.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-29993-4_62

ANNOTATION

Hrama M.P. Automated control of the evaporation plant based on intelligent regulators. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies". - National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to increasing the efficiency of the evaporation plant to ensure quality indicators of the evaporation process by improving the system of automated control of the evaporation process by developing and including in its composition intelligent regulators and subsystems of forecasting and decision-making support. The study analyzed the process of moisture evaporation from beet juice as an object of automation. In order to increase the efficiency of the automation system, this paper investigates the use of intelligent regulators in the control system of the evaporation plant, which improves the quality indicators of the regulation process.

A model of the evaporation plant of a sugar factory was developed, in which intelligent control was used. Intelligent regulators are widely used in this work. Among such regulators are fuzzy and neural network regulators.

A prediction model for the system of fuzzy and neural network regulation has been developed. The use of intelligent systems in the automation of the beet juice evaporation process involves the emergence of a large number of options for the development of events, some of which may lead to the emergence of emergency and emergency situations. That is why it is very important to prevent their appearance in advance. For this purpose, this work uses forecasting of the state of this system. The technical condition of the evaporation plant is also predicted for a short time. The task of forecasting the technical condition consists in diagnosing a set of indicators of the system condition. Forecasting of the operation of the evaporation plant by the method of fuzzy local trends is carried out with the help of fuzzy time series models.

Algorithms and structures of the system of fuzzy and neural network regulation have been developed. In order for the user to quickly make decisions based on the predicted data, the human-machine interface was developed in such a way that it could provide

objectively correct hints to the user. For this purpose, the decision-making subsystem was used. In this work, a method of calculating and forecasting user priorities was chosen for the development of a decision-making subsystem.

The human-machine interface of the system has been developed. Modern software and hardware were used to implement the system. This project uses a Schneider Electric Modicon M340 PLC.

The obtained results can be used in the design, development and implementation of new or in the improvement of the existing systems of automation of sugar factory evaporation plants.

The results of the work were tested at the sugar factories of JSC "Shamrayivskyi Sugar Factory" and Branch "Zhdanivskyi Sugar Factory" LLC "Tsukoragroprom", which was confirmed by relevant certificates.

Keywords: sugar, evaporation, regulation, PI regulator, neural network, juice, model, evaporation plant, neuro-fuzzy, neuro-fuzzy regulators, management, prediction of behavior, steam pressure, automated control, evaporation, syrup, prognostication, model predictive management, optimal management, energy saving, control system, neurocontroller, Neural Network Predictive Controller, state space model, PID regulator, prediction error, automatic adjustment system, automation, management, modeling, control object, simulation model, productivity, energy costs, automated system, algorithm, intellectual, forecasting methods.

Articles in scientific professional publications of Ukraine

1. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Justification of the neuro-fuzzy regulation in evaporator plant control system. *Ukrainian Food Journal* 2019;8:873–890.

<https://doi.org/10.24263/2304-974x-2019-8-4-17>

«Ukrainian Food Journal» is included in the list of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, category A, indexed in Web of Science Core Collection, Index Copernicus, Google Scholar, EBSCO, UlrichsWeb, Online Library of the University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing, European Reference Index for Humanities and the Social Sciences, Info Base Index, Chemical Abstracts Service Source Index, FSTA (Food Science and Technology Abstracts)).

2. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Analysis of evaporation automation system with neural network regulator. *Scientific Works of National University of Food Technologies* 2020;26:7–15.

http://sw.nuft.edu.ua/Archiv/2020/swnuft_26_6.pdf

«Scientific Works of National University of Food Technologies» is included in the list of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, category B, indexed in Index Copernicus, Google Scholar, EBSCOhost.

3. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Intelligent automatic control of sugar factory evaporator operation using behavior prediction subsystem. *Ukrainian Food Journal* 2022;11:148–163.

<https://doi.org/10.24263/2304-974x-2022-11-1-14>

«Ukrainian Food Journal» is included in the list of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, category A, indexed in Web of Science Core Collection, Index Copernicus, Google Scholar, EBSCO, UlrichsWeb, Online Library of the University of Southern Denmark, Directory of Research Journals Indexing, European Reference Index for Humanities and the Social Sciences, Info Base Index, Chemical Abstracts Service Source Index, FSTA (Food Science and Technology Abstracts)).

4. Hrama M, Sidletskyi V. Comparison of the operation of forecasting subsystems in an automated evaporator control system. International Scientific Technical Journal «Problems of Control and Informatics» 2022;67:59–75.

<https://doi.org/10.34229/2786-6505-2022-4-5>

«International Scientific Technical Journal «Problems of Control and Informatics»» is included in the list of scientific professional publications of Ukraine in technical sciences, category A.

Abstracts and conference materials

5. Hrama M, Sidletsky V. Intelligent control system of an evaporator station as an integrated component of the MES level system. V International scientific and technical Internet conference "Modern methods, information, software and technical support of control systems for organizational, technical and technological complexes", Kyiv, Ukraine, November 22, 2018; 135-136.

<https://drive.google.com/file/d/1JVwhxgpb0Kh0TfuO4W31FF4JOJzJHxos/view>

6. Hrama M, Sidletsky V. Intelligent control system of evaporator station as an integrated component of the MES level system. 85th Anniversary International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Scientific Achievements of Youth - Solving the Problems of Human Nutrition in the XXI Century", Kyiv, Ukraine, April, 11-12, 2019;369.

<https://drive.google.com/file/d/1n8npElQfwLcfG50yXi8sOvapikE3YJ5a/view?usp=sharing>

7. Hrama M. Automated control of an evaporator based on intelligent regulators. VI International Scientific and Technical Internet Conference "Modern Methods, Information, Software and Technical Support of Control Systems for Organizational, Technical and Technological Complexes", Kyiv, Ukraine, November 20, 2019; 31-32.

https://drive.google.com/file/d/1HRpBoS22Y5bmLmonSmW-NUZ_JP7Zwp0u/view

8. Hrama M, Sidletsky V. Automated control of an evaporator station based on intelligent regulators. VII International Scientific and Technical Internet Conference

"Modern Methods, Information, Software and Technical Support of Control Systems for Organizational, Technical and Technological Complexes", Kyiv, Ukraine, November 26, 2020; 34-35.

https://drive.google.com/file/d/1uqm12pA_MKFlcB1wJMGySg_Y_NuyguFR/view

9. Hrama M., Sidletskyi V. Automated control of an evaporator station based on intelligent regulators. 87 Jubilee International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Scientific Achievements of Youth - Solving the Problems of Human Nutrition in the XXI Century", Kyiv, Ukraine, April, 15-16, 2021;348.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2021/Part%202.pdf>

10. Hrama M. Sidletskyi V. Automated control of an evaporator based on intelligent regulators. VII International Scientific and Technical Internet Conference "Modern Methods, Information, Software and Technical Support of Control Systems for Organizational, Technical and Technological Complexes", Kyiv, Ukraine, November 26, 2021;31-32.

https://drive.google.com/file/d/1F_XOymRYbUgyH5-T49VPYyTCel2YsH2W/view

11. Hrama M, Sidletsky V. Analysis of the evaporation process as an object of automation. 88 Jubilee International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students "Scientific Achievements of Youth - Solving the Problems of Human Nutrition in the XXI Century", Kyiv, Ukraine, April-May, 2022;268.

<http://conferencenuft.ho.ua/Books%20of%20abstracts/2022/Part%202.pdf>

12. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Comparison Between PID and Fuzzy Regulator for Control Evaporator Plants. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) 2019.

<https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783428>

13. Korobiichuk I, Sidletskyi V, Ladaniuk A, Elperin I, Hrama M. Use of Methods of Tensor Analysis in the Evaporator Plant Operating System. Advances in Intelligent Systems and Computing 2019:502–12.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-29993-4_62

Зміст

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ.....	19
1.1. Аналіз процесу випарювання як об'єкту автоматизації.....	19
1.2. Аналіз технологічних ділянок випарювання та схеми їх автоматизації.....	32
1.3. Аналіз невідповідностей в роботі існуючих систем керування ділянками випарювання соку на цукровому заводі.....	50
1.4. Аналіз існуючих систем управління	56
Висновки та постановка задач дослідження	64
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ВИПАРНОЇ СТАНЦІЇ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ.....	67
2.1. Використання інтелектуальних регуляторів при керуванні випарною установкою	67
2.1.1. Використання нечіткої логіки у процесі випарювання	67
2.1.2. Використання нейромережевих регуляторів у процесі випарювання	78
2.2. Розробка модулів з дослідними регуляторами.....	81
2.2.1. Розробка структури експертної системи	81
2.2.2. Розробка бази правил для нечіткої системи.....	83
2.2.3. Математичне моделювання п'ятикорпусної випарної установки	85
2.2.4. Розробка математичної моделі п'ятикорпусної випарної установки	93
2.3. Результати моделювання роботи досліджуваних регуляторів	100
2.4. Синтез системи з компенсацією зовнішніх збурень	105
Висновки	111
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА І МОДЕЛЮВАННЯ МОДУЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ З НЕЧІТКИМ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ РЕГУЛЯТОРАМИ В ПІДСИСТЕМІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИПАРНОЇ СТАНЦІЇ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ	112
3.1. Розробка підсистеми прогнозування для системи	112

3.2. Розробка алгоритму прогнозування у програмному середовищі	114
3.3. Аналіз і синтез керувального діяннн з використанням методів прогнозування у системі керування випарною установкою.....	118
3.4. Розробка системи автоматизації вдосконаленого керування.....	125
3.5. Розробка алгоритму роботи людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки	135
3.6. Розробка структури роботи системи SCADA	146
Висновки	150
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ.....	152
4.1. Вимоги до технічного та програмного забезпечення.....	152
4.2. Перелік елементів на екрані людино-машинного інтерфесу	154
4.3. Розробка головного екрану системи та інтерфейсу взаємодії.....	157
4.4. Розробка екранів налаштування контуру регулювання рівня	163
4.5. Розробка екранів налаштування контуру регулювання тиску	165
4.6. Розробка екранів налаштування контуру регулювання витрати	167
Висновки	169
ВИСНОВКИ	171
Список використаної літератури.....	174
Додаток 1.....	189
Додаток 2.....	194
Додаток 3.....	195
Додаток 4.....	196

ВСТУП

Актуальність роботи. Випарювання цукру з бурякового соку – один з основних процесів цукрового виробництва, що значною мірою впливає на собівартість продукції, витрати енергетичних ресурсів та втрати цукру.

На більшості цукрових заводів керування випарною станцією відбувається із застосуванням системи автоматизації, що побудована на базі сучасної мікропроцесорної техніки. Ці системи надійно підтримують регламентовані значення основних технологічних параметрів (температура, тиск, рівень, витрата, вміст сухих речовин та ін.). Проте існуючі системи автоматизації не завжди можуть адекватно реагувати на порушення технологічного режиму. Це пояснюється тим, що поза увагою системи автоматизації залишається цілий ряд неконтрольованих параметрів, що суттєво змінюють технологічний режим станції і погіршують якісні показники її роботи. У разі виникнення порушень технологічного режиму необхідно скоригувати значення технологічних параметрів. За відсутності алгоритмів автоматичної корекції, рішення щодо їх значення повинен приймати оператор. Ефективність прийнятих ним рішень залежить від рівня його професіоналізму, вміння виробити адекватні дії оперативного реагування та швидко виявляти причини порушень. Складність прийняття рішень зумовлена тим, що зміна технологічного режиму може відбуватись під впливом різних слабоформалізованих факторів, а підтримати якісні показники процесу можна зміною різних взаємопов'язаних параметрів. Вивченням та автоматизацією випарних установок займались Ладанюк А. П., Сідлецький В. М., Смітюх Я. В., Луцька Н. М., Іващук В. В., Заєць Н. А., Едьперін І. В., Кишенько В. Д., Полупан В. В., Власенко Л. О., Школьна О. В., Бойко Р. О., та інші.

Враховуючи складність технологічного процесу випарювання та сезонність роботи цукрового заводу, існуючі системи автоматизації доцільно доповнити інтелектуальними регуляторами, підсистемою прогнозування та підсистемою підтримки прийняття рішень. Це може допомогти підвищити якісні показники процесу випарювання та допомогти оператору правильно оцінити ситуацію і прийняти правильне управлінське рішення. Розв'язання цієї задачі є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій «Створити динамічні експертні системи керування біотехнологічними комплексами харчових виробництв в умовах ситуаційної невизначеності» (номер державної реєстрації 0112U001085), «Наукові основи створення автоматизованих систем управління для комп'ютерно-інтегрованих виробництв харчової промисловості» (номер державної реєстрації 0112U001496), «Теоретичні основи розробки робастнооптимальних систем керування складними технологічними об'єктами та комплексами в умовах невизначеності» (номер державної реєстрації 0115U000379) та «Наукові основи створення інтелектуальних систем автоматизації технологічних об'єктів з використанням робастно-оптимальних та енергозбережних методів» (номер державної реєстрації 0116U001531).

Додатково було виконано практичну роботу «Модернізація існуючої автоматизованої системи керування випарною установкою в рамках концепцій індустрія 4.0» (номер державної реєстрації 0121U113863).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування випарної станції для забезпечення якісних показників процесу випарювання шляхом удосконалення системи автоматизованого управління процесом випарювання за рахунок розробки і включення до її складу інтелектуальних регуляторів та підсистем прогнозування та підтримки прийняття рішень.

Основні завдання досліджень:

- провести аналіз процесу випарювання цукру з бурякового соку як об'єкта автоматизації;
- розробити систему інтелектуального керування випарною станцією з використанням нейронечітких та нейромережових регуляторів;
- розробити алгоритми та модель прогнозування для системи нейронечіткого та нейромережового регулювання;

- розробити алгоритми та структури системи нейронечіткого та нейромережевого регулювання;
- розробити структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення підсистеми підтримки прийняття рішень для коригування технологічних параметрів;
- розробити людино-машинний інтерфейс системи.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач використовувались методи та підходи сучасної теорії автоматичного керування, системного аналізу, інтелектуального аналізу, теорія нечітких множин та штучних нейромереж, ідентифікації об'єктів керування, імітаційного моделювання. Результати досліджень підтверджувались шляхом використання математичного моделювання та аналізу експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

В процесі вирішення поставлених задач одержано наукові результати:

- новий підхід до автоматизації випарної станції шляхом доповнення існуючих систем інтелектуальними регуляторами;
- вперше розроблено підсистему прогнозування з можливістю комбінування роботи одразу кількох типів регуляторів з метою підвищення якості процесу випарювання;
- вперше застосовано метод нечітких локальних тенденцій для розробки моделі прогнозування для системи нейронечіткого та нейромережевого регулювання;
- запропоновано нові підходи до автоматизації випарної станції шляхом доповнення існуючих систем підсистемою підтримки прийняття рішень, яка на основі інформації, отриманої від системи автономного контролю, оператора та даних сировинної і заводської лабораторії, формує рекомендації щодо коригування технологічних параметрів з метою підтримання якісних показників процесу випарювання.

Практичне значення отриманих результатів.

Одержані результати можуть бути використані в процесі проектування, розробки та впровадження нових і модернізації існуючих систем автоматизації випарних станцій. Запропонована методика розроблення функціональних моделей для збору та систематизації експертної інформації, алгоритмів логічного виведення з використанням прогнозуючих моделей може бути використана для аналізу інших об'єктів автоматизації.

Результати роботи пройшли досліду перевірку на цукрових заводах ВАТ «Шамраївський цукровий завод» та Філія «Жданівський цукровий завод» ТОВ «Цукорагропром». На цих підприємствах, у діючих системах автоматизації були використані модулі налаштування інтелектуальних регуляторів, модулі розрахунку оптимальної продуктивності, аналіз роботи обладнання.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною роботою автора. Автором проаналізовано наукову літературу з даної проблеми, зроблено висновки, сформульовано задачі досліджень. Автором запропоновано принципово - новий підхід до автоматизації випарної станції шляхом доповнення існуючих систем інтелектуальними регуляторами, запропоновано нові підходи до автоматизації випарної станції шляхом доповнення існуючих систем підсистемою підтримки прийняття рішень, яка на основі інформації, отриманої від системи автономного контролю, оператора та даних сировинної і заводської лабораторії, формує рекомендації щодо коригування технологічних параметрів з метою підтримання якісних показників процесу випарювання; запропоновано застосувати метод нечітких локальних тенденцій для розробки моделі прогнозування для системи нейронечіткого та нейромережевого регулювання; самостійно розроблено підсистему прогнозування з можливістю комбінування роботи одразу кількох типів регуляторів з метою підвищення якості процесу випарювання. Автором розроблено програмне забезпечення і інтерфейс підсистеми підтримки прийняття рішень для включення її до складу автоматизованого робочого місця оператора-технолога.

Планування основних напрямків роботи, обговорення результатів та підготовка публікацій проходила за участю наукового керівника В.М. Сідлецького.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на: V Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами» (Київ НУХТ, 2018р.), 85 Ювілейній Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ НУХТ, 2019р.), VI Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами» (Київ НУХТ, 2019р.), VII Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами» (Київ НУХТ, 2020р.), 87 Ювілейній Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ НУХТ, 2020р.), VIII Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційнотехнічними та технологічними комплексами» (Київ НУХТ, 2021р.), 88 Ювілейній Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ НУХТ, 2021р.).

Публікації. Основні результати роботи викладено у 13 друкованих працях, з яких – 4 статті у фахових виданнях України, серед яких: 2 статті – у журналах бази даних Web of Science, категорії «А», 1 стаття – у журналі категорії «А», 1 стаття – у журналі категорії «Б» та 9 тез доповідей – опублікованих у вітчизняних та закордонних науково-практичних конференціях.

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (151 найменування) і додатків. Загальний обсяг становить 197 сторінок тексту і включає 71 рисунок та 13 таблиць.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ

1.1. Аналіз процесу випарювання як об'єкту автоматизації

Сучасні випарні установки приймають участь у випарюванні величезних кількостей води. Для випарювання 1 кг води у однокорпусному випарному апараті необхідно застосувати більше 1 кг пари, що гріє. Зрозуміло, що це надто великі втрати пари. З метою значного зниження витрати пари було розроблено багатокорпусні випарні установки. Принцип дії такої установки полягає у багаторазовому використанні тепла пари, що гріє. Пара, що надходить на перший корпус установки обігрівает і наступні корпуси шляхом надходження до них вторинної пари [1].

Такі установки складаються з кількох корпусів. Первинною парою обігріваеться розчин, що надходить у перший корпус. Далі вторинна пара з першого корпусу надходить у другий корпус. Тут, через знижений тиск, розчин кипить при нижчій температурі, ніж у першому корпусі. Також, через більш низький тиск у другому корпусі, розчин із першого корпусу переміщується у другий самопливом, де і охолоджується до температури кипіння у цьому корпусі. Крім того невелика кількість вторинної пари утворюється за рахунок кипіння розчину у другому корпусі. Таке явище називається самовипарюванням розчину [2].

З метою зменшення поверхні нагрівання, нагрів розчину, що надходить до першого корпусу випарної установки відбувається у окремому спеціальному підігрівачі [3].

Витрата пари, що гріє в установці розраховується за наступною формулою (1):

$$D = \frac{W}{0,85}, \text{кг/год} \quad (1)$$

Де D – витрата пари, що гріє, кг/год;

W – кількість випарюваного розчинника во всіх ступенях установки, кг/год;

n - кількість ступенів випарювання [4].

З останнього корпусу вторинна пара надходить до барометричного конденсатора, в якому створюється необхідне для конденсації розрідження [5].

Якщо до системи потрапляє повітря та газу, які не конденсуються, разом з паром, охолоджуючою водою та через нещільності трубопроводів, то вони сильно погіршують теплопередачу і відсмоктуються через уловлювач бризок за допомогою вакуум-насоса [6].

Також вакуум-насос забезпечує дотримання стійкого вакууму. Це пов'язано з тим, що тиск в конденсаторі може змінюватися з коливанням температури води, яка надходить в конденсатор [7].

Корисна різниця температур пари, що гріє та киплячого розчину у кожному корпусі є необхідною умовою для передачі тепла. Також, у кожному корпусі повинна бути деяка різниця температур, що зумовлено різницею температур киплячого розчину і пари, що гріє. Ще однією умовою є те, що, у кожному попередньому корпусі тиск вторинної пари має бути більшим, ніж в наступному [8].

Такі різниці тисків створюються при вакуумі в останньому корпусі, надлишковому тиску в першому корпусі, або при тому й іншому одночасно [9].

Водяну пару від котельних або з відборів парових турбін з тиском 0,3-0,053 МПа і температурою 99-136°C застосовують в якості теплоносія, що гріє [10]. Також можуть застосовуватись високотемпературні теплоносії, такі як мінеральні масла, диференціальна суміш або трубчасті електричні нагрівачі. Застосовуються вони за необхідності отримання більш високих температур [11].

Для конденсації вторинних парів з останнього корпусу випарної установки використовують охолоджуючу воду з водойм або, якщо виникає дефіцит води, конденсатори з повітряним охолодженням [12].

З метою розробки вдалого проекту випарної установки необхідно обрати схему подачі розчину в апарати; оптимальне число ступенів установки; схему підігріву розчину; раціональну систему використання вторинних енергетичних ресурсів [13].

Існує методика техніко-економічного аналізу, яка дозволяє розрахувати оптимальну кількість ступенів випарювання відповідно до затрат на пару, що гріє, електроенергію та воду. Оптимальна кількість ступенів розраховується за наступною методикою (2):

$$n_{opt} = 60 \left[\frac{K_n (t'_1 - \vartheta_n)}{A \chi \left[(i''_n - i'_{p,n}) - \frac{G_n c_0}{W} (\vartheta_0 - \vartheta_n) \right]} \cdot \left[\frac{B}{0,85} + \frac{C \cdot i''_n}{c_B (t''_B - t'_B)} \right] \right]^{0,5} \quad (2)$$

n_{opt} – оптимальна кількість ступенів випарювання;

K_n – коефіцієнт теплопередачі в останньому ступені випарної установки, Вт/(м²·К);

χ – корегуючий коефіцієнт, який враховує зменшення коефіцієнта теплопередачі від ступеня до ступеня установки, можна приймати за одиницю.

t'_1 – температура насичення пари, що гріє, на вході в установку, °С;

i''_n – ентальпія вторинної пари в останньому ступені установки, Дж/кг;

$i'_{p,n}$ – ентальпія киплячого розчину в останньому ступені установки, Дж/кг;

ϑ_n – температура кипіння розчину в останньому ступені установки, °С;

ϑ_0 – температура розчину, який надходить до першого ступеню випарювання, °С;

W – кількість випарюваного розчинника во всіх ступенях установки, кг/год;

G_n – витрата початкового розчину на установку, кг/год;

c_0 – теплоємність початкового розчину, Дж/(кг·К);

t'_B – початкова температура охолоджуючої води, °С;

t''_B – кінцева температура охолоджуючої води, °С;

A – вартість обслуговування, ремонту та автоматизації 1 м² поверхні теплообміну випарної установки;

B – вартість пари, що гріє;

C – вартість охолодженої води.

Температура кипіння розчину в апараті останнього ступеню розраховується за формулою:

$$\vartheta_n = t_k + (\Delta_1)_n + (\Delta_2)_n \quad (3)$$

де $(\Delta_1)_n$ – дійсна фізико-хімічна температурна депресія для розчину в останньому ступені випарної установки, $^{\circ}\text{C}$;

$(\Delta_2)_n$ – гідростатична температурна депресія в останньому ступені, $^{\circ}\text{C}$;

t_k – температура вторинної пари останнього ступеня випарної установки, $^{\circ}\text{C}$.

Ентальпія киплячого розчину розраховується за формулою:

$$i'_{p,n} = c_n \cdot \vartheta_n$$

Де c_n – середня теплоємність розчину, Дж/(кг·К);

ϑ_n – температура кипіння розчину в останньому ступені установки, $^{\circ}\text{C}$.

В свою чергу дійсна фізико-хімічна температурна депресія для розчину в останньому ступені випарної установки розраховується за формулою І. А. Тищенко (4):

$$(\Delta_1)_m = 0,01622 \frac{(t_k + 273.16)^2}{r_n} \cdot \Delta_1 \quad (4)$$

Де r_n – теплота пароутворення вторинної пари останнього ступеня, кДж/кг;

t_k – температура вторинної пари останнього ступеня випарної установки, $^{\circ}\text{C}$;

Δ_1 – нормальна фізико-хімічна температурна депресія для розчину, $^{\circ}\text{C}$ [4].

Схема підігріву розчину. Для забезпечення необхідного перепаду температур між розчином і теплоносієм у першому корпусі і дотримання різниці температур у всій випарній установці необхідно, щоб температура пари, що гріє для першого корпусу була достатньою для забезпечення корисного перепаду температур у кожному корпусі випарної установки [14].

Перед надходженням розчину до випарної установки його потрібно підігріти до температури близької до кипіння. Тому в прямоточних схемах для цього використовують конденсат останнього ступеня та вторинну пару а потім послідовно підігрівають розчин у каскаді теплообмінників конденсатом зі ступенів більш високого тиску та екстрапарою [15]. Остаточний догрів розчину здійснюють часто свіжим паром в спеціальному підігрівачі. Це робиться з метою зменшення площі поверхні нагрівання випарних апаратів [16].

Із формули (5) можна вирахувати кількість води, яка має бути видалена із розчину на багатокорпусній випарній установці [4].

$$W = G_n \left(1 - \frac{b_H}{b_K}\right) \quad (5)$$

Де W – кількість випарюваного розчинника во всіх ступенях установки, кг/год;

G_n – витрата початкового розчину на установку, кг/год;

b_H – початкова концентрація розчину, %

b_K – кінцева концентрація розчину, %

Також, крім випарювання дифузійного соку до заданого значення вмісту сухих речовин, випарні установки забезпечують вторинними соковими парами теплообмінну апаратуру цукрового заводу та котельну установку конденсатом для живлення котлів, а завод – аміачною водою для технологічних потреб [17]. У формулі (6) відображено наступні величини:

$$G_{\text{конд}} (C'_{\text{конд}} t'_{\text{конд}} - C''_{\text{конд}} t'_{\text{конд}}) \eta_{\text{П}} = G_H C_0 (t'_0 - t_0) \quad (6)$$

$G_{\text{конд}}$ - витрата конденсату, кг/год;

G_H – початкова витрата слабкого розчину, що надходить на попередній нагрів, кг/год;

C_0 – середня теплоємність початкового розчину, кДж/(кг*К);

t_0 – початкова температура слабкого розчину, що надходить на підігрівач, °С;

$\eta_{\text{П}}$ – коефіцієнт збереження тепла, можна прийняти $\eta_{\text{П}}=0,95$;

$t'_{\text{конд}}$ – температура конденсату останнього корпусу, °С;

$t''_{\text{конд}}$ – температура конденсату після підігрівача, °С;

$C'_{\text{конд}}$ – теплоємність конденсату останнього корпусу, кДж/(кг*К);

$C''_{\text{конд}}$ – теплоємність конденсату після підігрівача, кДж/(кг*К);

t'_0 – температура конденсату у підігрівачі, °С.

Витрату конденсату $G_{\text{конд}}$ можна розрахувати за наступною формулою (7):

$$G_{\text{конд}} = \frac{n-1}{n} \cdot W \quad (7)$$

Де W – кількість випарюваного розчинника у всіх ступенях установки, кг/год;

n - кількість ступенів випарювання.

Часто, для послідовного багаторазового використання пари при випарюванні соку цукрового буряка, використовується 5-ти корпусна випарна установка [18].

Для переробки соку у цукровий сироп необхідно на випарній установці сконцентрувати сік з 15-16% до 65-70% вмісту сухих речовин [19]. Під час процесу випарювання сік поступає на перший корпус і далі рухається із корпусу у корпус. При цьому другий корпус обігривається соковою парою першого, третій – парою другого і т. д. Завдяки поступово спадаючому тиску, у наступних корпусах температура знижується, що, в свою чергу, дозволяє багаторазово використовувати поступаючу у перший корпус пару, що гріє [20]. Концентрація випарюваного розчину на виході з корпусу розраховується за формулою (8):

$$b_n = \frac{G_H b_H}{G_H - w_1 - w_2 - w_3 - \dots - w_n} \quad (8)$$

b_n – концентрація розчину в корпусі n , %

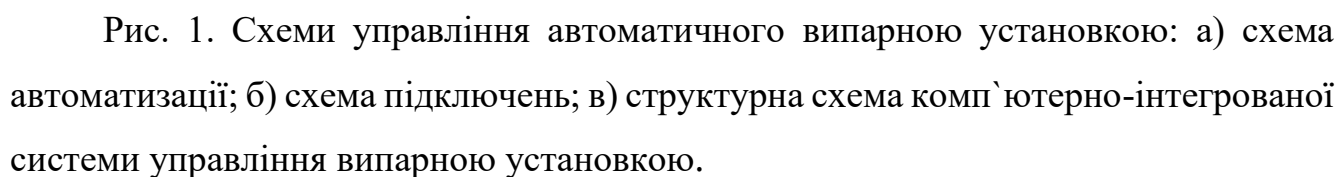
G_H – початкова витрата слабкого розчину, що надходить на попередній нагрів, кг/год;

b_H – початкова концентрація розчину, %;

$w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ – кількість води в розчині, що надходить в корпус, %.

Перевагами в роботі випарної установки є: зменшення часу перебування соку у зонах високих температур внаслідок переносу відборів пари з перших корпусів у останні; зменшення тривалості варки утфелю у вакуум-апаратах шляхом підвищення температури пари, що гріє; зниження чутливості до змін витрати та конденсації соку, який поступає на випарювання [21].

Лише за умови автоматичного управління процесом випарювання можливе підтримання оптимального режиму роботи випарної установки, оскільки процес випарювання є неперервним, а кількість соку, що надходить, та відбір сокової пари змінюється у часі. Лише режим, який забезпечує задану продуктивність випарної установки можна вважати оптимальним у даному випадку. Це гарантує безперебійне постачання споживачів соковою парою та найкращі умови випарювання [22].



У роботі [1] розглянуто математичне моделювання та моделювання автоматичного управління п'ятикорпусною випарною установкою цукрового заводу. Дослідження проводиться на прикладі п'ятикорпусної випарної установки. На рис.1. зображено фрагмент схеми автоматизації (а), фрагмент схеми підключень (б) та фрагмент структурна схема комп'ютерно-інтегрованої системи управління виробництвом (в).

Випарна установка складається з п'яти, розташованих послідовно, випарних апаратів. Необхідно дотримуватись певних умов експлуатації та дотримання параметрів таких, як: баланс твердих речовин для кожного випарного апарата, рівень в кожному випарному апараті, концентрація і тиск сиропу в п'ятому випарному апараті [23].

В ході дослідження було створено систему декількох входів і багатьох виходів з сильними взаємодіями між змінними. Цього вдалося досягти завдяки

тому, що було розроблено нелінійну модель процесу. Для вдалого проектування системи автоматизації необхідно підтримувати змінні, які характеризують продуктивність і повинні регулюватись в робочій точці. Також необхідно перейти до лінеаризації моделі навколо точки рівноваги, за допомогою чого розробляється модель у просторі-станів. Крім того необхідно встановити адекватність моделі реальному процесу шляхом моделювання процесів випарювання [24].

Випарювання є одиницею операції масового перенесення. Тут цукровий сироп конденсується до 65-70% сухих речовин (СР) [25]. Це можна здійснити за допомогою багатокорпусного випарного апарата, тому що тут кількість пари, що використовується в першому корпусі, застосовується в наступних [26]. Що, в свою чергу, дозволяє випарювати необхідну кількість води таким чином, що сироп конденсується до 65% СР шляхом досягнення тиску, необхідного для процесу кристалізації [27]. Для моделювання в Matlab Simulink використано дані реальних змінних операції: витрата, температура, тиск, концентрація і рівня. З точки зору управління, процес багатомірний, з кількома входами і виходами, виділяючи серед них концентрацію соку на виході останнього корпусу [28]. Крім того, процес має нелінійні характеристики, із транспортним запізненням і великі взаємодії між змінними [29].

На рис. 2. показані ізотерми сорбції водяної пари кристалічним цукром при 20 °С, де $f_{\text{цук}}$ – рівноважна вологість кристалічного цукру, $f_{\text{пов}}$ – відносна вологість повітря при 20 °С.

У цукровому сиропі міститься глюкоза ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Якщо глюкозу нагріти до температури 160°C і довго потримати, то з неї, в результаті відщеплення однієї з двох молекул води, утвориться ангідрид глюкози ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$). З такого сиропу вже неможливо утворити кристалічний цукор. При подальшому підвищенні температури до 220°C цукровий сироп переходить у карамель без смаку або у гіркий ассамар (речовина, що утворюється при нагріванні продуктів рослинного та тваринного походження). Ці речовини вже не здатні до бродіння і утворення цукру. Саме тому, для запобігання перегріву та перетримки цукрового сиропу, необхідно застосовувати інтелектуальне регулювання, оскільки це призводить до підвищення

параметрів якості процесу порівняно з системами з іншими типами регуляторів [30].

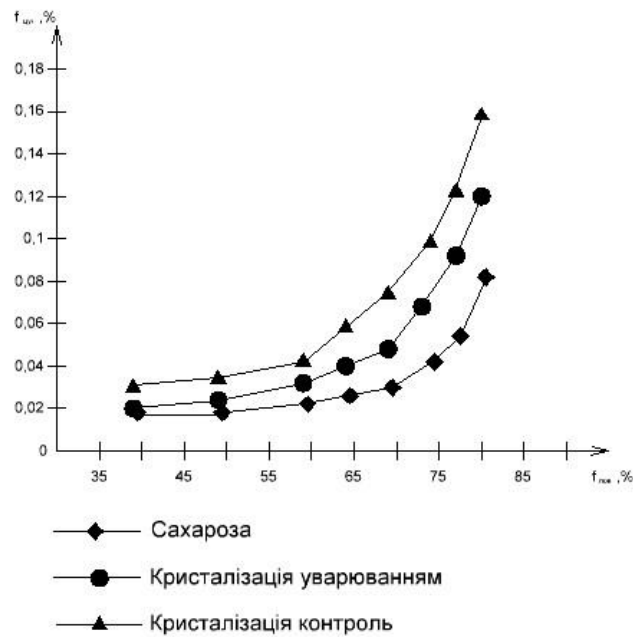


Рис. 2. Ізотерми сорбції водяної пари кристалічним цукром

Графік розподілу кристалів по розміру для цукру-піску показано на рис. 3., де $n_{\text{крист}}$ – кількість кристалів, $l_{\text{крист}}$ – розмір кристалів.

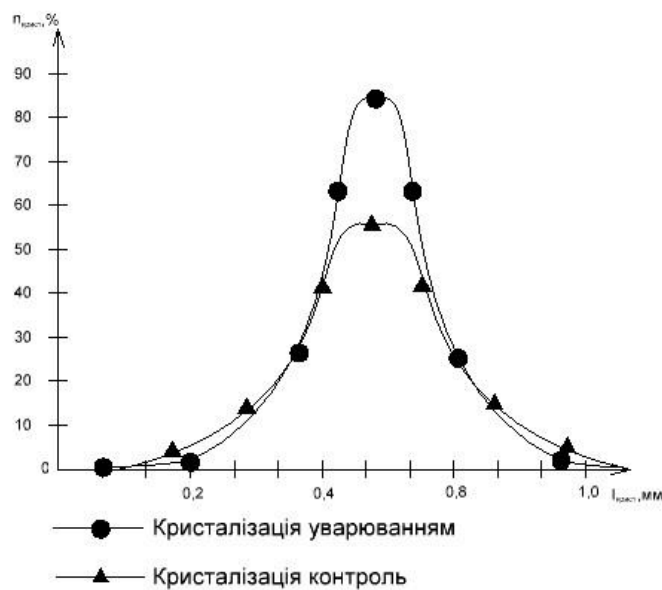


Рис. 3. Графік розподілу кристалів по розміру

Розклад та карамелізація сахарози призводить до зниження лужності. Зниження лужності на випарці призводить до розкладу амідів, наприклад аспаргіну [31] (Рис. 4.).

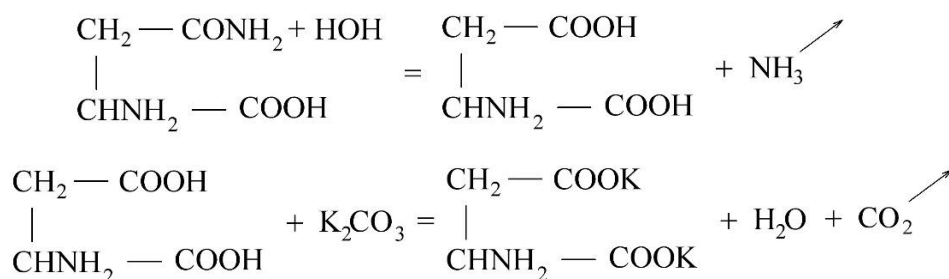


Рис. 4. Хімічна формула розкладу аспаргіну

Фізична сутність процесу випарювання полягає у перетворенні частини розчинника на пару. Також необхідно пам'ятати, що випарювання і випарювання – це різні речі. Випарювання відрізняється від випарювання тим, що воно відбувається за певного тиску, що відповідає температурі кипіння з усієї маси рідини. Крім того, у процесі кипіння рідина перетворюється на пару не лише на поверхні, а й усередині парових пухирців, утворених у рідині [32].

Коли відбувається випарювання рідини, то розмір парового пухирця збільшується і зростає його підймальна сила. Через це пухирець переборює опір рідини і підіймається на поверхню. Таке пересування пухирців призводить до безперервного перенесення пари з нижніх шарів рідини [33].

Парові пухирці можуть утворюватися на поверхні теплообмінника. Це виникає через наявність нерівностей поверхні. Також утворенню пухирців можуть сприяти гази, які знаходяться у рідині [34]. Поверхню теплообміну випарного апарату можна розрахувати за формулою (9):

$$F_{1-5} = \frac{Q_1}{K_1 \cdot t_{1-5}^{\Pi}} \quad (9)$$

Де K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²*К);;

Q – теплове навантаження апарата, кВт;

t – температура соку, °С .

Пухирці можуть утворюватися лише за умови рівності тиску пари в середині пухирця та тиску рідини, що його оточує. Існує формула (10), за допомогою якої можна розрахувати розмір, пропорційний відривному діаметру парового пухирця:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_g)}} \quad (10)$$

Де σ – коефіцієнт поверхневого натягу для розчину, Н/м;

δ – розмір парового пухирця, м;

ρ_L – густина розчину, кг/м³;

ρ_g – густина вторинної пари, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с².

Крім того, потрібно пам'ятати, що процес пароутворення є настільки інтенсивним, що температура рідини не підвищується, хоча ззовні все одно підводиться зазначена кількість теплоти [35].

Через різницю температур теплоносіїв стає можливим процес передачі теплоти від теплоносія киплячому розчину. Це необхідно для реалізації процесу випарювання. Від прихованої теплоти парового розчинника залежить витрата теплоти на випарювання [36].

Далі більш детально ознайомимось з засобами автоматизації, які встановлено на цукровому виробництві. Для вимірювання температури в якості датчика використовується термоперетворювач опору ТСМ-1288.В якості вторинного показуючого приладу обираємо ІТМ-110 заводу «Мікрол». В якості індикатора використовується ІТМ-110. Його можна конфігурувати за допомогою інтерфейсу RS-485 (протокол ModBus) або за допомогою передньої панелі. Наявність RS-485 (протокол ModBus) також дозволяє використовувати прилад в якості віддаленого індикатора при роботі в сучасних мережах управління та збору інформації. Також в індикаторі ІТМ-110 наявна власна пам'ять, що дозволяє зберігати параметри конфігурації. Також, для виконання конкретних технологічних задач, індикатор ІТМ-110 може виготовлятися за індивідуальним технічним завданням [37].

В якості контролера використовується Modicon M340.

Для вимірювання тиску використовується перетворювач РС-28. Призначенням даного перетворювача є вимірювання розрідження, абсолютного та надлишкового тисків парів, газів, рідин. В якості вимірювального елемента виступає п'єзореzystивна кремнієва монолітна структура. Її вбудовано в приймач тиску та відділено від вимірювального середовища розділовою мембраною, яку заповнено спеціальною манометричною рідиною. Електронну схему встановлено у корпусі зі ступенем захисту з IP65 до IP68 в залежності від обраного електричного з'єднання та залите силіконовим компаундом [38].

В якості датчика рівня використовуємо ємнісний рівнемір.

В якості датчика вимірювання витрати використовуємо індукційний витратомір COMACAL FLOW 38.

В якості вторинного показуючого приладу обираємо ІТМ-110 заводу «Мікрол».

В якості індикатора використовується ІТМ-110. Його можна конфігурувати за допомогою інтерфейсу RS-485 (протокол ModBus) або за допомогою передньої панелі. Наявність RS-485 (протокол ModBus) також дозволяє використовувати прилад в якості віддаленого індикатора при роботі в сучасних мережах управління та збору інформації. Також в індикаторі ІТМ-110 наявна власна пам'ять, що дозволяє зберігати параметри конфігурації.

Також, для виконання конкретних задач, індикатор ІТМ-110 може виготовлятися за індивідуальним технічним завданням.

Для перемикання режиму «Ручний/Автомат», крім можливості робити це зі SCADA, з метою підвищення безпеки, також встановлено блок ручного управління БРУ-17. Призначенням даного блока є використання в локальних і комплексних системах промислової автоматизації виробничих процесів в якості станції ручного управління аналоговими виконавчими механізмами або ручного задатчика аналогових сигналів з індикацією. Також перевагою цього блока управління є наявність гальванічної ізоляції між входами, виходами, ланцюгом живлення і інтерфейсом.

Блок БРУ-17 застосовують для перемикання ланцюгів управління виконавчими механізмами і пристроями, вимірювання та індикації одного технологічного параметра, індикації режимів робіт.

У даному блоці встановлено власний мікроконтролер RISC архітектури з низьким енергоспоживанням.

Даний блок ручного управління можна застосовувати: станції ручного управління імпульсними виконавчими механізмами, а також, за його допомогою, можна вимірювати фізичні параметри. Вбудований цифровий індикатор дозволяє відображати його точне значення та формувати вихідні сигнали. Також на передній панелі є індикатори сигналізації технологічно небезпечних зон.

В якості контролера використовується Modicon M340.

В якості виконавчих механізмів використано пневматичний сидельний клапан J4SPG1805 KRAFTt-AIR, з вбудованим дроселем. Даний клапан можна використовувати для всіх нейтральних середовищ, наприклад, повітря, пара, спирти, масла, нафтопродукти, гас тощо. З метою полегшення відводу повітря, пневматичний привід може обертатися на 360°. Клапан може бути встановлено в будь-якому положенні.

В якості датчика контролю сухих речовин використовуємо промисловий рефрактометр ADAGO CM-800L.

В основу конструкції приладу покладено метод визначення показника заломлення досліджуваного розчину по граничному куту заломлення або кута повного внутрішнього відображення. Визначення показника заломлення на приладі можна виконувати в поточному відбитому світлі

1.2. Аналіз технологічних ділянок випарювання та схеми їх автоматизації

Варіанти реалізації систем автоматизації випарних апаратів можна класифікувати по розміщенню поверхні нагрівання у просторі, по її типу, в залежності від того, рухається теплоносієм ззовні чи в середині труб нагрівальної камери, типу теплоносія. Проте кратність та спосіб циркуляції розчину у випарному апараті є найбільш суттєвим показником класифікації [39]

Зараз існують системи автоматизації випарних апаратів з вільною чи неорганізованою, штучною та направленою природною циркуляцією. Також такі системи можна поділити на ті, які працюють з багатократною циркуляцією розчину та прямоточні, в яких випарювання розчину відбувається за один його прохід через апарат без циркуляції розчину [40].

Найпростішим варіантом роботи системи автоматизації випарної установки є система з використанням нагрівання кожного випарного апарату парою з парових котлів, проте цей спосіб потребує використання більшої кількості енергії, ніж інші. Через це необхідно використовувати системи автоматизації випарної установки з багаторазовим використанням пари. При такому варіанті реалізації система автоматизації випарної установки містить декілька випарних апаратів (корпусів), через які послідовно пропускається розчинник, що випарюється, а кінцевий продукт виходить з останнього корпусу. В такому випадку пара з парової турбіни або машини використовується лише при процесі обігріву першого корпусу випарного апарата, а інші корпуси випарної установки обігріваються вторинною парою, яка надходить від попередніх корпусів [41].

Системи автоматизації випарних установок застосовуються у багатьох галузях виробництва: харчова, фармацевтична, хімічна тощо. У процесі випарювання з розчину, що здебільшого являє собою однорідну систему та включає розчинник і розчинену нелетку речовину, виділяють і видаляють у вигляді пари частину розчинника, при цьому відбувається підвищення концентрації розчиненої речовини, що перебуває в розчині [42].

У промисловості системи автоматизації випарних установок використовують у наступних випадках:

- Для підвищення концентрації розчиненого середовища;
- Для концентрування водно-сольових розчинів;
- Для опріснення солоних і забруднених вод.

Отже, система автоматизації випарної установки є складною системою, яка має забезпечувати на найвищому рівні високу якість продукції та високу продуктивність, а також нести стабільну роботу при досить низьких енергетичних витратах [43].

Головним завданням в процесі розробки проекту системи автоматизації випарної установки є правильна організація процесу, яка враховує в собі конкретні завдання і мінімізує капітальні та енергетичні витрати. Все це пов'язано з тим, що при процесі випарювання необхідні великі втрати енергії [44].

На більшості сучасних підприємств, при використанні систем автоматизації випарних установок, може виникати цілий ряд проблем. Може бути багато причин їх виникнення. Це може бути низька деаерація камер підігріву, погана робота гідравлічних колонок або поганий відвід конденсату, надто висока або надто низька швидкість руху пари, зниження інтенсивності теплопередачі та циркуляції соку, потрапляння води до корпусів випарної установки, неправильний розподіл сокових парів між окремими споживачами, погана фільтрація соку, недостатня та надлишкова поверхня нагріву, недостатня конденсація пари у камері підігріву, негерметичність камер підігріву, погана циркуляція соку у корпусах, занадто високий рівень соку, занадто довге його перебування у корпусах, втрати тепла в оточуюче середовище та багато іншого. Усе це має бути враховано при розробці системи автоматизації випарної установки з використанням інтелектуальних регуляторів [45].

Більш детально проблеми, що виникають при використанні систем автоматизації випарних установок на сучасних виробництвах та причини їх виникнення буде описано у розділі 1.3., а способи їх подолання та покращення роботи випарної установки – у розділі 1.4.

Виходячи з вище написаного можна зробити наступні висновки: випарні апарати – це апарати у яких проводиться процес випарювання. Випарюванням називають процес підвищення концентрації речовини, що міститься у певному розчині. Випарними ж станціями (установками) називають установки, які містять у собі комплекс обладнання, що забезпечує процес випарювання [46].

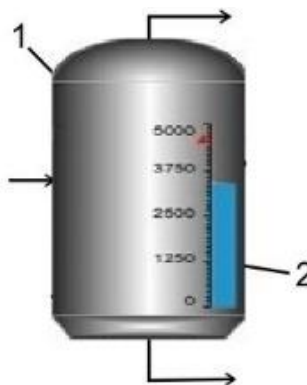


Рис. 5. Схема однокорпусного випарного апарата

В системах автоматизації однокорпусних випарних установок (рис. 5.) процес випарювання проводять під атмосферним тиском, надлишковим, вакуумом або розрідженням. В процесі випарювання вхідний розчин поступає у випарний апарат 1, де його нагрівають за допомогою гарячого теплоносія (наприклад, насиченої водяної пари), який подається у камеру підігріву 2. Далі пара конденсується у просторі камери підігріву, а тепло, яке виділилося при цьому, передається через стінки трубопроводу та нагріває розчин до температури кипіння. При такому нагріві із розчину випаровується частина розчинника [47]. Температуру стінки труби зі сторони пари, яка конденсує, знаходять за формулою (11):

$$t'_w = 0,5(t + t_B) \quad (11)$$

Де t'_w - температуру стінки труби зі сторони пари, яка конденсує, $^{\circ}\text{C}$;

t – температура пари, що гріє, $^{\circ}\text{C}$;

t_B – температура кипіння розчину, $^{\circ}\text{C}$ [48].

У промисловості використовують кілька основних варіантів систем автоматизації випарних установок. Це можуть бути прості (однократні) системи,

системи з багатокорпусним (багатократним) випарюванням із застосуванням теплового насоса. При випарюванні з тепловим насосом проводиться стискування сокової пари і використання її як теплоносія [49].

Просте випарювання проводять у системах автоматизації однокорпусних випарних установок. У таких установках, як правило, теплота сокової пари не використовується [50].

В більш масштабних виробництвах використовують системи автоматизації з багаторазовим випарюванням. Такі системи реалізуються на базі БКВУ (багатокорпусних випарних установок). У таких установках, як зазначалося вище, використовується декілька послідовно з'єднаних випарних апаратів. У таких апаратах теплоносії обігріває перший корпус, а наступні корпуси – вторинна. Такі випарні установки використовуються з метою значного зниження витрат у процесі випарювання, проте при цьому зростають витрати на обладнання [51]. При випарюванні під вакуумом завдяки зниженню температури кипіння розчину у системах автоматизації випарних установок можна використовувати теплоносії з низьким тепловим потенціалом. При випарюванні під атмосферним тиском виникає більш високий економічний ефект, але при цьому неможливо використовувати теплоносії з низьким тепловим потенціалом. При використанні надлишкового тиску теплоту сокової пари можна використовувати для обігріву інших корпусів. Для кожного корпусу БКВУ можна розрахувати коефіцієнт випарювання, який показує кількість випарюваної води за рахунок тепла конденсації 1 кг пари, що гріє, за формулою (12):

$$\alpha_i = \frac{i'_i - t_{\text{конд},i} \cdot C_{\text{конд},i}}{i''_i - t_{B,i} C_{2i}} \quad (12)$$

Де, α_i – коефіцієнт випарювання;

i'_i, i''_i – відповідно ентальпія первинної і вторинної пари i -ого ступеню, кДж/кг;

$t_{\text{конд},i}$ – температура конденсату пари, що гріє i -ого ступеню, $^{\circ}\text{C}$;

$C_{\text{конд},i}$ – ізобарна теплоємність конденсату пари, що гріє i -ого ступеню, кДж/(кг*К);

t_{Bi} – температура кипіння розчину в i -ому ступені, $^{\circ}\text{C}$;

C_{2i} – ізобарна теплоємність киплячого розчину в i -ому ступені, кДж/(кг*К).

Також її можна використовувати у якості теплоносія в інших системах. Завдяки тому, що у багаторазових випарних установках різні корпуси працюють під різним тиском виникає можливість управляти температурою кипіння розчину і використати сокову пару попередніх корпусів для обігрівання наступних корпусів [52].

При розробці систем автоматизації багатокорпусних випарних установок розрізняють різні напрямки потоків теплоносія. Тому їх можна розділити на прототечійні, протитечійні та з паралельним живленням корпусів.

При використанні систем прототечійного типу випарюваний розчин і гріюча пара надходять у перший корпус паралельно, а потім переходять до наступних корпусів у тому ж самому порядку. У системах з протитечійним живленням корпусів теплоносій і випарюваний розчин рухаються від корпусу до корпусу у протилежних напрямках. Тобто, при подачі початкового розчину у перший корпус випарної установки, теплоносій подається на останній [53]. При паралельному живленні свіжий розчин одночасно надходить до усіх корпусів. Упарений розчин також відводиться одночасно. Теплоносій надходить на перший корпус, а інші корпуси обігріваються або соковою парою попередніх корпусів, або також теплоносієм [54].

За організаційною структурою системи автоматизації випарних установок на системи з періодичним і безперервним процесом випарювання. При періодичному випарюванні розчин завантажують в один апарат і випарюють до заданої концентрації, потім концентрований розчин випускають у ємність-сховище, а апарат заповнюють новою порцією свіжого розчину і процес повторюють. У безперервному процесі випарювання відбувається при безперервній дозованій подачі свіжого розчину і безперервному відведенні концентрованого розчину, також безперервно подається гріюча пара та відводиться сокова пара [55].

З метою випарювання великих кількостей води за годину, у хімічній промисловості часто застосовують системи автоматизації багатокорпусних випарних установок великого тоннажу.

Також у системах автоматизації випарних установок у вигляді теплоносія іноді застосовують димові гази. Прикладом такого застосування є випарні установки контактного типу. Таке використання газів дозволяє нагрівати розчини, відводити вторинну пару з топковими газами в систему конденсації, випаровувати розчинник [56].

На сучасних підприємствах, з метою, наприклад, опріснення води та виробництва добрив чи солей, необхідно випарювати величезні кількості води. Зрозуміло, що це призводить до надто великих енергетичних витрат. Для того, щоб уникнути таких витрат і тим самим знизити собівартість продукції, на таких підприємствах, як правило, також застосовують системи автоматизації багатокорпусних випарних установок. У таких системах число корпусів може сягати 9 – 12. У таких системах тільки для обігріву першого корпусу використовують первинну пару. Для обігріву усіх наступних корпусів використовується вторинну сокова пару від першого і наступних корпусів. Оскільки температура вторинної пари в наступних корпусах нижча, ніж в попередніх, то для кипіння розчину при проектуванні системи автоматизації необхідно розробити механізм зниження тиску у корпусі. Також необхідно забезпечити потрібну корисну різницю температур між температурою сокової пари попереднього корпусу і температурою кипіння розчину [57]. На практиці було виявлено, що питома витрата пари, що гріє на 1 кг води, що випарюється, у середньому становить (у кг):

в однокорпусній випарній установці (ВУ).....	1,1;
у двокорпусній ВУ.....	0,57;
у трикорпусній ВУ.....	0,41;
у чотирьокорпусній ВУ.....	0,33;
у п'ятикорпусній ВУ.....	0,27.

З вище наведених даних можна зробити висновок, що використання багатокорпусних випарних установок призводить до зниження витрати пари, що гріє. Крім того ця витрата продовжує знижуватися зі збільшенням кількості корпусів. Недоліком є те, що зі збільшенням числа корпусів багатокорпусної

випарної установки зростають експлуатаційні і капітальні витрати на обладнання, але це нівелюється тим, що зниження енерговитрат все-таки переважає. Але при створенні системи автоматизації з використанням багатокорпусних випарних установок потрібно виконувати оптимізаційні техніко-економічні розрахунки [58].

При розробці системи автоматизації необхідно враховувати, що у кип'ятильних трубках камери підігріву розчин нагрівається за рахунок тепла конденсації пари, що гріє, яка подається простір в між трубами камери. Фізико-хімічна температурна депресія для кожного корпусу розраховується за формулою (13):

$$\Delta'_1 = \omega \cdot \Delta_1 \quad (13)$$

Де Δ'_1 – фізико-хімічна температурна депресія для кожного ступеню випарювання, $^{\circ}\text{C}$;

Δ_1 – температурна депресія при атмосферному тиску, $^{\circ}\text{C}$;

ω – поправка на тиск.

Поправка на тиск (ω) легко розраховується за формулою І.А. Тищенко (14):

$$\omega = 0.01622 \frac{T^2}{r} \quad (14)$$

Де T – температура кипіння чистого розчину при тиску вторинної пари в апараті, K ;

r – теплота перетворення пари води при тиску вторинної пари в апараті, кДж/кг .

Розчин, що нагрівся, під тиском подається до корпусу. В першому корпусі утворюється вторинна пара. Далі вона відділяється від крапель і надходить у другу камеру багатокорпусної випарної установки. Тут вона вже використовується як теплоносії. До збірника конденсату відводиться конденсат сокової пари з камери підігріву. Його використовують на потреби виробництва. Після того, як розчин випарено, його з нижньої частини корпусу направляють у розчинний простір наступного корпусу. Тиск у сепараційній зоні даного корпусу менше тиску сокової пари першого корпусу. Через те, що у корпусі тиск знижено, то і температура кипіння розчину в ньому також знижується. Це дозволяє використовувати сокову

пару першого корпусу як первинну другого. Перепади тиску між корпусами розраховуються за формулою (15):

$$\Delta p_1 = \frac{\Delta P}{n} \quad (15)$$

Δp_1 – перепад тиску по ступенях, бар;

ΔP – загальний перепад тиску в БКВУ, бар;

n – кількість корпусів.

Аналогічно процес проходить і в наступному корпусі. Тут сокова пара другого корпусу виступає як теплоносії для третього. Випарювання тут відбувається під вакуумом. В даній установці сокова пара третього корпусу не використовується, оскільки вона виходить із низькими енергетичними параметрами. Тому сокова пара третього корпусу відправляється до барометричного конденсатора, де, за рахунок контакту з холодною водою, вона конденсується. Далі суміш води і конденсату відводиться з барометричного ящика у систему охолодження води.

Далі розчин насосом зі збірника соку надходить на подальшу переробку. За допомогою вакуумного насоса несконденсовані гази відкачуються і викидаються в атмосферу [59].

Потужність насосу можна розрахувати за формулою (16):

$$N = \frac{V_2 \cdot \Delta p_2}{\eta_H} \quad (16)$$

N – потужність на приводі насосу випарного апарату, Вт;

η_H – коефіцієнт корисної дії насосу;

Δp_2 – втрата тиску при русі розчину по циркуляційному контурі випарного апарату, Па;

V_2 – об’ємна продуктивність циркуляційного контуру випарного апарату, м³/с.

З метою забезпечення правильної роботи такої установки необхідно домогтися підтримки корисної різниці температур у кожному корпусі від 7 до 9⁰С. Це можливо лише при невисокій температурній дисперсії розчинів та при збільшенні в’язкості розчину при випарюванні. Корисна різниця температур – це

різниця між температурою конденсації пари, що гріє та середньою температурою кипіння розчину у випарному апараті. Її можна розрахувати за формулою (17):

$$\Delta t_{\text{кор}} = \Delta t_{\text{заг}} - (\sum_1^n \Delta'_1 + \sum_1^n \Delta_2 + \sum_1^{n-1} \Delta_3) \quad (17)$$

$\Delta t_{\text{кор}}$ – корисна різниця температур, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{заг}}$ – загальний температурний перепад БКВУ, $^{\circ}\text{C}$;

$\sum_1^n \Delta'_1$ – сума фізико-хімічних температурних депресій у всіх корпусах установки, $^{\circ}\text{C}$;

$\sum_1^n \Delta_2$ – сума гідростатичних температурних депресій у всіх корпусах установки, $^{\circ}\text{C}$;

$\sum_1^{n-1} \Delta_3$ – сума гідродинамічних температурних депресій в усіх інтервалах між корпусами установки, $^{\circ}\text{C}$.

Основною перевагою система автоматизації багатокорпусних випарних установок є те, що із першого корпусу в наступні відбувається перетікання розчину за рахунок перепадів тисків у корпусах. Також перевагою є мінімальні втрати тепла з розчином, який отримується на виході з останнього корпусу випарної установки. Також наявні і деякі недоліки. Наприклад, можуть виникати несприятливі умови теплопередачі в корпусах. Це пов'язано з тим, що з підвищенням концентрації розчину в наступних корпусах зменшується коефіцієнт теплопередачі та збільшується в'язкість. Коефіцієнт теплопередачі розраховується за формулою (18):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{\text{заг}} + R_{\text{окс}}} \quad (18)$$

Де K – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від пари, яка конденсує до зовнішньої стінки труби, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до випарюваного розчину, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

$\delta_{\text{ст}}$ – товщина стінки кип'ятильної труби, м;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$;

$R_{\text{заг}}$ – термічний опір забруднень з обох сторін кип'ятильної труби, $(\text{м}^2 \cdot \text{K})/\text{Вт}$;

$R_{\text{окс}}$ – термічний опір оксидної плівки (лише для труб з вуглецевої сталі),
 $R_{\text{окс}}=(1,0..1,2)*10^{-4}, (\text{м}^2*\text{К})/\text{Вт}$.

Серед недоліків є те, що з підвищенням концентрації розчину в корпусах зменшується корисна різниця температур, через що в останньому корпусі з максимальною концентрацією розчину – температура мінімальна.

Для протидії цьому недоліку при проектуванні системи автоматизації випарної установки використовують багатокорпусні випарні установки із протитечієм живлення. У даній установці розчин з низькою концентрацією подають в останній корпус і він рухається протитечією до вторинної пари попереднього корпусу. Теплоносій подають до першого корпусу. Проте перший корпус має працювати під підвищеним тиском [60].

Схему підігріву розчину конденсатом і вторинною парою зображено на рис 6. На рис 6. $d_{\text{під}}$ - питома витрата пари, що гріє на підігрівач, кг/с; d_1 - питома витрата пари, що гріє на перший корпус, кг/с; $W_1 - W_n$ – кількість випарюваного розчину в 1-п ступенях установки, кг/год; $E_1 - E_n$ – витрата вторинної пари в 1-п ступенях кг/год; 1,2,3 – парові підігрівачі розчину; 4 – підігрівач розчину.

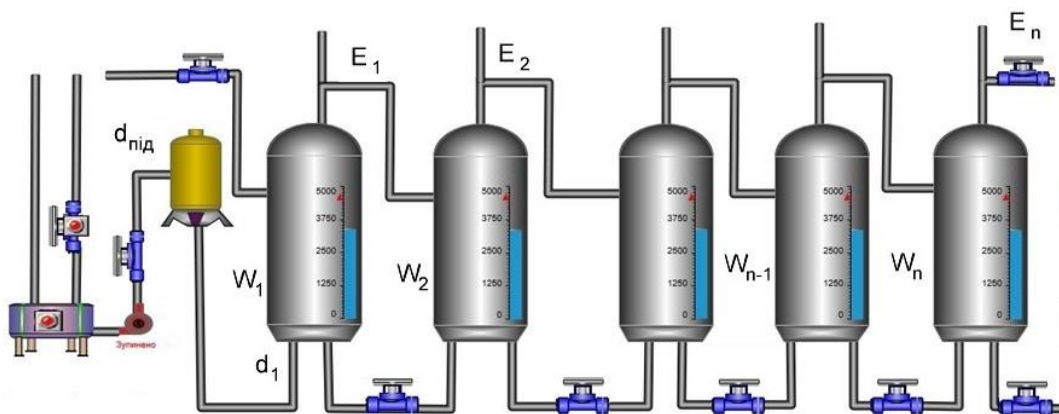


Рис. 6. Схема підігріву розчину конденсатом і вторинною парою

Отже, у даній системі автоматизації випарної установки з підвищенням концентрації розчину при випарюванні є можливість підвищувати температуру пари, що гріє, забезпечувати високу коефіцієнти теплопередачі у корпусах багатокорпусної випарної установки та підтримувати майже постійну корисну різницю температур [61]. Проте основним недоліком багатокорпусних випарних

установок є те, що в протитечійній установці розчин передається із корпусу з меншим тиском у корпус з більшим тиском і для цього між корпусами потрібно встановлювати насоси для перекачування, що несе за собою підвищення витрат електроенергії.

Також існують системи автоматизації багатокорпусних випарних установок з виділенням випареного розчину одночасно з усіх розчинів і труб, з паралельним і зі змішаним живленням корпусів [62].

Оскільки, як було вказано вище, при випарюванні виникають значні втрати енергії, зі збільшенням кількості корпусів при розробці системи витрата пари зменшується. Також це призводить до зменшення витрат води для конденсації сокових парів. Проте це і збільшує витрати на обладнання, ремонт, обслуговування, монтаж. Крім того, зростає і вартість експлуатації. Тому, можна зробити висновок, що існує багато факторів, які впливають на вартість процесу і тому ці показники необхідно оптимізувати при розробці системи автоматизації випарної установки.

Мінімум зведених сумарних витрат є одним із критеріїв оптимальності для даного процесу. Існує багато методів вибору оптимальної кількості корпусів при розробці системи автоматизації випарної установки. Це може бути графоаналітичний метод, використання програм, обчислювальної техніки тощо [63].

Застосування систем автоматизації багатокорпусних випарних установок також потребує у використанні первинної пари високого тиску в першому корпусі, хоча і заощаджує на використанні енергетичних ресурсів, все одно потребує додаткових витрат на обладнання і експлуатацію. Через ці фактори і виникає необхідність у розробці нових варіантів систем автоматизації випарних установок.

Такими системами нового типу можуть бути, наприклад, системи з використанням теплових насосів. У таких системах автоматизації перетворення сокової пари на водяну відбувається завдяки використанню термокомпресорів та інжекторів [64].

Системи автоматизації випарних установок з використанням термокомпресії призводять до одночасної економії енергоресурсів і капітальних витрат. Система

автоматизації з тепловим насосом може порівнюватися за енергетичними показниками з роботою 3-4 корпусної випарної установки. Але при цьому число одиниць обладнання залишається рівним простій однокорпусній установки.

Фізична сутність процесу випарювання полягає у трансформації сокових парів з використанням компресорної техніки, яка, в свою чергу, дозволяє додатково стискувати і повторно використовувати сокову пару як теплоносії. Також, в установках з тепловим насосом непотрібно встановлювати таке допоміжне обладнання, як барометричний конденсатор і вакуум-насос [65]. Для стискування сокової пари у системах автоматизації часто застосовують турбокомпресори.

Але системи автоматизації з турбокомпресорами використовують порівняно зрідка. Це пов'язано з тим, що такі установки досить складні в експлуатації, а також використовують багато електроенергії. Крім того, сокова пара містить мікроскопічні краплі випарюваного розчину, що викликає корозійний та ерозійний знос лопаток турбіни турбокомпресора [66].

Системи автоматизації багатокорпусних випарних установок адіабатного (миттєвого) випарювання застосовують, як правило, для опріснення води або кристалізації деяких речовин. Випарювання та концентрація в цих установках відбувається за допомогою процесу багатоступінчатого самовипарювання заздалегідь перегрітого розчину в послідовно з'єднаних апаратах (секціях). Випарювання розчину з високою інтенсивністю забезпечується шляхом зниження тиску в секціях багатоступінчастої установки [67].

Таблиця 1. Оптимальні параметри роботи випарної установки

Параметр	Корпус					
	I	II	III	IV	Концен- тратор	V
Чотирикорпусна випарна установка з концентратором						
Температура пари, що гріє, °C	132	124,5	115	101	84	-
Абсолютний тиск пари, що гріє, МПа	0,292	0,233	0,172	0,107	0,057	-
Корисна різниця температур, °C	6	7,5	10,5	12	15,6	-

Температура кипіння соку, °C	126	117	104,5	89	68,4	-
Температура сокової пари, °C	125,5	116	102	85	65	-
Абсолютний тиск сокової пари, МПа	0,241	0,178	0,111	0,059	0,0255	-
Температура конденсату, °C	130	122,5	113	99	82	-
П'ятикорпусна випарна установка з підвищеним температурним режимом						
Температура пари, що гріє, °C	136	127,5	119	110	-	99
Абсолютний тиск пари, що гріє, МПа	0,322	0,25	0,192	0,143	-	0,098
Корисна різниця температур, °C	7	6,5	7	8	-	8,5
Температура кипіння соку, °C	129	121	112	102	-	90,5
Температура сокової пари, °C	128,5	120	111	100	-	86,5
Абсолютний тиск сокової пари, МПа	0,258	0,199	0,148	0,101	-	0,061
Температура конденсату, °C	134	125,5	117	108	-	97

Перевагами таких систем автоматизації випарної установки є низькі витрати тепла та відсутність контакту між поверхнею теплообміну та киплячим розчином. Зараз також проектується систем автоматизації випарних установок, у яких питомі витрати тепла будуть вдвічі нижчими. Головним недоліком систем такого типу є високі капітальні витрати, але їх можна значно знизити за рахунок збільшення потужності установок.

Системи автоматизації випарних установок діляться на такі, випарні апарати яких працюють під розрідженням та під надлишковим тиском. Це залежить від тиску в останньому корпусі випарної установки. На практиці найбільшого поширення здобули установки, які працюють під розрідженням. Це зумовлено їх більшою економічною ефективністю, оскільки у випарних установках надлишковим тиском важче підтримувати сталий режим роботи, ніж в установках з використанням вакууму.

В наш час широкого застосування знайшли системи автоматизації чотирикорпусних випарних установок з концентратором, який працює під розрідженням, та п'ятикорпусних випарних установок, в яких під розрідженням останній корпус. Зі збільшенням перепаду теплоти між I корпусом та V або концентратором процес стає більш економічним через інтенсифікацію [68]. Оптимальні умови для роботи чотирикорпусної та п'ятикорпусної випарної установки забезпечуються шляхом контролю та регулювання сукупності параметрів, зазначених у таблиці 1 [2].

Схема автоматизації системи повинна забезпечувати:

- контроль температури по корпусах;
- стабілізацію тиску сокової пари на I та II корпусах випарної установки;
- стабілізацію розрідження у V корпусі;
- стабілізацію рівнів соку у випарних апаратах;
- стабілізацію витрати соку на ВУ;
- подачу ам'ячної води у збірник соку перед ВУ у разі критичного падіння в ньому рівнях
- контроль сухих речовин у сиропі, який передається на подальшу переробку [70].

Більш детально ці вимоги сформуємо у вигляді таблиці за формою, наведеною у табл. 13.

На базі завдання на розробку схеми автоматизації, в якості яких можна розглядати інформацію, наведену у табл. 13, можна розробити розгорнуту схему автоматизації, на якій будуть показані вже конкретні технічні засоби і їх взаємний зв'язок.

У контурах контролю температури (1,2,3,4,5) використовується термометр опору (ТЕ) з вбудованим перетворювачем в уніфікований сигнал (ТТ), який підключається до аналогового сигналу мікропроцесорного контролера (крапка на лінії входу аналогового ВА на ПЛК). З ПЛК ця інформація передається на АРМ оператора-технолога, а саме на екран мнемосхеми (перетин з лінією I –

відображення), записується у пам'ять (перетин з лінією R – реєстрація) з подальшою можливістю перегляду трендів її зміни у часі, а також на підсистему тривог (перетин з лінією A – сигналізація, для виводу на АРМі оператора повідомлення тривоги якщо значення температури вийде за встановлені межі) [71].

У автоматизації випарних установок широко використовуються варіанти регулювання рівня на притоці з блокуванням на стоці та регулювання на стоці з блокуванням на притоці. Проте це викликає цілий ряд недоліків, одним з яких є різке переривання подачі соку в момент блокування, що призводить до підвищення коефіцієнта нерівномірності сокового потоку в межах установки. Для того, щоб усунути даний недолік було розроблено системи плавної дії на стік та притік соку в апарати. Один з таких варіантів зображено на рис. 7.

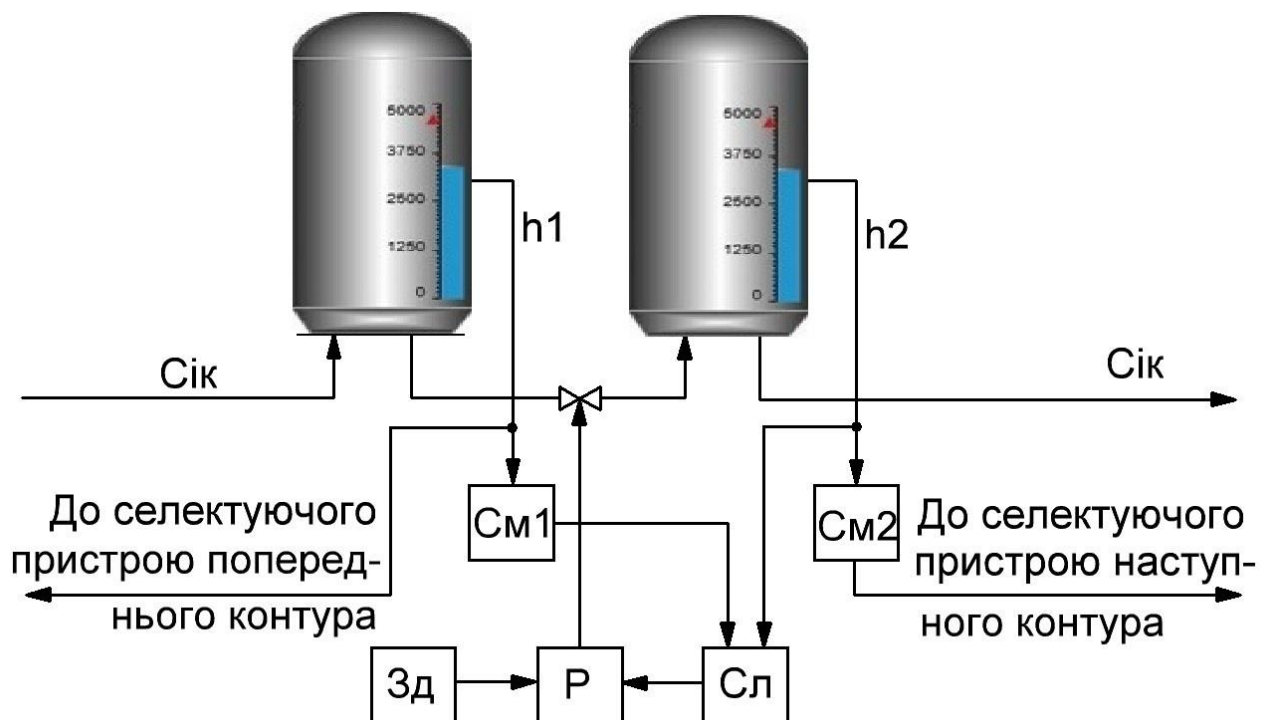


Рис. 7. Блок-схема регулювання рівня у випарній установці (перший варіант)

У даній системі на вхід блока селективного регулювання Сл надходить сигнал рівня h1 в корпусі I, який інвертовано за допомогою суматора См1, та сигнал рівня h2 у корпусі II. Сигнал з блоку селектування та сигнал завдання Зд надходять до пропорційного регулятора Р, який керує регулюючим клапаном. Даний клапан встановлюють на трубопроводі, по якому проходить сік між двома корпусами.

Якщо рівень у корпусах I та II відповідає заданому, то даний клапан знаходиться у положенні рівноваги, яке, в свою чергу, залежить від налаштувань регулятора. Якщо в сусідніх корпусах рівні нижче заданих, то потік соку варто регулювати на стоці, а якщо ж рівні вище заданих, то на притоці. Якщо виникає ситуація, коли у корпусі I рівень максимальний, а у корпусі II – мінімальний, то регулюючий клапан займає відкрите положення. Якщо ж навпаки у I корпусі рівень мінімальний, а у II максимальний, то клапан займає закрите положення.

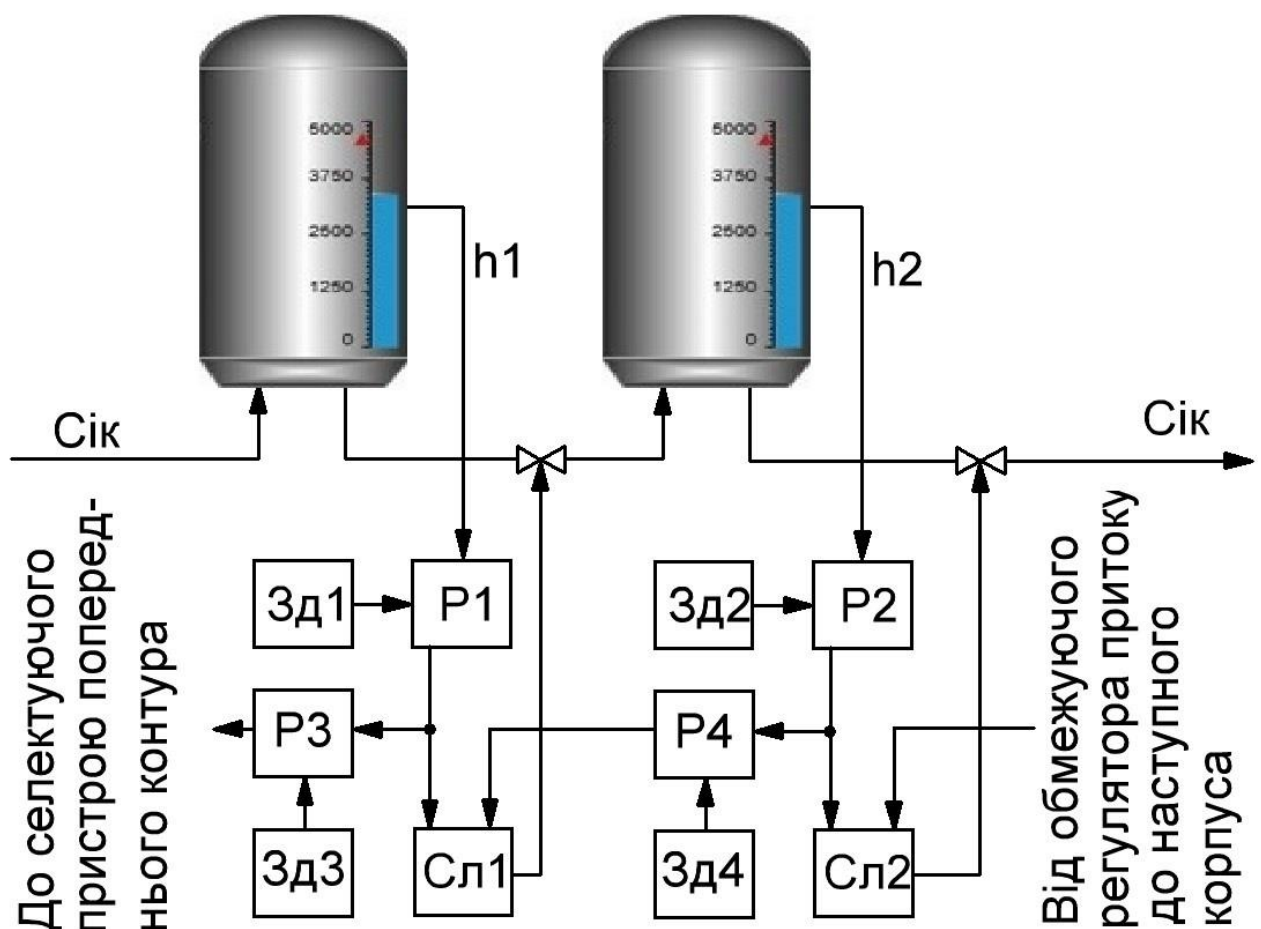


Рис. 8. Блок-схема регулювання рівня у випарній установці (другий варіант)

Другий варіант системи регулювання рівня зображено на рис. 8. Дана система полягає у впливі на стік з плавним обмеженням притоку, якщо рівень у наступному апараті підвищився до зони обмеження. У даному випадку підтримка рівнів h_1 та h_2 у корпусах I та II відбувається за рахунок регуляторів P1 та P2, які впливають на регулюючі органи на стоці з них через селективні регулятори Сл1 та Сл2. У даному

використовується два задатчика Зд1 та Зд2 для завдання рівнів. Якщо рівень надходить до верхньої зони обмеження, то регулятори Р3 та Р4 формують сигнал обмеження на притік в апарат. Зони обмеження рівнів задаються задатчиками Зд3 та Зд4. За допомогою селекторів Сл1 та Сл2 відбувається вибір сигналу регулювання від регуляторів Р1 та Р2 або від регуляторів Р3 та Р4. Перевагою такої системи над першим варіантом є те, що такий варіант дозволяє оперативно змінювати зони регулювання рівня за допомогою задатчиків Зд1 та Зд2, без зміни параметрів налаштування інших елементів системи. Недоліком же є складність даної системи у порівнянні з першим варіантом [2].

В контурах автоматичного контролю і регулювання рівнів в корпусах випарки (контури 9, 10, 11, 12 і 13) для вимірювання рівня використовується буйковий рівнемір (LE) з вбудованим перетворювачем в уніфікований електричний сигнал (LT), який подається на аналогові входи контролера (ВА). Ця інформація поступає в блок автоматичного регулятора контролера (перетин з С – автоматичне регулювання), а також на АРМ оператора-технолога, в якому значення рівнів виводиться на екран комп'ютера (перетин з І) у вигляді стовпчикових діаграм і записується у пам'ять (R – реєструються з подальшою можливістю перегляду трендів). Крім того формується сигнал тривоги (А) у випадку, якщо значення рівнів виходить за встановлені межі. Управляючий сигнал, який виробляється контролером виводиться з відповідних аналогових виходів контролера (АВ) у вигляді уніфікованого електричного сигналу. Пропонується вибрати пневматичні виконавчі механізми. Сигнал від контролера подається на електро-пневмоперетворювач (наприклад LY 96), який перетворює аналоговий уніфікований електричний сигнал. Той в свою чергу через виконавчий механізм (наприклад 9в) змінює положення регулюючих клапанів. Оператор може управляти положенням регулюючого органу в дистанційному (ручному) режимі (перетин з С – дистанційне управління з АРМа оператора).

В контурі контролю і регулювання подачі соку на випарну установку (контур 14) використовується індукційний витратомір.

В контурі 15 (контроль та управління рівнем в збірнику соку) використовується гідростатичний рівнемір (15 а). В контурі 16 – контроль сухих речовин, використаний автоматичний рефрактометр.

В контурі управління насосом подачі соку використовується магнітний пускач (NS), яким можна керувати автоматично з контролера (перетин з S на АРМ) і зі щита оператора (HS – перемикач режиму, Н – кнопка на щиті)

1.3. Аналіз невідповідностей в роботі існуючих систем керування ділянками випарювання соку на цукровому заводі

Під час процесу випарювання на цукровому виробництві може виникати цілий ряд деяких аномалій, з якими не справляються сучасні засоби автоматизації. Такі аномалії призводять не тільки до зниження теплотехнічних показників заводу, а викликати додаткові втрати цукру та змінювати колір сиропу.

Однією з таких аномалій є низька продуктивність випарної установки та низька концентрація сухих речовин сиропу. Таке зниження може відбуватись через ряд проблем. Однією з таких проблем є низька деаерація камер підігріву.

Іншою проблемою є переповнення конденсатом камер підігріву. Дана проблема виникає при поганій роботі гідравлічних колонок та відводчиків конденсату. Це призводить до порушення температурних режимів випарної установки та коливання величин тиску. Корисна різниця температур при переході в наступний корпус, як правило, становить 5,5; 7,5; 9,0; 9,5 °С. Температурні втрати складають 10, 12, 15, 25, 38%.

Корисна різниця температур залежить від швидкості руху пари. Зниження корисної різниці температур при швидкості пари 25 м/с складає 0,8-0,9 °С, при 35 м/с – 1,5 °С, при 45 м/с – 2,5-3,0 °С. Корисну різницю температур можна розрахувати за формулою (19):

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \left(\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} \right)} \quad (19)$$

Де Δt_{CP} - корисна різниця температур, °С;

Δt_B – найбільший температурний натиск між теплоносіями у камері підігріву, °С;

Δt_M – найменший температурний натиск між теплоносіями, °С.

Надто високий рівень соку у випарній установці викликає зниження інтенсивності теплопередачі та циркуляції соку. Існує емпіричне правило за яким рівень соку (% від загальної висоти кип'ятильних трубок) має бути рівним концентрації сухих речовин соку, що знаходиться у даному корпусі. Наприклад, в

першому корпусі 25%, у другому – 30-35%, у третьому – 35-50%, у четвертому – 45-65%.

Нормальні значення швидкості руху пари наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Нормальні значення швидкості руху пари

Речовина	Тип	Швидкість (м/с)
Сік	На вході	0,7-1,0
	На виході	1,2-1,5
Пара	Перегріта	30-40
	Ретурна	25-30
	I та II корпусів випарної установки	30-35
	III корпуса випарної установки	35-40
	IV корпуса випарної установки	45-50

Низька концентрація сухих речовин у соці другої сатурації виникає через великий відбір осаду та низьку густину вапняного молока, яке застосовують для очистки. Також причиною виникнення даної проблеми може бути потрапляння води до корпусів випарної установки з лінії її підведення.

У разі недостатньої кількості пари, що гріє виникають проблеми з витримкою необхідного рівня температури та тиску. Дана проблема виникає, як правило, з надходженням недостатньої кількості пари з ТЕЦ або зі збільшенням витрати пари на уварювання утфелю.

Неправильний розподіл сокових парів між окремими споживачами та їх нерівномірний відбір призводить до неправильного відбору сокових парів з корпусів випарної установки. Це призводить до підвищення тиску у корпусах випарної установки.

Недостатня кількість води, яка надходить на барометричний конденсатор, її висока температура, надто високий рівень соку в останньому корпусі, погане відкачування газів, які не конденсуються, та погане обслуговування випарної установки можуть призводити до зменшення розрідження.

За рахунок конденсату, що виникає з сокової пари чи конденсату, що надходить з парової камери через порушення її герметичності може виникати розбавлення соку водою. Також це може відбуватися і в збірнику соку перед випаркою та потрапляти у апарат через комунікації її підводу.

На поверхні нагріву може виникати накип. Про це може свідчити зростання температурної межі в окремих корпусах. Якщо сік добре фільтрується та очищається, то накип виникає в останніх корпусах установки. За поганого очищення це явище можна спостерігати і у перших корпусах. З метою уникнення цього процесу, за допомогою іонітів, проводять пом'якшення соку другої сатурації. Також можна проводити очистку за допомогою тринатрійфосфату, але цей спосіб є менш ефективним. Відомо, що супротив теплопередачі зростає зі зростанням товщини накипу. Доведено, що ефективність поверхні нагріву знижується зі 100% до 34% при товщині накипу 1мм та до 20% - при товщині 2мм.

Проблеми також можуть виникати при недостатній та надлишковій поверхнях нагріву. Якщо поверхня обігріву є недостатньою, то необхідну концентрацію сухих речовин сиропу необхідно забезпечувати наступним чином: шляхом збільшення температурного перепаду пари у камері підігріву; правильного відводу газів, які не конденсуються; дотримання оптимального рівня соку у корпусах; зменшення відбору дифузійного соку; правильного відведення конденсату з камер підігріву; попередження утворення накипу на поверхні обігріву.

Надлишковою являється така площа, при якій на окремих ступенях випарювання знаходиться два або більше випарних апарати. Шляхом відключення одного апарату або переключенням можна зменшити поверхню розподілу або скорегувати її таким чином, що ефективність установки зросте.

Також площі поверхні нагріву можуть бути неправильно розподілені по корпусам. Шляхом зміни відбору пари окремих корпусів таким чином, щоб поверхні їх нагріву мали нормальне навантаження, можна прибрати повністю або частково цю проблему.

Досить розповсюдженою проблемою також являються несправності повітряного насосу та конденсатора. Це виникає по ряду причин: на конденсатор надходить недостатня кількість води, або вона має занадто високу температуру; погано розпилюється охолоджена вода; пастки насосів забиті деякими домішками; низька потужність повітряного насосу; не закрито вентиль, який з'єднує вакуум-апарат з атмосферою; погано відсмоктуються гази, що конденсуються; подача пінної води до конденсатора; погано закрито спусковий шибєр вакуум-апарату.

Коливання концентрації сухих речовин у сиропі. Дана проблема може виникати через ряд причин. Однією з таких причин є коливання розрідження. Може виникати через одночасний початок уварювання утфелю в кількох апаратах або може викликатися поганою роботою конденсатора. Іншою причиною може бути нерівномірне надходження пари до генеруючої камери першого корпусу. Це явище нівелюється за рахунок автоматичного регулювання додавання гострої пари до ретурної. Ще однією причиною може бути нерівномірне надходження соку другої сатурації до випарної установки. Ця проблема вирішується за рахунок установки збірника другої сатурації. Четвертою причиною є нерівномірний відбір сокових парів. Рішенням цієї проблеми полягає у включенні теплообмінників по одному і починаючи уварювати утфель тільки в одному апараті.

Підвищення тиску у випарному апараті. Дана проблема виникає через декілька причин. Однією з таких причин є недостатня конденсація пари у камері підігріву наступного корпусу установки. Таке зменшення викликає те, що у камері підігріву погано відводиться конденсат або у випарному апараті низький рівень соку. Дана проблема вирішується за рахунок перевірки відводу конденсату та підвищення рівня соку у випарному апараті.

Надто високі втрати цукру під час процесу випарювання. Такі втрати можуть відбуватися через декілька факторів. Одним з факторів є віднесення крапель соку з соковою парою. Дане явище підсилюється з кожним наступним корпусом через вищу швидкість руху сокової пари. Також втрати можуть виникати через запінення соку. Це відбувається через погіршення випарювання бо піна вкриває поверхню і пригорає. Дане явище виникає через помилки в очищенні та фільтрації соку, а

також через використання зіпсованого буряка. Ця проблема вирішується шляхом додавання після кип'ятильника або перед фільтрами гасителів піни. В якості таких гасителів можуть використовуватися яловичий жир, масла тощо. Ще однією проблемою є перекидання соку. Як правило, виникає в останніх корпусах. Виникає через ускладнення руху пухирців з парою через підвищену в'язкість соку в останніх корпусах. Через це, при різкому збільшенні пухирців може різко збільшитись рівень соку. Негерметичність камер підігріву також може впливати на втрати цукру. Навіть при невеликих нещільностях сік не може потрапити до наступної камери через те, що там вищий тиск, ніж у попередньому корпусі. При великих нещільностях сік може потрапляти до камери підігріву. В такому випадку конденсат буде містити цукор. Розкладання сахарози також є причиною втрат цукру. Колір сиропу нижчий на стільки, на скільки менше сахароза розкладалася, що прямо залежить від часу перебування сиропу у випарній установці. Також кількість розкладеної сахарози залежить від концентрації сухих речовин у розчині.

Погана циркуляція соку у корпусах, занадто високий рівень соку, занадто довге його перебування у корпусах призводять до збільшення забарвленості сиропу. Також висока забарвленість є наявною при згущенні соку низької якості, особливо при високій кількості реагуючих речовин.

Досить серйозною проблемою у плані енергетичних витрат є надто висока витрата пари, що гріє. На витрату пари, що гріє впливають:

- 1) Втрати тепла в оточуюче середовище. Якщо обладнання погано ізольоване, то такі втрати можуть бути дуже великими;
- 2) Кількість та концентрація сухих речовин соку другої сатурації. Відомо, що зі збільшенням соку другої сатурації та зниження у ньому вмісту сухих речовин значно збільшується витрата пари;
- 3) Втрати тепла при відведенні газів, які не конденсуються. Дані втрати можна регулювати за допомогою спеціальних вентилів або клапанів;
- 4) Величина відбору пари. Пара з випарної установки на вакуум-апарати та підігрівачі з останнього корпусу надходить до конденсатора підвищена кількість пари при малому та неправильному відборі пари;

5) Температура кипіння соку. Тут є очевидним, витрата пари збільшується зі збільшенням температури кипіння соку;

6) Величина коефіцієнта теплопередачі. Величина коефіцієнта теплопередачі, при згущенні соку з 15 до 60% сухих речовин, коливається від- 2790 Вт/(м²*К) до 582 Вт/(м²*К).

Особливу увагу необхідно приділяти регулюванню рівнів соку у корпусах випарної установки. Навіть найменші відхилення від завдання можуть призводити до цілого ряду проблем. Наприклад, як зазначалося у попередньому розділі, надто високий рівень соку у випарній установці викликає зниження інтенсивності теплопередачі та циркуляції соку, а також збільшення забарвленості сиропу. Крім того надто високий рівень соку в останньому корпусі може призвести ще і до зменшення розрідження. Зниження ж рівня у випарному апараті викликає підвищення у ньому тиску. Крім того, рівень соку може різко збільшитись через різке збільшення кількості пухирців у сиропі, через що може статися перекидання соку.

Зараз, як правило, у процесі регулювання рівня при випарюванні використовуються класичні П-регулятори. Основним недоліком таких регуляторів є наявність статичної похибки та велика амплітуда коливання. Використання ж інтелектуальних регуляторів, зокрема нечітких, дозволить знизити ризик виникнення усіх зазначених вище проблем. Саме тому для вирішення цієї проблеми необхідно використати інтелектуальні регулятори.

У розділі 2 даного дослідження детально розглядається використання інтелектуальних регуляторів, а саме: нечітких та нейромережевих, у процесі випарювання. Більш детально процес розробки системи нечіткого керування описано у розділі 3 даного дослідження, а результати моделювання системи з нечітким регулятором та порівняння її з деякими іншими типами регуляторів описані у розділі 4.

1.4. Аналіз існуючих систем управління

Поліпшення системи автоматизації керування процесом випарювання є важливим завданням. У дослідженні [73] автор розглядає модель процесу випарювання, яка враховує баланс маси та енергії у трьох складових процесу випарювання. Існує унікальна поверхня розподільника нагрівача соку, якщо загальна поверхня нагрівача фіксована. У дослідженні [74] розглянуто процес лінеаризації нелінійної моделі, що складається з 14 нелінійних рівнів первинного порядку, що є динамічною моделлю випарної установки. У цьому дослідженні вперше було знайдено функцію зміни концентрації продукту на відхилення швидкості потоку рідини. У дослідженні [75] була запропонована нечітка модель випарної установки, яка зменшує час обчислень за допомогою випарної установки на основі циклу Ренкіна. Результати показали, що нечітка технологія може суттєво скоротити час розрахунків, передбачаючи вихід вихідного елементу надкритичного випарного апарата в системі термообробки відходів. У дослідженні [76] автор стверджує, що за допомогою інтелектуального управління можна забезпечити більш швидке зниження температури кожуха і досягти більш стабільного контролю перегріву в першій випарній установці. У дослідженні [77] було доведено, що контроль за випарюванням може бути реалізований шляхом переробки рідини в секції випарювання або шляхом подачі лише рідини у випарну установку. У цьому дослідженні [78] нечіткий ПД-регулятор досліджувався як дискретна версія звичайного ПД-регулятора. Таким чином, він зберігає ту саму структуру, але має незалежний регульований коефіцієнт управління. Доведено, що можна вдосконалити класичний ПД-регулятор з певними можливостями адаптивного управління. У цьому дослідженні [79] представлений ПД-регулятор нечіткої логіки. Цей регулятор є нечітким ПД-регулятором із ефективною обчислювальною аналітичною схемою. Автор доводить, що регулятор стабільний з обмеженим входом / виходом. На необхідність модернізації існуючих систем управління вказується у дослідженні [80]. Це дослідження вказує на деякі підходи, які використовуються для розподіленого рівня контролю технологічних процесів. Пояснення цих підходів корисно для кращого розуміння процесів, що відбуваються

під час формування контролюючого впливу, особливо у випадках, коли програмні програмісти для промислових САУ використовують велику кількість налаштувань для налаштування системи. Такий підхід є розумним лише для кваліфікованих фахівців зі значним досвідом роботи. Однак знання цих процесів професіоналами може також забезпечити більш гнучку роботу зі структурування даних. Дослідження [81] вказує, що одним із вдосконалених методів покращення систем управління є додавання нечіткої та нейронно-нечіткої логіки. Досліджено метод динамічного регулювання потужності парових котлів на ТЕЦ малої потужності відповідно до поточних потреб споживачів. Були проаналізовані методи динамічного регулювання потужності котельних систем з використанням нечіткої логіки та адаптивних нейронних мереж. Використання нечітких регуляторів є одним із можливих варіантів регулювання потужності котла. Регулююча дія формується шляхом перевірки узгодженості нечітких правил щодо фактичних параметрів системи. Правила створюються відповідно до досвіду оператора, який відображає його дії при зміні технологічних параметрів. У дослідженні [82] описано управління багатьма випарними установками з повною інтеграцією нечіткого управління та використанням бездротових мережевих датчиків та приводів. У дослідженні [83] представлено регулювання перегріву випарної установки за допомогою нечіткого регулятора. Дослідження [84] вказує на проведений аналіз та моделювання електронного розширювального клапана випарного апарата з нечітким регулюванням [85]. Модель ідентифікується за алгоритмом найменших квадратів на основі мінімізованої кількості квадратних залишків. У дослідженні [86] представлено нечіткий контроль перегріву випарної установки. Дослідження у дослідженні [87] розглядає використання надійного регулятора в процесі випарювання. Автор проводить порівняльний аналіз з ПІД-регулятором і робить висновок, що запропонований регулятор забезпечує кращі показники. У дослідженні [88] була розглянута методологія вдосконалення використання пари. У дослідженні [89] автори доводять, що швидкість випарювання зменшується з часом, і проводять розрахунок, який вказує, що дифузія рідкої фази є ступенем, який обмежує швидкість для цієї системи, на

відміну від випарювання чистої води. У дослідженні [90] представлена узагальнена стаціонарна математична модель для моделювання багатоканальної системи випарного апарата. У роботі [91] розглянуто проблеми усунення несправностей промислових процесів за допомогою динамічних нейронних мереж на прикладі випарної установки. Розглянута нейронна мережа має багаторівневу структуру живлення. У дослідженні [92] автор досліджує використання оптимізації в режимі реального часу в секції випарювання цукрових заводів з використанням методів, що скорочують час на розробку моделей. У дослідженні [93] автори розглядають використання генетичних алгоритмів у виробництві цукру. Дослідження [94] вказує на розробку структури автоматизованої системи управління з використанням тензорних методів у виробництві цукру.

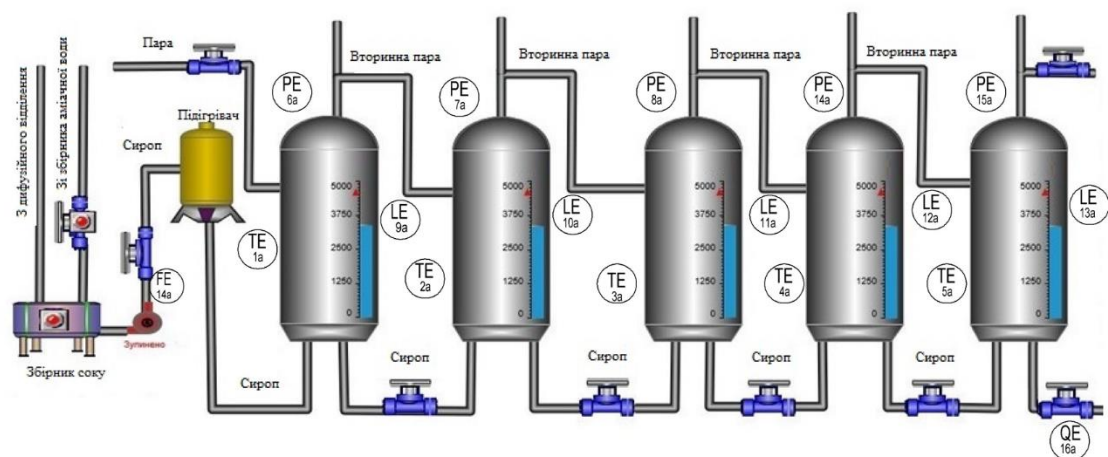


Рис. 9. П'ятикорпусна випарна установка із первинними перетворювачами

Удосконалення системи керування процесом випарювання (рис. 9) є важливим завданням, тому для розрахунку налаштувань регулятора потрібно знати всі його технологічні особливості та мати математичну модель, але це проблематично, що пов'язано із зміною технологічних параметрів під час роботи випарної установки. Крім того, є і інші фактори, які можуть впливати на роботу випарного апарата, наприклад:

- зміна продуктивності випарної установки;
- погіршення процесу випарювання у випарній установці;

- зниження вмісту сухих речовин у сиропі;
- низький рівень сиропу у корпусах;
- висока температура та тиск у корпусах.

Наприклад, у роботі [95] розглядається розвиток найкращої конструкції випарного апарата та схеми багатостадійного процесу випарювання та визначено основні конструктивні особливості випарної установки. Також автор розглядає підходи оптимізації автоматизованої системи керування випарної установки та доводить, що оптимальні результати можуть бути досягненні шляхом одночасної модернізації випарної установки і пов'язаної з нею мережі теплообмінника. В роботі [96] йдеться про те, що для проведення процесу випарювання необхідно використовувати велику кількість енергії через високу приховану теплоту води. Автор розглядає проблеми при розробці систем автоматизації для процесів з низькими енерговитратами і пропонує використовувати мембрани зворотного осмосу. У роботі [97] автор досліджує залежність кореляцій коефіцієнтів тепловіддачі для прогнозування і стверджує, що у випадку, коли станція випарного апарата вимагає очищення, ця залежність може бути помилковою. Автор пропонує використовувати онлайн-визначення коефіцієнтів теплопередачі та коефіцієнтів масштабування для отримання точних значень процесів при розробці систем автоматизації. В роботі [98] проведено дослідження, яке пропонує модель системи автоматизації процесу випарювання, що враховує взаємодію між трьома компонентами процесу через баланс маси та енергії. В наступній роботі [99] розглядається автоматизація процесу виробництва цукру на основі охолодження кристалізації соку концентрованої сировини, що дає можливість отримати якісний цукор за допомогою чотирьох стадійної кристалізації.

Автор роботи [100] досліджує алгоритми та структуру системи автоматизації та поточної діагностики випарної установки. Було використано набір евристичних залежностей та часткові параметричні моделі. Математична модель системи автоматизації випарної установки, заснована на фізичних законах та дискусія про результати моделювання наведені у роботі [101]. Проблему робастної діагностики процесів у системі автоматизації випарної установки розглянуто у роботі [102],

також у цій роботі використовується нейронно-мережевий підхід у автоматизації та звертається увага на розробку узагальнених схем спостерігачів.

Дослідження мікросхем нейронних мереж та обмежень з якими вони стикаються при розробці систем автоматизації проводяться у роботі [103]. Автори пропонують ввести компілятор, який може перетворити існуючу навчену нейронну мережу в еквівалентну, яка відповідає обмеженням обладнання. Загальний набір розширень програмного забезпечення та обладнання для спеціальних апаратних прискорювачів, які можуть використовуватись у системах автоматизації, представлений у роботі [104]. Над питанням продуктивності нейронних мереж працюють автори статті [105]. Швидкий та точний алгоритм, який використовує нейронну мережу для вивчення оптимального наближення автоматизації обробки ефекту оклюзії навколишнього середовища розглянуто у статті [106]. Метою даної роботи [107] є представити новий підхід, нейронну мережу, для використання при класифікації інтервальної інформації результатів роботи систем автоматизації. Інтерполяцію багатоваріантних даних операторів нейронної мережі доведено у роботі [108]. Також у даній роботі доведена рівномірна теорема наближення з порядком. Принципово нова нейронна мережа для автоматизації розв'язання загалом обмежених задач варіативної нерівності шляхом побудови системи подвійних проекційних рівнянь представлена у статті [109]. У статті [110] автори пропонують кілька засобів для підвищення продуктивності та підготовки нейронних мереж, що може бути використано для розробки сучасних систем автоматизації. У роботі [111] нейронна мережа, яку можна використати для автоматизації роботи самоорганізуючої радіальної бази створена для підвищення як точності, так і проникливості за допомогою адаптивного оптимізації рою частинок. Періодична нейронна мережа, яка може бути використана для автоматизації обчислення реальної матриці в режимі реального часу представлена у роботі [112]. Дослідження [113] моделює потребу в пам'яті на рівні системи та кеш-пам'яті нейронних мереж для обробки даних автоматизованої системи. Автори використовують нейронну мережу для вивчення та прогнозування кривої коефіцієнта враження. Автори статті [114] представили новий автоматизований

процес побудови та ініціалізації нейронних мереж. Також автори запропонували алгоритм, який відображає всі проаналізовані дерева рішень. У статті [115] представлено метод, заснований на стимуляції вивчення штучних нейронних мереж систем автоматизації. Втори статті [116] представили принципово нову модель фотонної нейронної мережі. У статті продемонстровано реалізацію навчання даних мереж. У роботі [117] представлена проекційна нейронна мережа, принцип дії якої описується за допомогою динамічної системи для вирішення обмежених задач програмування та автоматизації. Модифікацію ймовірнісної нейронної мережі для систем автоматизації запропоновано у статті [118]. У роботі [119] запропоновано нейромережу для вирішення класу обмежених задач оптимізації роботи засобів автоматизації. Двошарову рекурентну мережу для вирішення задачі оптимізації опуклості наведено у статті [120]. У роботі [121] запропоновано одношарову періодичну нейронну мережу та новий метод її обчислення. Новий метод вилучення глобальної та спрощеної структури з багатошарової нейронної мережі запропоновано у роботі [122]. У роботі [123] автори пропонують принципово нову модель глибокої нейронної мережі. Також у роботі [124] запропоновано новий алгоритм ваги з'єднання та кількість прихованих нейронів оптимізовані за допомогою одночасного гібридного кодування та еволюції. Автори статті [125] розробили глибоку мережеву структуру, керовану воротами балансу, для поглиблення повністю пов'язаної нейронної мережі. У роботі [126] представлено нове дослідження щодо адаптивного нейромережевого керування класом неканонічних нелінійних систем з великими параметричними невизначеностями. Зручний для використання пакет засобів та інтерфейс для роботи з нейронними мережами описано у статті [127]. Усі нові розробки у сфері роботи нейронних мереж можуть бути використані для розробки сучасних систем автоматизації, у тому числі системи автоматизації випарної установки. Автори дослідження [128] пропонують спосіб навчання нейронних мереж для систем автоматизації, в якому початкове навчання проводиться в програмному забезпеченні, а поведінку програмно-навченої мережі вивчається апаратною мережею. У роботі [129] представлена одношарова нейронна мережа для

вирішення негладких задач опуклої оптимізації на основі методу регуляризації Тихонова, що також може бути застосовано у розробці системи автоматизації випарної установки У роботі [130] описується створення багатовимірних оптимальних регуляторів за допомогою алгоритму аналітичного конструювання

Розглянемо способи покращення систем автоматизації керуванням випарюванням соку. Розпочнемо з проблеми низької продуктивності системи автоматизації випарної установки та низької концентрації сухих речовин сиропу [131]. Дану проблему можна вирішити за допомогою підігріву комунікації для відводу газів, які не конденсуються, а кількість цих газів має бути такою, щоб їх концентрація у суміші була нижче 4%. Дуже корисним інструментом, у даному випадку, може слугувати нечіткий регулятор. Це пов'язано з тим, що такий тип регуляторів використовує лінгвістичні змінні, які вводяться базуючись на знаннях експертів, занесених до бази знань. Значною перевагою таких регуляторів є те, що вони можуть поєднувати у собі знання одразу кількох експертів у певній галузі. Даний регулятор дозволить ввести лінгвістичні змінні, які використовуються для опису концентрації вмісту сухих речовин та продуктивності. Наприклад, для опису концентрації сухих речовин можна використати такі змінні як дуже низька (ДН), нижче норми (НН), норма (Н), вище норми (ВН) та дуже висока (ДВ). Аналогічним чином можна розробити систему лінгвістичних змінних для кількості газів які не конденсуються. Наприклад, це можуть бути наступні змінні: занадто низька (ЗН), низька (Н), норма (НО), висока (В), занадто висока (ЗВ).

За допомогою нечітких регуляторів можна розв'язати і інші проблеми, які зазначено у попередньому пункті [132]. Таким чином, як відомо, проблема переповнення конденсатом камер підігріву виникає при поганій роботі гідравлічних колонок та відводчиків конденсату. Базуючись на алгоритмах використання нечіткої логіки, можна додати до SCADA-системи та системи автоматизації зручну систему контролю або, навіть регулювання даних елементів системи. Так стан роботи гідравлічних колонок можна легко описати за допомогою лінгвістичних змінних. Прикладом таких лінгвістичних змінних є наступні:

колодки у незадовільному стані (НС), колодки у задовільному стані (ЗС), колодки у доброму стані (ДС), колодки у відмінному стані (ВС).

Іншою проблемою є низька концентрація сухих речовин у соці другої сатурації, яка виникає через великий відбір осаду та низьку густину вапняного молока, яке застосовують для очистки [133]. У даному випадку можна створити набір лінгвістичних змінних для відбору осаду. Прикладом можуть бути: малий відбір (МВ), норма (Н), великий відбір (ВВ).

Проблеми з витримкою необхідного рівня температури та тиску можна вирішити шляхом додавання нечітких змінних, таких як: кількість пари (дуже низька (ДН), недостатня (Н), достатня (Д)).

Як уже зазначалося вище, неправильний розподіл сокових парів між окремими споживачами та їх нерівномірний відбір призводить до неправильного відбору сокових парів з корпусів випарної установки [134]. Необхідно розробити нечіткий регулятор для кожного окремого споживача та налаштувати наступні змінні: достатній відбір (ДВ), недостатній відбір (НВ), відбір вище норми (ВВ).

При роботі системи автоматизації випарної установки випарної установки може виникати явище розбавлення соку водою. Це явище може виникати через порушення герметичності з'єднань. Тому можна ввести показники герметичності, які будуть використовуватись у системі нечіткого регулювання. Наприклад: низька герметичність (НГ), невеликі нещільності (НН), герметично (ГМ).

Використання іонітів дозволяє зменшити кількість накипу в установці [135]. Для використання нечітких регуляторів можна ввести змінні, які показують кількість іонітів та/або товщину накипу.

Вдосконалюємо систему автоматизації шляхом розробки нейромережевого регулятора, що враховує зміну поверхні нагріву. Можна ввести змінні, що характеризують температурний перепад пари (великий перепад, норма, замалий перепад). Також можна контролювати неправильне розподілення поверхонь нагріву.

Контроль роботи повітряного насоса та конденсатора можна здійснювати шляхом створення нечітких змінних кількості води, що надходить [136].

Наприклад, замала кількість води (ЗК), недостатня кількість (НК), достатня кількість (ДК).

Шляхом автоматичного регулювання додавання гострої пари до ретурної можна контролювати коливання концентрації сухих речовин у сиропі [137]. Використання нечіткої логіки дозволить значно покращити якісні характеристики перехідного процесу. Можна розробити нечіткі змінні, які характеризують ступені рівномірності надходження пари до генеруючої камери першого корпусу, рівномірність надходження соку другої сатурації до випарної установки, рівномірність відбору сокових парів.

Віднесення крапель соку з соковою парою призводить до надто високих втрат цукру під час процесу випарювання [138]. Дане явище підсилюється з кожним наступним корпусом через вищу швидкість руху сокової пари. Дані параметри також можна легко контролювати та регулювати за допомогою нечіткої логіки.

Нечітке регулювання дозволяє контролювати такі параметрами як втрати тепла в оточуюче середовище, кількість та концентрація сухих речовин соку другої сатурації, втрати тепла при відведенні газів які не конденсуються, величина відбору пари, температура кипіння соку, величина коефіцієнта теплопередачі [139].

Висновки та постановка задач дослідження

1. В ході аналізу процесу випарювання бурякового соку було виявлено, що розробку математичної моделі ускладнює наявність багатьох різних факторів, одним з яких є наявність великої кількості варіантів реалізації даної системи.
2. Система автоматизації процесу випарювання має забезпечувати найвищу продуктивність перебігу даного процесу. Крім того, з метою забезпечення необхідного рівня енергетичної та економічної ефективності системи, потрібно досягти найменших витрат пари, що гріє, втрат цукрового сиропу, дотримання необхідного для перебігу процесу тиску у кожному корпусі випарної установки.

3. Порушення технології виробництва можуть відбуватись через низьку якість соку, який надходить до системи. Також можуть виникати проблеми через людський фактор та через зношення елементів системи.
4. У сучасних системах автоматизації процесу випарювання використовуються переважно класичні регулятори. Наприклад, П-регулятори для регулювання рівня соку у корпусах. Недоліком таких регуляторів є наявність статичної похибки, значна амплітуда коливання, великий час регулювання. Використання ж інтелектуальних регуляторів, зокрема нечітких, дозволить знизити ризик виникнення усіх зазначених вище проблем.
5. Проблеми, які виникають при експлуатації автоматизованих систем процесу випарювання складно або, навіть, неможливо описати за допомогою точних залежностей. Саме в таких випадках доцільно використовувати інтелектуальні, зокрема нечіткі, регулятори.
6. Ефективна робота нечітких регуляторів забезпечується правильно сформованою базою знань. Базу знань формують експерти. Тому є дуже важливим правильний підбір експертів та методи роботи з ними при створенні даної бази.
7. Програмне забезпечення з використанням нечітких регуляторів необхідно розробити таким чином, щоб воно працювало в уже готових системах автоматизації.
8. Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити такі задачі:
 - провести аналіз процесу випарювання цукру з бурякового соку як об'єкта автоматизації;
 - розробити систему інтелектуального керування випарною установкою з використанням нечітких та нейромережевих регуляторів;
 - розробити алгоритми та модель прогнозування для системи нечіткого та нейромережевого регулювання;
 - розробити алгоритми та структури системи нечіткого та нейромережевого регулювання;

- розробити структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення підсистеми підтримки прийняття рішень для коригування технологічних параметрів;
- розробити людино-машинний інтерфейс системи.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ТА РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ ВИПАРНОЇ СТАНЦІЇ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

2.1. Використання інтелектуальних регуляторів при керуванні випарною установкою

2.1.1. Використання нечіткої логіки у процесі випарювання

У даній роботі широко застосовуються інтелектуальні регулятори. Узагальнену структуру інтелектуального регулятора зображено на рис. 10

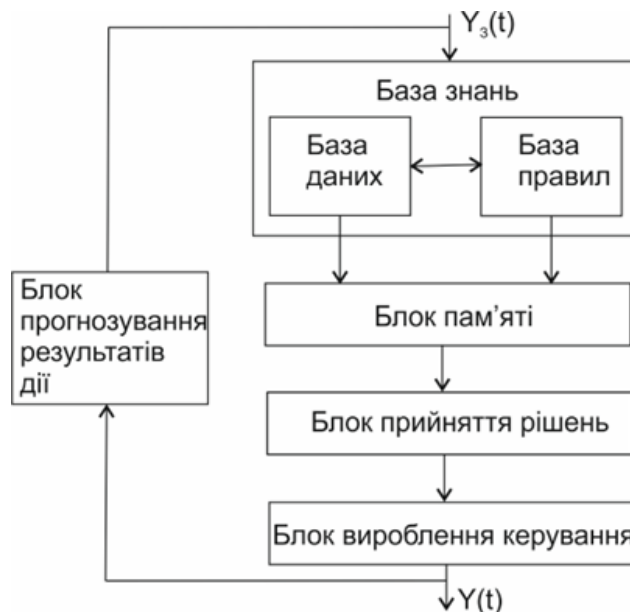


Рис. 10 Структура інтелектуального регулятора.

Узагальнену структуру експертної системи для інтелектуальних регуляторів наведено на рис. 11.

Одним з таких регуляторів є нечіткий регулятор. Нечіткі регулятори реалізуються на понятті нечіткої логіки. Нечітка логіка (англ. fuzzy logic) — розділ математики, який поєднує в собі теорію множин та класичну логіку. Тому за допомогою нечіткої логіки можна досліджувати судження в умовах нечіткості таким чином, що їх можна застосувати в складних обчислювальних системах. Такою системою являється п'ятикорпусна випарна установка.

Для синтезу нейромережевого регулятора у випарному апараті спочатку необхідно виділити нечікі множини [140]. Для вдалої розробки системи з

нейромережовим регулятором необхідно з нечітких множин виділити нечіткі підмножини [141].

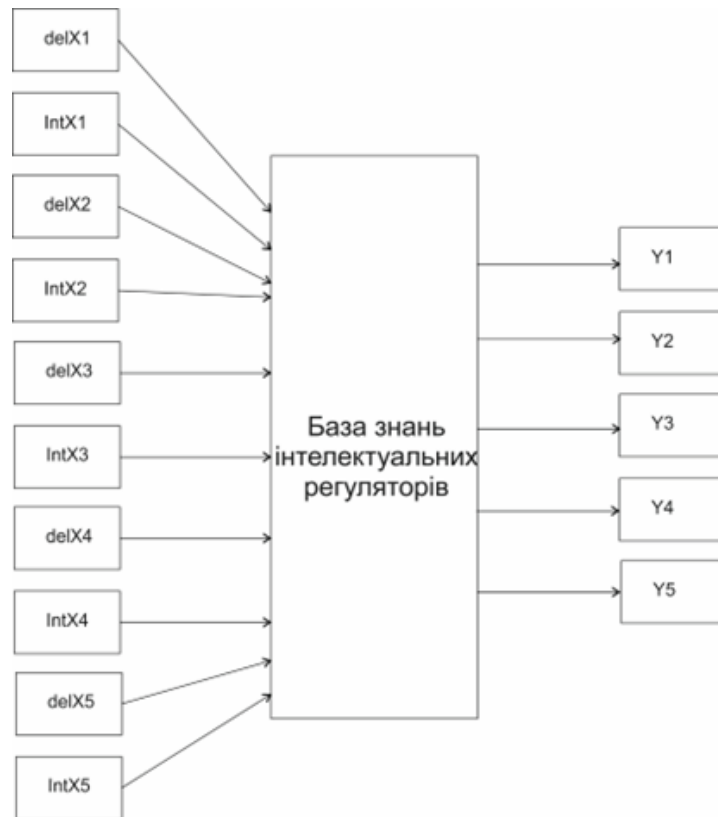


Рис. 11. Структура експертної системи для інтелектуальних регуляторів

Головною відмінністю нечіткої логіки від булевої алгебри є те, що тут наявні не лише стани 0 та 1, а й перехідні стани. Основними поняттями сучасної нечіткої логіки виступають фазифікація, дефазифікація, нечітка множина. Зараз значення нечіткої логіки, з розробкою нових систем взаємодії з людиною, продовжує невпинно зростати.

Для синтезу нейромережевого регулятора рівня у випаргному апараті спочатку необхідно виділити нечікі множини [142]. Нечітка множина - це пара (A, m) , де A - ім'я нечіткої множини, а m - функція приналежності [143].

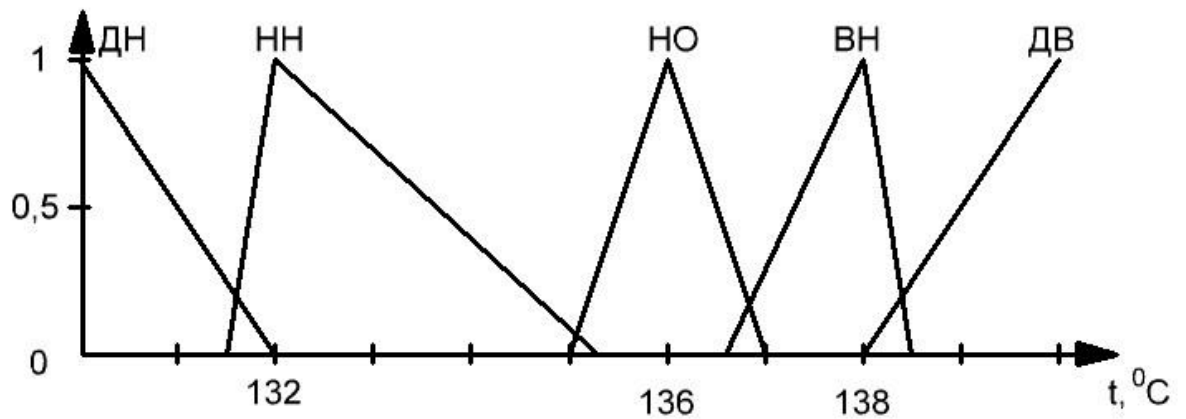


Рис. 12. Функція належності для температури у першому корпусі випарної установки.

Для випарної установки можна виділити наступні множини: рівень у I-V корпусах, температура соку у I-V корпусах, тиск пари. Температура пари, що гріє у першому корпусі має відповідати значенню 136°C , допустимими є значення $132-138^{\circ}\text{C}$, виходячи з цього, можна розробити функцію належності, яка показана на рис. 12., де НО – норма, НН – нижче норми, ВН - вище норми, ДН – дуже низька, ДВ – дуже висока.

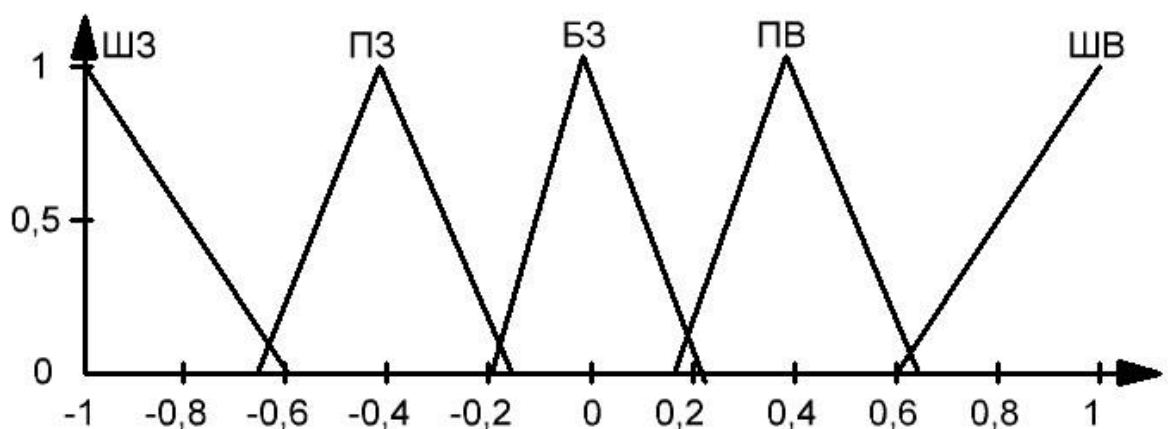


Рис. 13. Функція належності для РО.

Функція належності для регулюючого органу буде мати вигляд як на рис. 13., де БЗ – без змін, ПЗ – повільне закриття, ПВ – повільне відкриття, ШЗ – швидке закриття, ШВ – швидке відкриття.

Регулювання рівня можна здійснити за схожим алгоритмом. У даному випадку висота кип'ятильних труб випарного апарату складає 4 м. Відомо, що оптимальні рівні у випарних апаратах складають: 20-30 % - для першого корпусу, 30-40 % - для другого, 40-50% – для третього, 50-60% – для четвертого та 60 – 70 % - для п'ятого [144]. Таким чином для рівнів у корпусах можна розробити свої функції належності. З рис 14. видно, що оптимальним є вибір трапецеїдальної функції належності.

Для вдалої розробки системи з нейромережевим регулятором необхідно з нечітких множин виділити нечіткі підмножини [145]. Така підмножина характеризується тим, що для елементів u з U немає однозначної відповіді «ні» або «так» щодо властивості G .

З метою правильного опису нечітких множин, використовуються нечітка та лінгвістична змінні.

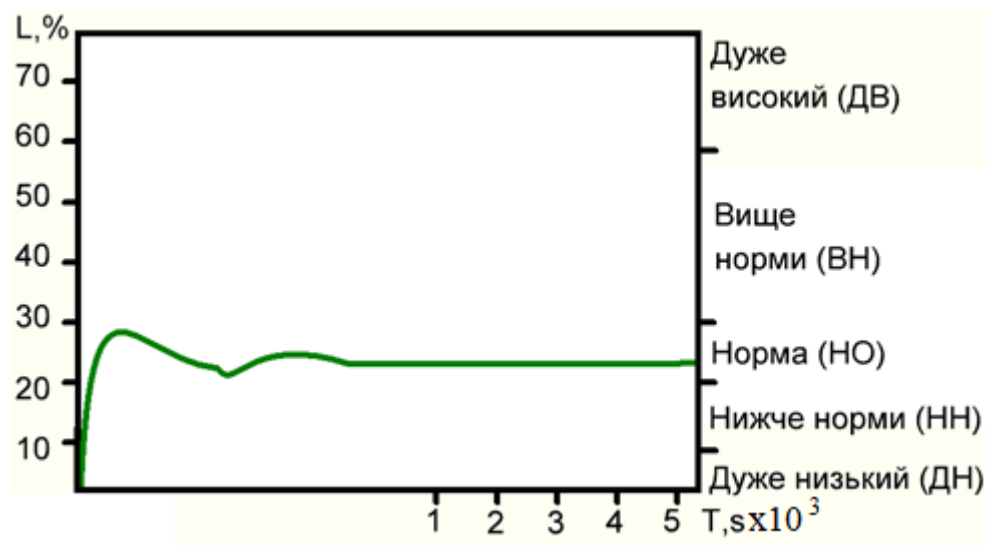


Рис. 14. Точки побудови функції належності рівня у першому корпусі на основі перехідного процесу.

Для першого корпусу функція належності матиме вигляд як показано на рис. 15, де НО – норма, НН – нижче норми, ВН - вище норми, ДН – дуже низький, ДВ – дуже високий.

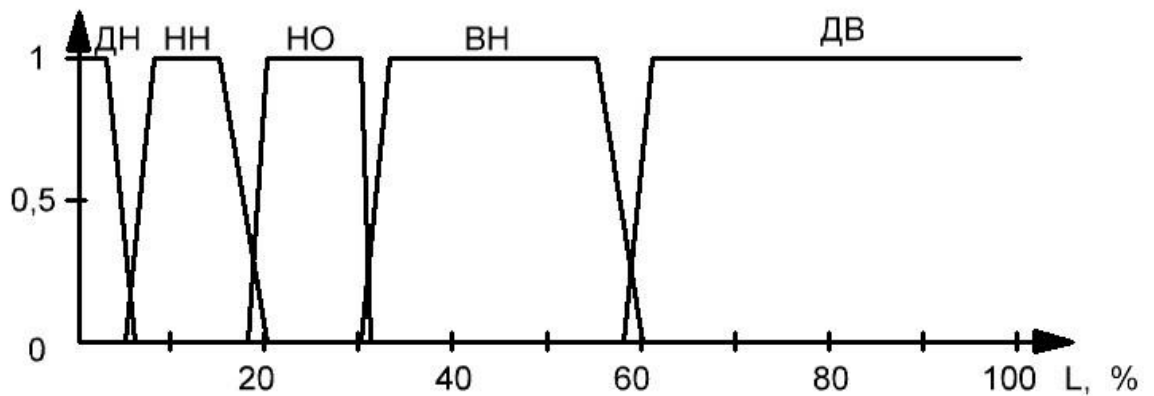


Рис. 15. функція належності для рівня у першому корпусі випарної установки.

Нечіткі змінні записують у вигляді $\langle a, X, A \rangle$, де

a - найменування змінної, для випарної установки це може бути «температура у першому корпусі»

X - універсальна множина (область визначення a), $X = [132, 138]$ ($^{\circ}\text{C}$);

A - нечітка множина на X , що описує обмеження (тобто $m A(x)$) на значення нечіткої змінної a .

Лінгвістичні змінні відображаються у вигляді $\langle b, T, X, G, M \rangle$, де

b - найменування лінгвістичної змінної;

T — множина її значень (терм-множина), що представляють собою імена нечітких змінних, областю визначення, кожної з яких є множина X . Множина T називається базовою терм-множиною лінгвістичної змінної;

G — синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами терм-множини T , зокрема, генерувати нові терми (значення). Множина $TI G(T)$, де $G(T)$ — множина згенерованих термів, називається розширеною терм-множиною лінгвістичної змінної;

M — семантична процедура, що дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичної змінної, утвореною процедурою G , у нечітку змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

Для випарної установки лінгвістична змінна має вигляд:

b – температура у першому корпусі;

T - {«дуже низька температура», «температура нижче норми», «нормальна температура», «температура вище норми», «дуже висока температура»};

X - [132, 138];

G – процедура створення нових термів, використовуються зв'язки «не», «та», «або». Тобто: «температура нижче норми або температура вище норми».

M – розподіл X на нечіткі підмножини. A_1 =«дуже низька температура», A_2 =«температура нижче норми», A_3 =«нормальна температура», A_4 =«температура вище норми», A_5 =«дуже висока температура». А також множин для термів $A_1 \cap A_2$ тощо.

Застосування нечіткої логіки найбільш розповсюджене в контролерах нечіткої логіки [146]. Для опису систем в таких контролерах, на відміну від звичайних контролерів, використовуються не системи диференціальних рівнянь, а експертні дані. Як правило ці дані описуються за допомогою лінгвістичних змінних, які, в свою чергу, описують за допомогою нечітких множин. Нечіткі контролери або регулятори структурно мають наступні складові: блок фазифікації, базу знань, блок рішень та блок дефазифікації. Завданням блоку фазифікації є перетворення чітких величин, які вимірюються на виході об'єкта керування у нечіткі. У базі знань нечіткі величини описуються за допомогою лінгвістичних змінних. Також тут закладено нечіткі продукційні правила.

При розробці регулятора рівня у випарній установці необхідно також провести дефазифікацію. Її можна провести кількома методами: метод центру тяжіння, метод центру площі, метод середнього максимуму [147].

Для побудови нечіткої системи логічного висновку, як зазначалося вище, використовується Fuzzy Logic Toolbox.

У даній роботі використовується алгоритм нечіткого логічного висновку на базі правил – алгоритм Мамдані. Він формується у вигляді набору нечітких правил. Дані правила мають наступний вигляд (20):

П1: якщо $x \in A_1$, тоді $z \in B_1$,

П2: якщо $x \in$, тоді $z \in B_2$, (20)

.....

П_n: якщо $x \in A_n$, тоді $z \in B_n$,

Де x — вхідна змінна(ім'я для відомих значень даних), z — змінна виводу(ім'я для значення даних, яке буде обчислене). A_i та B_i — нечіткі множини, визначені на X та Z відповідно за допомогою функції приналежності та (z).

У структурі нечіткого контролера дані правила містяться у блоці рішень. У блоці рішень відбувається використання нечітких продукційних правил (ЯКЩО, ТО), які попередньо закладено у базу знань. Тут, на базі цих правил, відбувається перетворення нечітких вхідних змінних у вихідні, також нечіткі, впливи [148].

Розглянемо використання алгоритму Мамдані у процесі випарювання за допомогою розробки бази правил для регулювання рівня. Так для першого корпусу розроблено наступну базу правил:

П1: якщо $x \in НО$, тоді $z \in БЗ$, тобто, якщо рівень у корпусі у нормі, то положення регулюючого органу залишається без змін.

П2: якщо $x \in НН$, тоді $z \in ПВ$, якщо рівень нижче норми, то регулюючий орган повинен повільно відкриватись,

П3: якщо $x \in ДН$, тоді $z \in ШВ$, якщо рівень дуже низький, то регулюючий орган має швидко відкриватись,

П4: якщо $x \in ВН$, тоді $z \in ПЗ$, якщо рівень вище норми, то регулюючий орган має повільно закриватись,

П5: якщо $x \in ДВ$, тоді $z \in ШЗ$, якщо рівень дуже високий, то регулюючий орган має швидко закриватись.

При використанні селективного регулювання відбувається плавний вплив на соковий потік. У такому випадку до бази правил необхідно додати ще правила з урахуванням рівня у наступному корпусі:

П1: якщо $x_1 \in ДВ$ та $x_2 \in ДН$, тоді $z \in ШВ$, якщо рівень у першому корпусі дуже високий, а у другому — дуже низький, то регулюючий орган має швидко відкриватись.

П2: якщо $x_1 \in \text{ДН}$ та $x_2 \in \text{ДВ}$, тоді $z \in \text{ШЗ}$, якщо рівень у першому корпусі дуже низький, а у другому – дуже високий, то регулюючий орган має швидко закриватись.

Нечіткі дані з виходу блоку рішень надходять у блок дефазифікації. Тут відбувається їх перетворення у чіткі величини, які і використовуються для керування об'єктом.

Існує єдиний алгоритм роботи всіх систем з використанням нечіткої логіки, а саме: відбувається фазифікація даних, які надходять з вимірювальних приладів, далі вони обробляються блоком рішень і дефазифікуються у звичайні сигнали, які і надходять на виконавчі пристрої.

Метод центру тяжіння розраховується таким чином, що значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

Метод центру площі не можна використовувати, якщо присутні одноточкові множини. У даному методі центр площі дорівнює абсцисі, яка ділить площу, обмежену графіком кривої функції належності відповідної вихідної змінної, на дві рівні частини.

Якщо нечітка множина має кілька модальних значень, то може бути застосовано метод лівого або правого модального значення. При використанні першого методу значення вихідної змінної визначається як мода нечіткої множини для відповідної вихідної змінної або найменша з мод. У випадку застосування методу правих модальних значень вихідна змінна також визначається як мода нечіткої множини для відповідної вихідної змінної або найбільша з мод.

Ще одним методом є метод середнього максимуму. Цей метод передбачає знаходження середнього значення з тих, при яких досягається найбільше значення функції приналежності.

Як вже зазначалося вище, за нечітке виведення у системах відповідає дефазифікатор.

Для даної роботи використовуємо метод центру тяжіння. Це пов'язано з тим, що даний метод є найбільш простим для використання і при цьому дає точний результат.

У математичному вигляді даний алгоритм представляється таким чином:

1. Відбувається виведення нечіткості для заданого значення аргументу X .
2. Проводиться нечітке виведення, тобто, знаходяться рівні відсічення для передумов кожного з правил (21).

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0) \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)\end{aligned}\tag{21}$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності (22):

$$\begin{aligned}C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z))\end{aligned}\tag{22}$$

3. Проводиться об'єднання знайдених усічених функцій (23).

$$M(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z))\tag{23}$$

4. Відбувається приведення до чіткості (24).

$$z_0 = \frac{\int_{\min}^{\max} z * M(z) dz}{\int_{\min}^{\max} M(z) dz}\tag{24}$$

Для побудови нейромережевого регулятора у даній роботі використаємо середовище Matlab.

В Matlab існує сукупність функцій, які містять набір засобів, що дозволяють будувати нечіткі системи. Вони несуть назву Fuzzy logic toolbox. Даний набір функцій дозволяє створювати нечіткі системи безпосередньо у самому середовищі Matlab, а також інтегрувати їх до системи SimuLink, що дозволяє моделювати систему в цілому. Крім того це дозволяє будувати нечітку логіку в середовищі Matlab за допомогою програми, написаної на мові C.

Для побудови нечіткої системи логічного висновку, як зазначалося вище, використовується Fuzzy Logic Toolbox. У даному вікні необхідно задати вхідні та вихідні змінні системи, яку потрібно розробити. Відображення графіків функцій

належності відбувається шляхом вибору необхідних змінних у вікні FIS Variables. У даному вікні присутня можливість зміни функцій належності графіка.

Далі, для коректної роботи системи, розробляється база правил. Бази правил можна створювати з допомогою засобу Rule editor. Введення правил відбувається за допомогою встановлення відповідних значень вхідних і вихідних змінних. Перевірка роботи баз правил відбувається за допомогою вікна VIEW/RULES. Також у вікні RULES/SURFACE можна переглянути відображення поверхні відгуку.

Завдяки тому, що всі дії над нечіткою логікою задаються мінімальним набором функцій, виникає можливість звичайному користувачу задавати таблиці змінних та налаштовувати входи та виходи системи без поглиблених знань нечітких множин. Дефазифікація відбувається за допомогою одного з п'яти методів, який обирає користувач. Також середовище дозволяє виводити на екран поверхні відгуку та схему роботи нечіткої програми.

Для фазифікації та дефазифікації системи нечіткого логічного висновку необхідно використовувати функції належності. У даній роботі оберемо функції належності з найбільш розповсюджених.

У даній роботі використовується два види функцій належності з наведених вище. Для процесу фазифікації використовується гаусівська функція належності, а для дефазифікації – трикутна.

Основними перевагами нечітких систем у процесі випарювання порівняно з іншими є: можливість нечіткої формалізації критеріїв оцінки і порівняння, можливість проведення швидкого моделювання складних динамічних систем, можливість проведення якісних оцінок як вхідних даних, так і виведених результатів, можливість оперувати вхідними даними, заданими нечітко. Ще однією перевагою є можливість об'єднання досвіду одразу кількох експертів. Такий вид регулювання є ефективним у випадках використання дуже складних математичних моделей або якщо вони взагалі відсутні. У разі використання нечітких систем у процесі випарювання ми, власне, і стикаємось із використанням складних математичних моделей. Нечітке регулювання дозволяє легко налаштовувати

систему та переналаштовувати у разі зміни якихось параметрів або, навіть, за необхідності внесення змін до самої математичної моделі.

Головним недоліком є відсутність стандартної методики розрахунку та проектування систем з нечітким регулюванням. Також при збільшенні вхідних змінних збільшується складність розрахунків, а також суттєво збільшуються бази правил, що призводить до труднощів її розробки та сприйняття. У процесі випарювання розробка бази правил може стикатись з труднощами через велику кількість варіантів випарних установок (прямотечійні та протитечії; кількість корпусів, тип регулювання (на притоці, на стоці, селективне) тощо), через що кожна із конфігурацій випарного апарата потребує створення власної бази правил.

2.1.2. Використання нейромережових регуляторів у процесі випарювання

Окрім нечітких регуляторів, у даній роботі використовується і ще один вид інтелектуальних регуляторів – це нейромережові регулятори. Нейромережове регулювання являється частковим випадком інтелектуального регулювання. Даний метод передбачає використання штучних нейронних мереж для вирішення задач керування динамічними об'єктами. Перевагою нейронних мереж є те, що вони мають ряд наступних властивостей: здатність до навчання, здатність до узагальнення даних, адаптування до змін якостей об'єкта керування і зовнішнього середовища, придатність до зміни властивостей об'єкта, здатність синтезу нелінійних регуляторів та висока стійкість до порушення власних елементів.

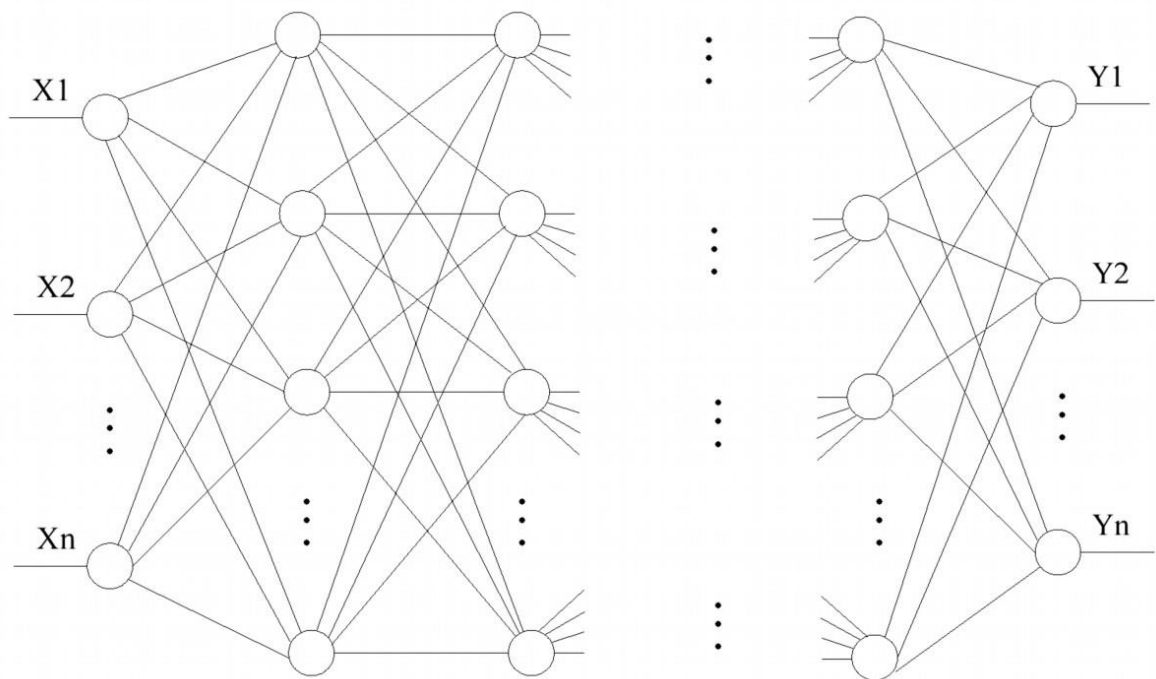


Рис. 16. Структурна схема нейронної мережі регулятора рівня випарної установки ($X_1, X_2 \dots X_n$ – входи нейронної мережі, $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ – виходи нейронної мережі)

Нейромережовий регулятор складається з вхідного, вихідного та одного або декількох слоїв, що знаходяться між ними. Ці слої називаються проміжними або прихованими. Структурна схема нейронної мережі регулятора рівня випарної установки зображена на рис. 16., де X_1-X_n – входи, Y_1-Y_n – виходи. Багатошарові нейронні мережі мають більше можливостей, ніж одношарові.

У даній роботі широко застосовується метод прогнозуючого модельного регулювання. Для відтворення даного методу використовується середовище Matlab. В середовищі Matlab наявний пакет програм для роботи з нейронними мережами під назвою Neural Network Toolbox. Для побудови нейромережевого регулятора використовуємо принцип нелінійного предективного керування, тому використовуємо контролер з передбаченням NN Predictive Control. Для синтезу регулятора в меню налаштувань даного контролера обирається спеціально створений в системі SIMULINK файл, призначений для цієї мети.

Дані для роботи нейронної мережі були отримані на виробництві з репрезентативної вибірки, яка була створена експертами на основі обробки даних систем з класичними регуляторами.

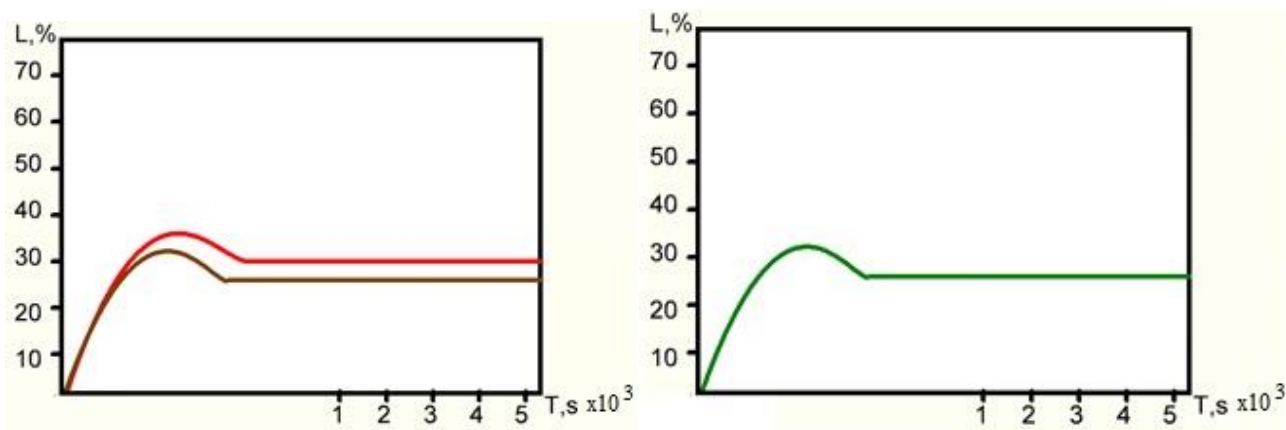


Рис. 17. Перехідний процес регулювання рівня у першому корпусі випарної установки з використанням різної кількості шарів нейронної мережі (— 15 шарів нейронної мережі, — 20 шарів нейронної мережі, — 30 шарів нейронної мережі)

Експериментальним шляхом було обрано регулятор з кількістю шарів нейронної мережі 20. Як видно з рис. 17. при меншій кількості шарів – збільшується статична похибка та час регулювання. При збільшенні кількості шарів – зміни відсутні.

Використання нейромережевих систем у процесі випарювання несе ряд переваг. Нейромережеві моделі об'єктів управління являються точнішими за моделі зі звичайними класичними регуляторами. Це найбільш помітно зі

зростанням складності математичних моделей об'єктів. Крім того, нейромережеві системи дозволяють синтезувати якісні системи автоматизації об'єктами з розподіленими параметрами та нестаціонарними об'єктами. Також застосування нейромережевих регуляторів дозволяє у різних режимах моделювати динаміку об'єкта в екстремальному режимі. Ще однією перевагою є те, що нейронні мережі досить швидко навчаються. Крім того нейронні можуть не потребувати точних моделей об'єкта, а можуть бути побудовані з особистого досвіду користувача. Перевагою нейромережевих систем у процесі випарювання над нечіткими є те, що такі системи легше адаптувати до різних конфігурацій випарних апаратів.

Але у таких системах наявні і недоліки. Такі системи можуть потребувати уточнень алгоритму синтезу регулятора за допомогою нейромережевої моделі об'єкта. Крім того, зв'язки між підбором вагових коефіцієнтів можуть просліджуватись недостатньо. Також, у порівнянні з нечіткими системами нейромережеві важче адаптувати до змін у математичній моделі під час розробки системи автоматизації випарної установки. Ще розробка нейромережевих систем іноді вимагає спеціальних знань у користувача.

Ряд проблем може викликати навчання нейронної мережі. Це можуть бути такі проблеми, як необхідність визначення найбільш інформативних методів ідентифікації.

2.2. Розробка модулів з дослідними регуляторами

2.2.1. Розробка структури експертної системи

Задачею є створення підсистеми оцінки якості, що має десять входів і формує на основі оцінки відповідне логічне рішення. Приймаємо три вхідні змінні:

delX1-delX5: [-1 1] – ланки підсилення по каналах управління;

IntX1-IntX5: [-1 1] – інтегральні ланки по каналах управління;

Вихідні змінні:

Y1-Y5: [-1 1] – положення РО.

Лінгвістична змінна для процесу випарювання наведено у пункті 2.1. Крім технологічних параметрів в якості лінгвістичних змінних можна використовувати і параметри налаштування нечіткого регулятора. Таку лінгвістичну змінну для регулятора рівня зображено на рис. 18.

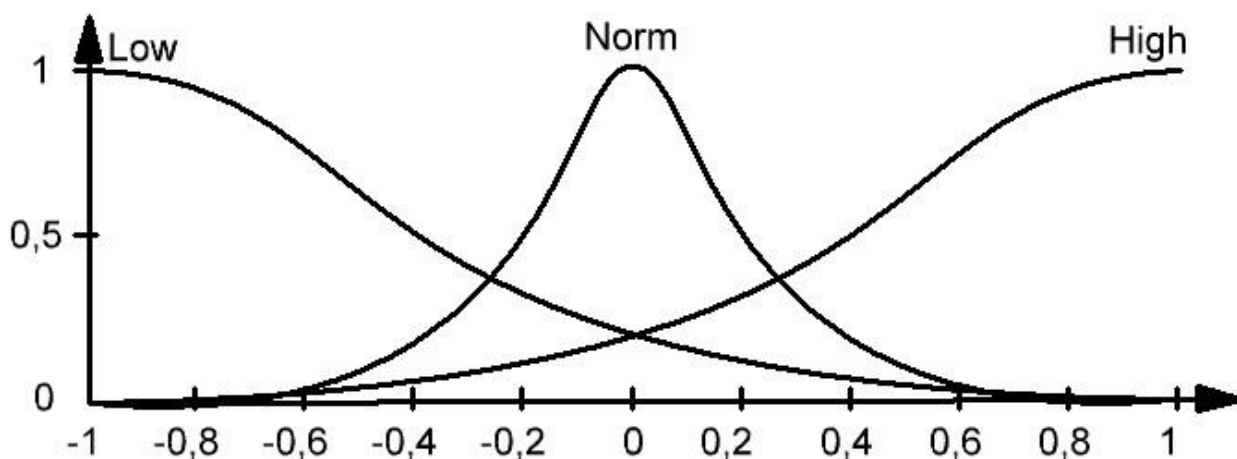


Рис. 18. Налаштування регулятора рівня за допомогою лінгвістичних змінних.

З даного рисунку можна побачити, що лінгвістична змінна, яка відповідає за пропорційну складову П-регулятора delX1 може приймати значення Norm – норма, Low – низьке, High – високе.

За допомогою програмного середовища MATLAB та вбудованої функції FIS Editor Fuzzy Logic Toolbox створюємо прийняті вхідні та вихідні змінні. Кожній змінній відредагуємо функції належності (Рис. 19.). У меню Edit та обраємо пункт

підменю Add MFs... – додати необхідні типи (MF type) та кількість (Number of MFs) функцій належності.

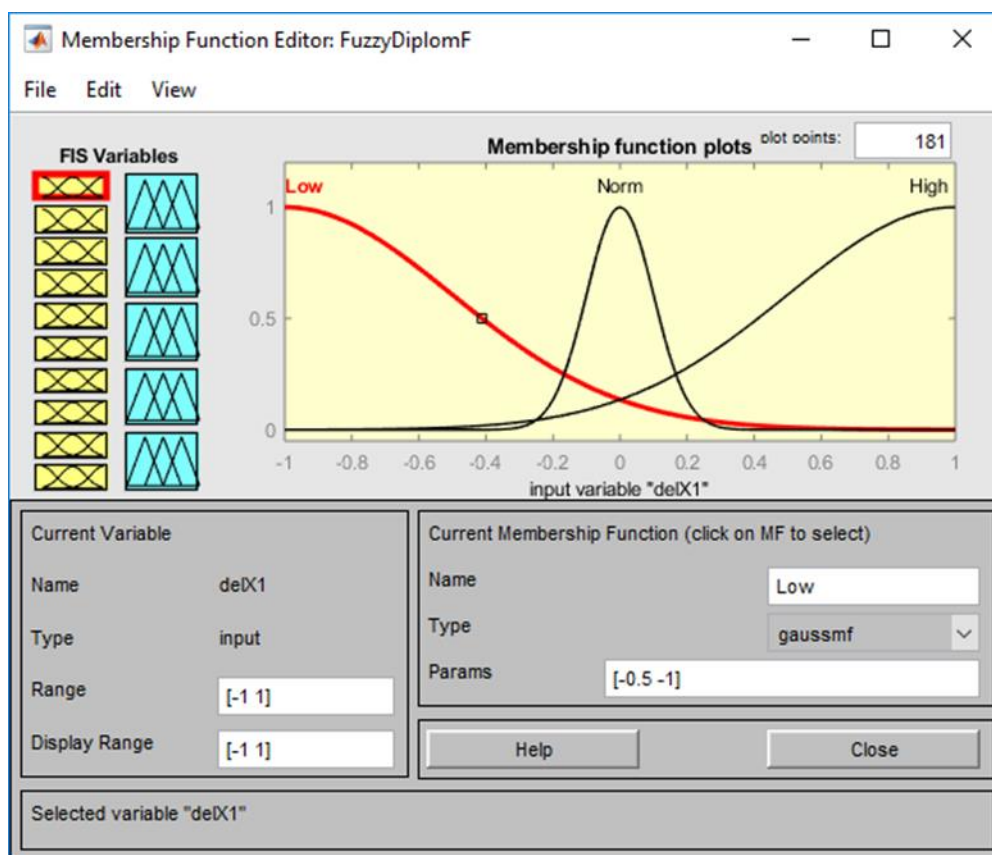


Рис. 19. Реалізація налаштування нечіткого регулювання у MatLab.

У вікні Member Function Editor налаштовуємо параметри кожної функції належності.

В зоні параметрів Current Variable параметри Range (ряд) і Display Range (ряд, що відображається) – задаємо діапазони змінних.

В зоні параметрів Current Membership Function є можливість змінити назву лінгвістичної змінної в полі Name, тип функції належності Type і параметри в полі Params

2.2.2. Розробка бази правил для нечіткої системи

Дані для розробки бази правил для нечіткої системи були отримані на виробництві були отримані бази знань з систем автоматизації з Шамраївського та Жданівського цукрових заводів, а також доповнювались відповідно до алгоритмів роботи селективного регулювання (рис. 7 та рис. 8).

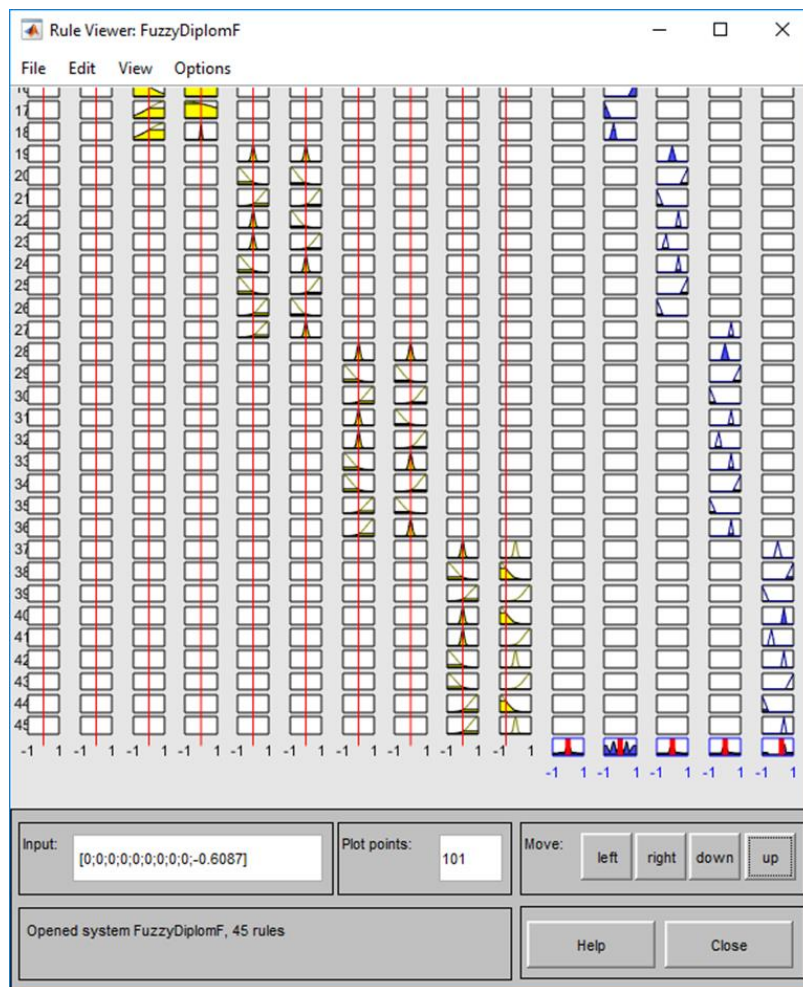


Рис. 20. Перегляд результату роботи системи нечіткої логіки

Як уже зазначалося вище, база правил розробляється на основі експертних даних. Правила для значення тиску у першому корпусі мають вигляд:

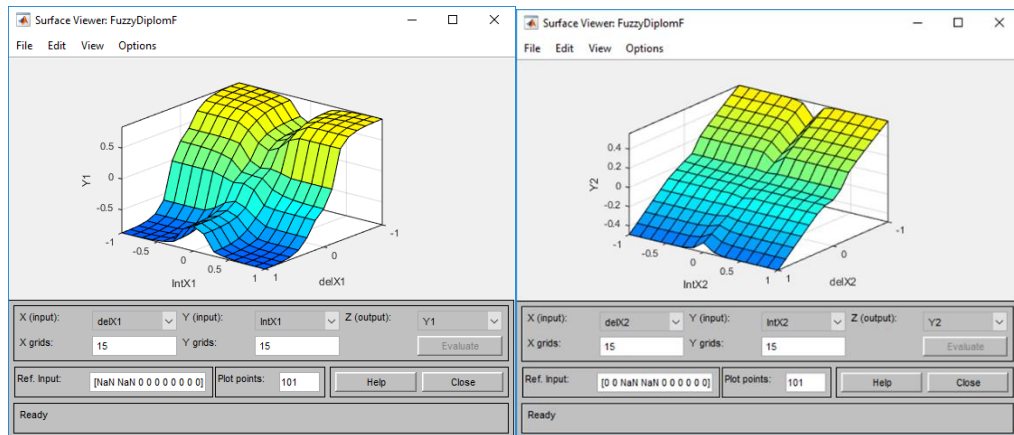
П1: якщо $x \in \text{НО}$, тоді $z \in \text{БЗ}$, тобто, якщо тиск у корпусі у нормі, то положення регулюючого органу залишається без змін.

П2: якщо $x \in \text{НН}$, тоді $z \in \text{ПВ}$, якщо тиск нижче норми, то регулюючий орган повинен повільно відкриватись,

ПЗ: якщо $x \in \text{ДН}$, тоді $z \in \text{ШВ}$, якщо тиск дуже низький, то регулюючий орган має швидко відкриватись,

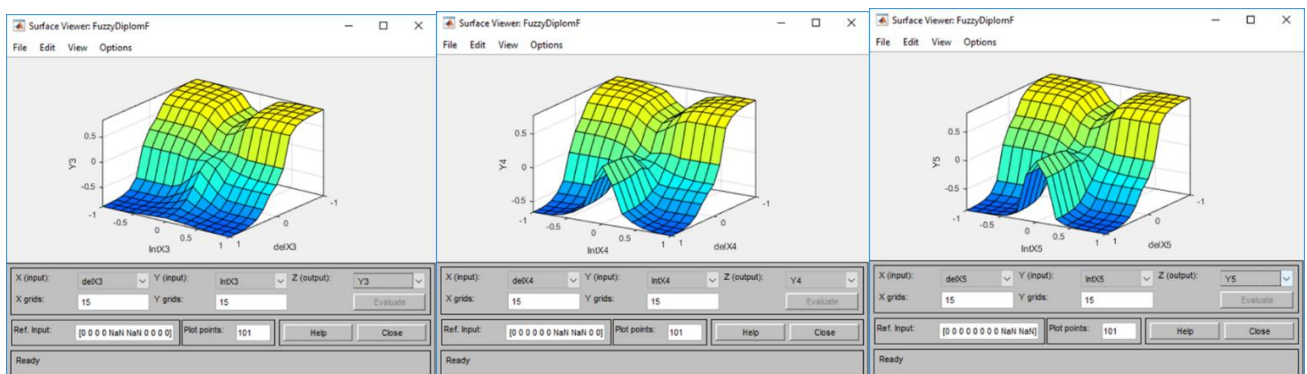
П4: якщо $x \in \text{ВН}$, тоді $z \in \text{ПЗ}$, якщо тиск вище норми, то регулюючий орган має повільно закриватись,

П5: якщо $x \in \text{ДВ}$, тоді $z \in \text{ШЗ}$, якщо тиск дуже високий, то регулюючий орган має швидко закриватись.



а)

б)



в)

г)

д)

Рис. 21. Вікно відображення поверхонь відгуку залежності по каналах X1-X5: а) канал X1; б) канал X2; в) канал X3; г) канал X4; д) канал X5.

2.2.3. Математичне моделювання п'ятикорпусної випарної установки

Розглянемо вже існуючі математичні моделі випарної установки. Над розробками математичних моделей працювали такі вчені, як Луцька Н.М., Власенко Л.О., Школьна О.В. Користуючись розробленими математичними моделями було розроблено нову. Розроблена модель дозволяє синтезувати та аналізувати автоматичну систему керування для підприємства. Ця модель характеризує динамічну продуктивність процесу випарювання у випарному апараті.

Часто так трапляється, що в математичних моделях [131] випарних установок не можна чітко виділити канали збурення та керування, що призводить до незручностей при розробці систем автоматизації (рис. 22) .

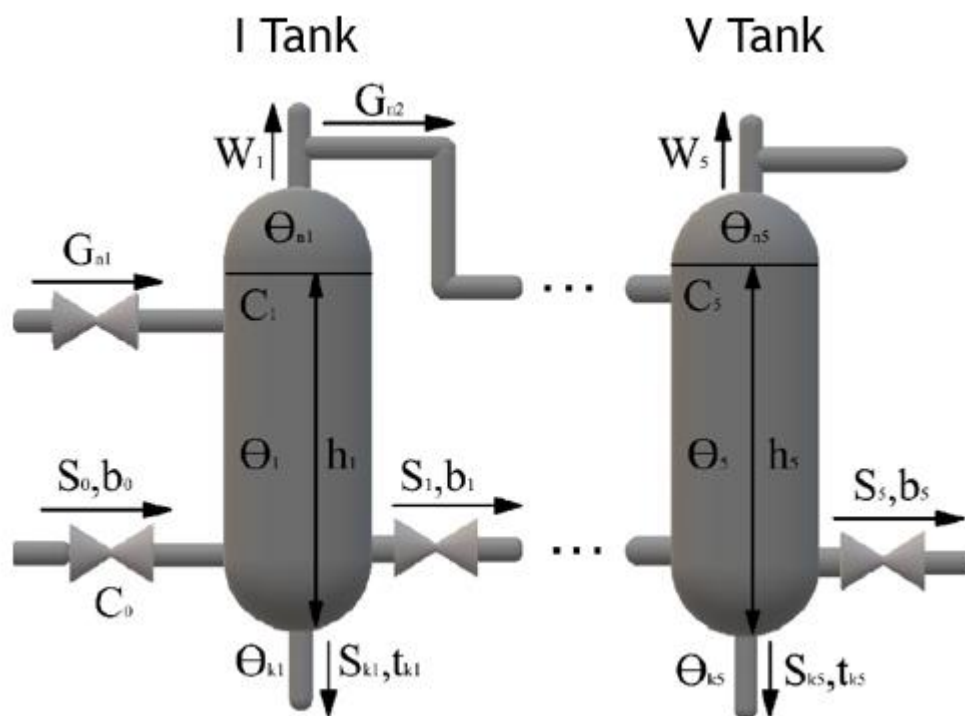


Рис. 22. Технологічна схема п'ятикорпусної ВУ

Θ_i — температура киплячого соку в i -тому корпусі ВУ [$^{\circ}\text{C}$]; $i = 0 \dots 5$ — відповідає номеру корпусу ВУ; Θ_{ni} — температура пари в i -тому корпусі ВУ [$^{\circ}\text{C}$]; h_i — рівень сиропу відповідно в i -тому корпусі ВУ [м, % до довжини трубок поверхні нагріву]; $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ — приток соку в I корпус, виток сиропу з I корпусу і приток в II корпус, виток з II корпусу і приток в III корпус, виток з III корпусу і

приток в IV корпус, виток з IV корпусу і приток в V корпус, виток з V корпусу відповідно [кг/с]; W_i — витрата пари, що утворюється в i -тому корпусі ВУ [кг/с]; G_{ni} — витрата пари, що гріє в i -тому корпусі ВУ [кг/с]; b_i — концентрація сухих речовин в i -тому корпусі ВУ [%]; S_{ki} — витрата конденсату в i -тому корпусі ВУ [кг/с]; Θ_{ki} — температура конденсату в i -тому корпусі ВУ [°C]; C_i — вміст цукрози в сиропі в i -тому корпусі ВУ [%].

Для розробки математичної моделі п'ятикорпусної випарної установки було прийнято наступні припущення [28]:

- усі корпуси установки будемо вважати як об'єкти із зосередженими параметрами;
- вважається, що кількість конденсату по корпусах відповідно рівна кількості пари по корпусах;
- вважається, що пара насичена і нерухома;
- будемо вважати, що цукор у вторинну пару не потрапляє;
- за сталу величину будемо приймати коефіцієнт теплопередачі випарного апарата протягом двох годин
- сума об'ємів рідини у трубах та об'ємів підтрубного простору є загальним об'ємом рідини у апараті.

Дану систему необхідно розділити на кілька підсистем, які об'єднані між змінними суттєвими внутрішніми взаємозв'язками, які можна описати схожими за структурою математичними моделями, які можна регулювати за подібною схемою.

Спрощена параметрична схема випарної установки [130], з виділеними підсистемами зображена на рис. 23.

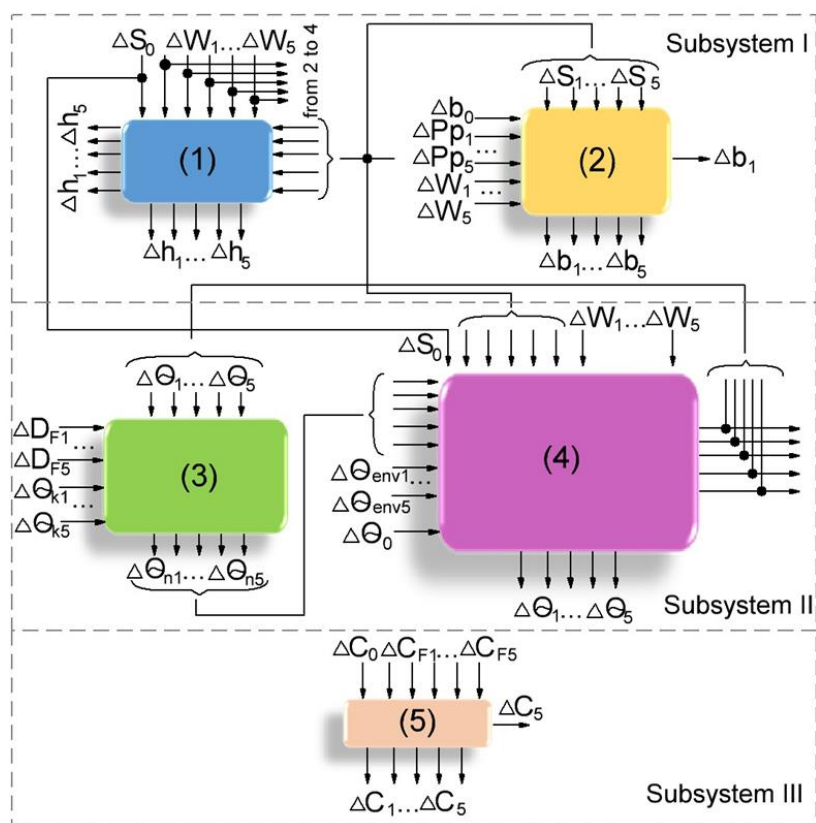


Рис. 23. Параметрична схема випарної установки

Отримані підсистеми можна описати наступними рівняннями (25-28):

підсистема I

$$\begin{cases} 4,389 \frac{d(\Delta h_1)}{dt} = \Delta S_0 - \Delta S_1 - \Delta W_1, \\ 6,823 \frac{d(\Delta h_2)}{dt} = \Delta S_1 - \Delta S_2 - \Delta W_2, \\ 5,061 \frac{d(\Delta h_3)}{dt} = \Delta S_2 - \Delta S_3 - \Delta W_3, \\ 4,971 \frac{d(\Delta h_4)}{dt} = \Delta S_3 - \Delta S_4 - \Delta W_4, \\ 3,975 \frac{d(\Delta h_5)}{dt} = \Delta S_4 - \Delta S_5 - \Delta W_5. \end{cases} \quad (25)$$

рівняння, що описують рівні у корпусах випарної установки.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,187 \frac{d(\Delta b_1)}{dt} + \Delta b_1 = -0,2\Delta S_0 + 1,38\Delta b_0 + 0,72\Delta W_1 - 0,04\Delta Pp_1, \\ 0,589 \frac{d(\Delta b_2)}{dt} + \Delta b_2 = 0,8\Delta S_1 + 1,67\Delta b_1 + 2\Delta W_2 - 0,066\Delta Pp_2, \\ 0,655 \frac{d(\Delta b_3)}{dt} + \Delta b_3 = -1,5\Delta S_2 + 1,5\Delta b_2 + 4,49\Delta W_3 - 0,1\Delta Pp_3, \\ 0,1131 \frac{d(\Delta b_4)}{dt} + \Delta b_4 = -1,67\Delta S_3 + 1,29\Delta b_3 + 7,46\Delta W_4 - 0,13\Delta Pp_4, \\ 0,853 \frac{d(\Delta b_5)}{dt} + \Delta b_5 = -1,01\Delta S_4 + 1,12\Delta b_4 + 9,37\Delta W_5 - 0,14\Delta Pp_5. \end{array} \right. \quad (26)$$

рівняння, що описують концентрації у корпусах випарної установки., де

ΔPp_i — втрати цукру при термічному розкладі в і-му апараті;

підсистема II:

$$\left\{ \begin{array}{l} 7,07 \frac{d(\Delta \Theta_{n1})}{dt} + \Delta \Theta_{n1} = 0,7229\Delta G_{n1} + \Delta \Theta_1 - 0,0146\Delta \Theta_{k1} - \\ \quad - 0,9251\Delta D_{F1}, \\ 9,025 \frac{d(\Delta \Theta_{n2})}{dt} + \Delta \Theta_{n2} = \Delta \Theta_2 - 0,076\Delta \Theta_{k2} - 0,851\Delta D_{F2}, \\ 8,04 \frac{d(\Delta \Theta_{n3})}{dt} + \Delta \Theta_{n3} = \Delta \Theta_3 - 0,0153\Delta \Theta_{k3} - 1,3\Delta D_{F3}, \\ 13,19 \frac{d(\Delta \Theta_4)}{dt} + \Delta \Theta_{n4} = \Delta \Theta_4 - 0,0138\Delta \Theta_{k4} - 2,1445\Delta D_{F4}, \\ 14,28 \frac{d(\Delta \Theta_5)}{dt} + \Delta \Theta_{n5} = \Delta \Theta_5 - 0,094\Delta \Theta_{k5} - 4,4\Delta D_{F5}. \end{array} \right. \quad (27)$$

рівняння, що описують температуру пари у корпусах випарної установки, де

Dfi — витрата несконденсованих газів в і-му апараті.

$$\left\{ \begin{array}{l} 13,89 \frac{d(\Delta \Theta_1)}{dt} + \Delta \Theta_1 = 0,1868\Delta S_0 + 0,0482\Delta \Theta_0 + 0,9999\Delta \Theta_{n1} + \\ \quad + 6,50 \cdot 10^{-6}\Delta \Theta_{env1} - 0,1792\Delta S_1 - 0,9251\Delta W_1, \\ 21,78 \frac{d(\Delta \Theta_2)}{dt} + \Delta \Theta_2 = 0,1620\Delta S_1 + 0,0315\Delta \Theta_1 + 0,9826\Delta \Theta_{n2} + \\ \quad + 8,42 \cdot 10^{-6}\Delta \Theta_{env2} - 0,1394\Delta S_2 - 0,8362\Delta W_2, \\ 22,50 \frac{d(\Delta \Theta_3)}{dt} + \Delta \Theta_3 = 0,2136\Delta S_2 + 0,0266\Delta \Theta_2 + 0,9839\Delta \Theta_{n3} + \\ \quad + 8,98 \cdot 10^{-6}\Delta \Theta_{env3} - 0,1794\Delta S_3 - 1,28\Delta W_3, \\ 35,97 \frac{d(\Delta \Theta_4)}{dt} + \Delta \Theta_4 = 0,2948\Delta S_3 + 0,0264\Delta \Theta_3 + 0,9815\Delta \Theta_{n4} + \\ \quad + 1,45 \cdot 10^{-6}\Delta \Theta_{env4} - 0,242\Delta S_4 - 2,1\Delta W_4, \\ 45,10 \frac{d(\Delta \Theta_5)}{dt} + \Delta \Theta_5 = 0,4905\Delta S_4 + 0,0374\Delta \Theta_4 + 0,9704\Delta \Theta_{n5} + \\ \quad + 2,58 \cdot 10^{-6}\Delta \Theta_{env5} - 0,386\Delta S_5 - 4,26\Delta W_5. \end{array} \right. \quad (28)$$

рівняння, що описують температуру паросокової суміші у корпусах випарної установки, де $\Theta_{\text{навкі}}$ - втрати теплоти в навколишнє середовище в i -тому апараті [$^{\circ}\text{C}$].

Перевага отриманої моделі полягає у тому, що її використання дозволяє значно зменшити час регулювання при використанні систем з класичними та систем з інтелектуальними регуляторами.

Розроблена модель дозволяє синтезувати та аналізувати автоматичну систему керування для підприємства. Вказана модель дозволяє характеризувати динамічну продуктивність процесу випарювання у випарній установці.

Далі отриману модель необхідно перевести у простір змінних стану. З цією метою спочатку необхідно, на основі отриманої моделі, за формулою (29) записати вектори для $x(t)$, $u(t)$, $w(t)$ [130].

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Fw(t), \\ y(t) &= Cx(t).\end{aligned}\tag{29}$$

А стаціонарний зворотній (30) зв'язок матиме вигляд [131]:

$$u(t) = -Kx(t)\tag{30}$$

де $\mathbf{K}$ – матриця розмірності $m \times n$.

Тоді рівняння об'єкта можна записати у наступному вигляді (31):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BKx(t) = [A - BK]x(t)\tag{31}$$

Далі використовуємо середовище MATLAB.

Вводимо матриці A (32), B (33), C (34), D (35), F (36) [130].

$$A = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}\tag{32}$$

$$B = \begin{vmatrix} -0.2277 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1466 & -0.1466 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1978 & -0.1978 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2011 & -0.2011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2534 & -0.2534 \end{vmatrix} \quad (33)$$

$$C = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (34)$$

$$D = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (35)$$

$$F = \begin{vmatrix} 0.2277 & -0.2277 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1466 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1978 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2011 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2534 \end{vmatrix} \quad (36)$$

Дійсна частина дорівнює нулю. Звідси можна зробити висновок, що корені на уявній осі даного об'єкта є на межі стійкості [131].

```
>> Nk=ctrb(A,B)
```

```
>> rank(Nk)
```

```
ans =
```

```
5
```

Рис. 24. Вбудована функція rank

Матрицю спостережності N_k можна побудувати скориставшись функцією `ctrb`, вхідними параметрами якої виступають матриці A та B . За допомогою вбудованої функції `rank` (Рис. 24.) можна визначити ранг матриці N_k .

Отже, об'єкт повністю спостережний. Це впливає з того, що ранг матриці збігається з розмірністю просторів стану [130].

Далі необхідно розрахувати матрицю підсилення регулятора K . Це можна зробити за алгоритмом модального регулятора. Даний алгоритм виконує функція `place` бібліотеки Matlab (рис. 54.). Побудувати корені замкненої системи дозволяє функція `pzmap` (Рис. 26-37.).

```
>> p1=3/10000

p1 =

    3.0000e-04

>> p2=3/5000

p2 =

    6.0000e-04

>> p3=3/2000

p3 =

    0.0015
```

Рис. 25. Вбудована функція `place`

```
>> A_sys10000=A-B*K10000

A_sys10000 =

    1.0e-03 *

    0.3000    -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000
    0.0000    0.3000   -0.0000   -0.0000   -0.0000
    0.0000    0.0000    0.3000   -0.0000   -0.0000
   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.3000    0.0000
   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000    0.3000

>> sys=ss(A_sys10000,[B F],c,zeros(5,11))

>> pzmap(sys)
```

Рис. 26. Вбудована функція `ss` для $T=10000$

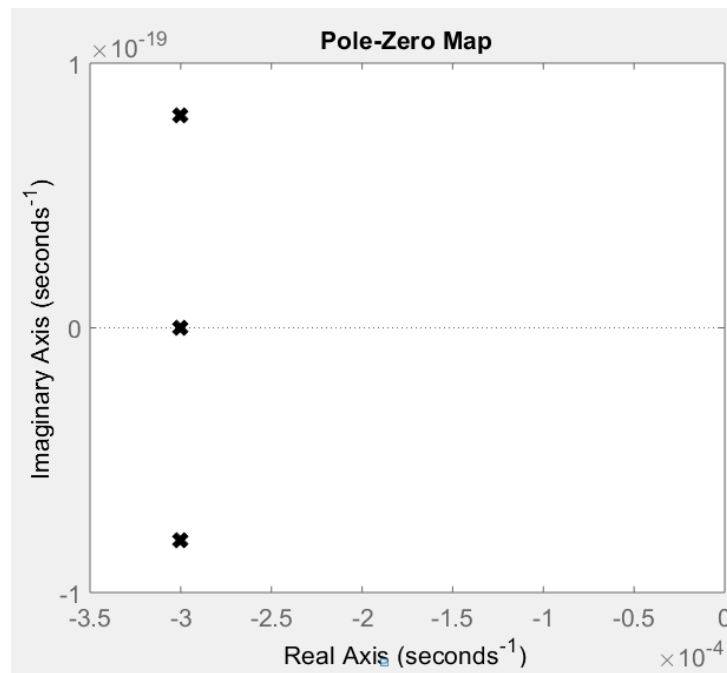


Рис. 27. Pole-zero map для $T=10000$

З рис. 27. видно, що замкнена система є стійкою. Такий висновок можна зробити з того, що полюси розміщуються у лівій півплощині комплексної площини [131].

2.2.4. Розробка математичної моделі п'ятикорпусної випарної установки

На рис. 28. зображено структуру моделі п'ятикорпусної випарної установки з нечітким регулятором.

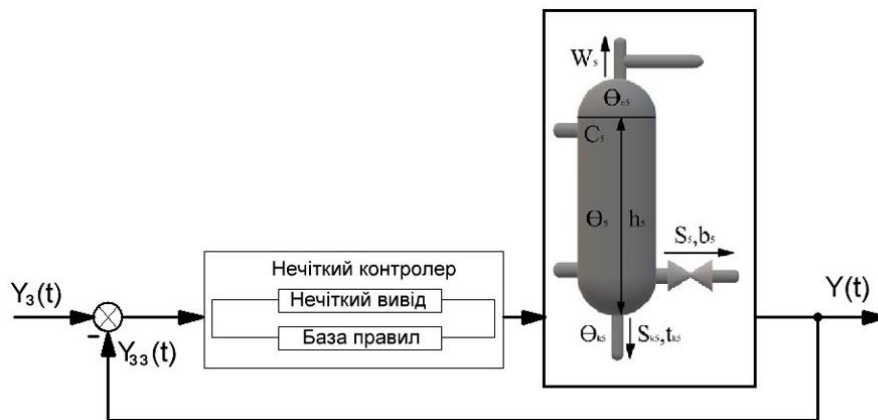


Рис. 28. Структура моделі п'ятикорпусної випарної установки з нечітким регулятором

Структуру моделі з використанням неймережевого регулятора зображено на рис. 29.

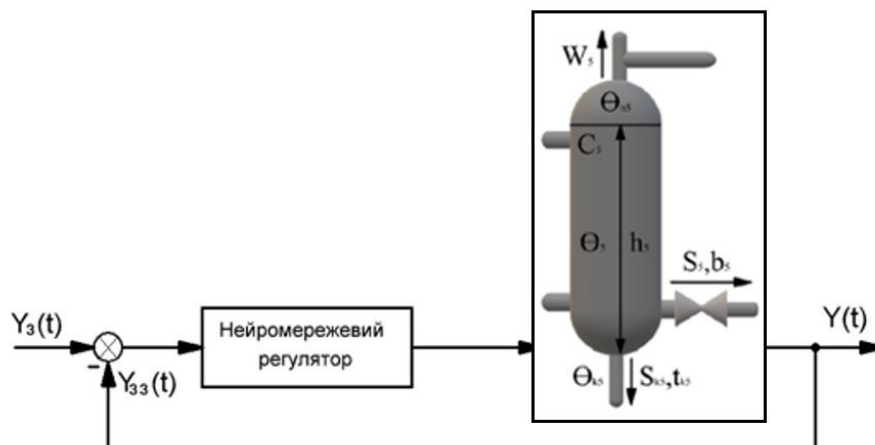


Рис. 29. Структура моделі з неймережевим регулятором ($Y_3(t)$ – сигнал завдання, $Y(t)$ – вихідний сигнал, $Y_{33}(t)$ – сигнал зворотного зв'язку).

Як видно з рис. 29., структура системи з неймережевим регулятором схожа на структуру системи з класичним регулятором. Єдиною відмінністю є використання, замість класичних регуляторів, неймережевого регулятора, який навчений за допомогою еталонної моделі. Отже, можна зробити висновок, що така

структура є підходящою для роботи моделі системи з нейромережевим регулятором.

Дані для роботи нейронної мережі були отримані на виробництві з репрезентативної вибірки, яка була створена експертами на основі обробки даних систем з класичними регуляторами.

Для фільтрації даних експериментального дослідження вибірки було обрано метод простої ковзної середньої (SMA) [149]. Даний метод полягає у перетворенні часових рядів в ряди залежних оцінок (значень) за формулою (37).

$$\hat{h}_i = \frac{1}{w} \sum_{j=i-m}^{i+m} z_j \quad (37)$$

де $\hat{h}_i$ - ковзне середнє;

w – розмір вікна згладжування;

j – порядковий номер вікна згладжування;

i – порядковий номер елемента;

z – число ординат;

m=(w-1)/2.

Часто можуть виникати випадки під час проведення досліджень в режимі реального часу, коли виникає необхідність розрахунку ковзного середнього для останньої точки, а не для середньої. Тоді формула для розрахунку матиме вигляд (38).

$$\hat{h}_i = \frac{1}{w} \sum_{j=i-w}^i z_j \quad (38)$$

Існує рекурентна формула (39), метою якої є спрощення обчислень.

$$\hat{h}_i = \hat{h}_{i-1} + \frac{1}{w} (z_i - z_{i-w}) \quad (39)$$

Більш детально з роботою даного алгоритму фільтрації можна ознайомитись у дослідженні [149].

Для навчання нейронної мережі використовувався метод зворотного поширення помилки.

Для того, щоб зберегти змінні, якими характеризується регульована продуктивність системи в одній точці експлуатації, необхідно лінеаризувати модель навколо точки рівноваги. Характер моделювання встановлюють відповідно до реального процесу та виконують у середовищі MatLab.

Після моделювання, оброблюючи результати, можна зробити висновок, що модель є прийнятною. Дана система базується на алгоритмі П регулювання і дозволяє контролювати: рівень в кожному випарному апараті, температуру в п'ятому корпусі.

Така модель дозволяє досліджувати наступні речі: витрата пари, різниця тиску між випарними апаратами, зміна щільності. Також необхідно шукати переваги, які дозволяють реалізувати більш просунуті стратегії контролю, такі як адаптивний контроль, прогнозний контроль на основі моделі.

На Рис. 30. зображено математичну модель процесу регулювання рівня з класичним регулятором.

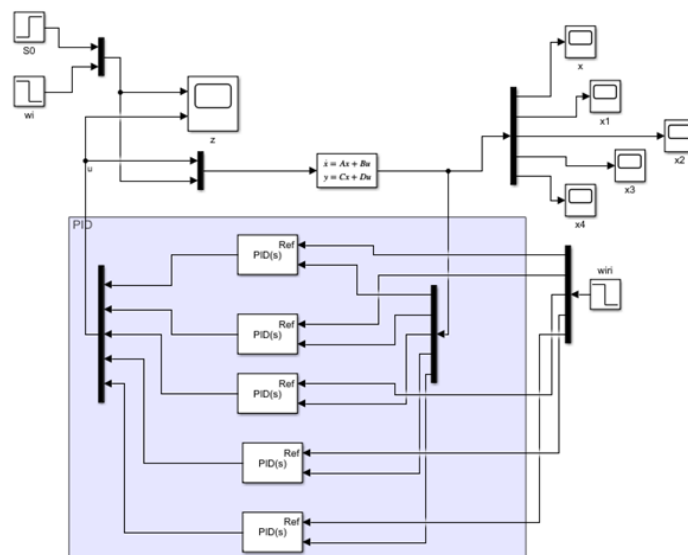


Рис. 30. Математична модель з класичним регулятором

На Рис. 31. зображені перехідні процеси для кожного контуру регулювання рівня (X1 – рівень у першому корпусі, X2 – рівень у другому корпусі, X3 – рівень у третьому корпусі, X4 – рівень у четвертому корпусі, X5 – рівень у п'ятому корпусі).

Для рівня у першому корпусі було задано значення 25%, отримано – 26%, статична похибка 1%; для рівня у другому корпусі було задано значення 35%, отримано – 36%, статична похибка 1%; для рівня у третьому корпусі було задано значення 45%, отримано – 46%, статична похибка 1%; для рівня у четвертому корпусі було задано значення 55%, отримано – 56%, статична похибка 1%; для рівня у п'ятому корпусі було задано значення 65%, отримано – 67%, статична похибка 2%.

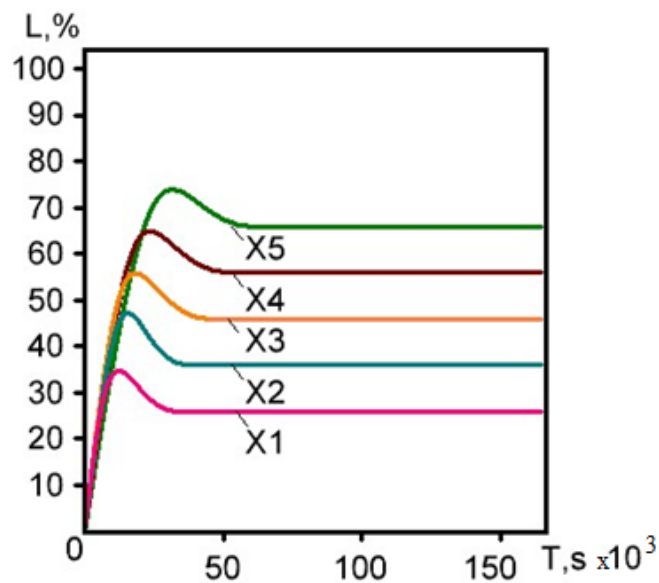


Рис. 31. Перехідні процеси для кожного контуру регулювання рівнів.

На Рис. 32. зображено математичну модель регулювання рівня з нейромережевим регулятором.

На Рис. 33. зображені перехідні процеси для кожного контуру регулювання рівня (X1 – рівень у першому корпусі, X2 – рівень у другому корпусі, X3 – рівень у третьому корпусі, X4 – рівень у четвертому корпусі, X5 – рівень у п'ятому корпусі). Для рівня у першому корпусі було задано значення 25%, отримано – 26%, статична похибка 1%; для рівня у другому корпусі було задано значення 35%, отримано – 36%, статична похибка 1%; для рівня у третьому корпусі було задано значення 45%, отримано – 46%, статична похибка 1%; для рівня у четвертому корпусі було задано значення 55%, отримано – 56%, статична похибка 1%; для рівня у п'ятому корпусі було задано значення 65%, отримано – 67%, статична похибка 2%.

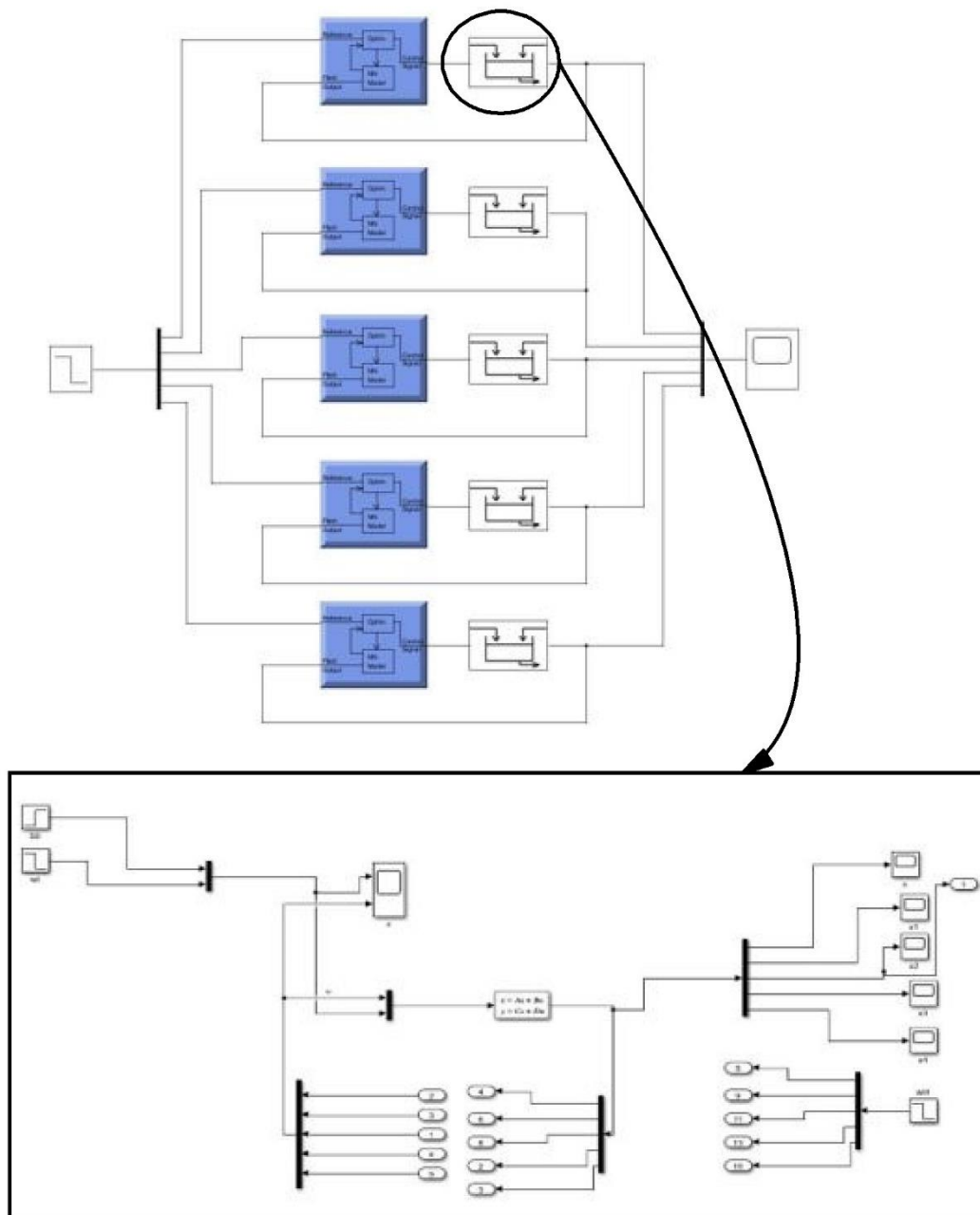


Рис. 32. Математична модель регулювання рівня з нейромережевим регулятором.

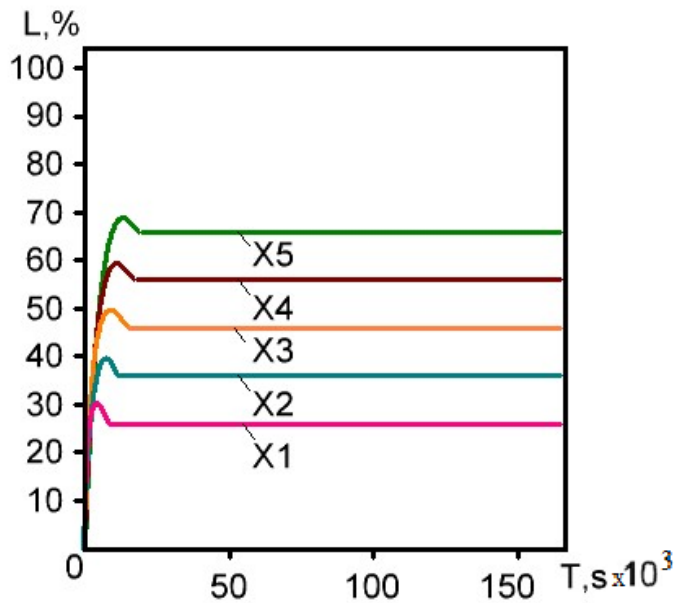


Рис. 33. Перехідні процеси для кожного контуру регулювання рівнів.

На Рис. 34. зображено математичну модель регулювання рівнів з нечітким регулятором.

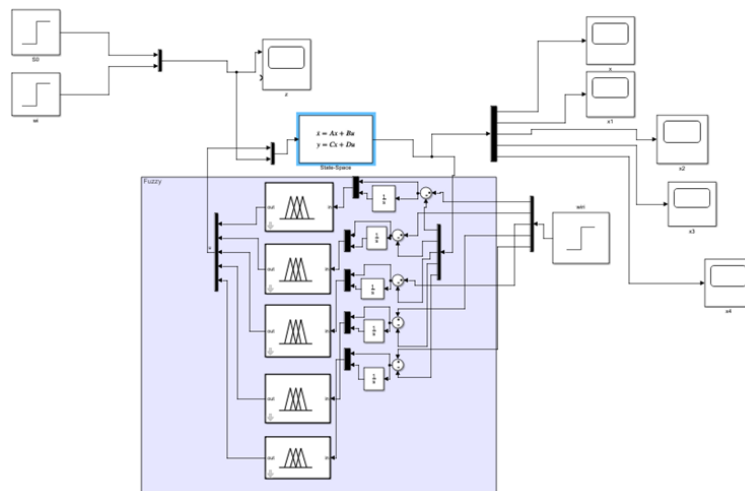


Рис. 34. Математична модель регулювання рівня з нечітким регулятором.

На Рис. 35. зображені перехідні процеси для кожного контуру регулювання (X1 – рівень у першому корпусі, X2 – рівень у другому корпусі, X3 – рівень у третьому корпусі, X4 – рівень у четвертому корпусі, X5 – рівень у п'ятому корпусі). Для рівня у першому корпусі було задано значення 25%, отримано – 25%, статична похибка 0; для рівня у другому корпусі було задано значення 35%, отримано – 35%, статична похибка 0; для рівня у третьому корпусі було задано значення 45%,

отримано – 45%, статична похибка 0; для рівня у четвертому корпусі було задано значення 55%, отримано – 55%, статична похибка 0; для рівня у п'ятому корпусі було задано значення 65%, отримано – 65%, статична похибка 0.

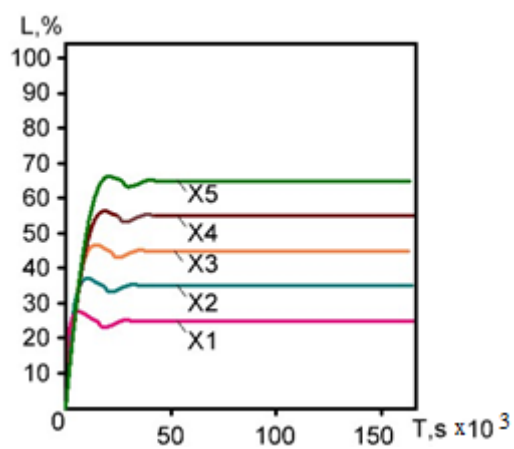


Рис. 35. Перехідні процеси для кожного контуру регулювання рівнів.

2.3. Результати моделювання роботи досліджуваних регуляторів

На рис. 36. зображено порівняння результатів регулювання рівня за допомогою класичних П-регуляторів (X1), нейромережевих регуляторів (X2) та нечітких регуляторів (X3).

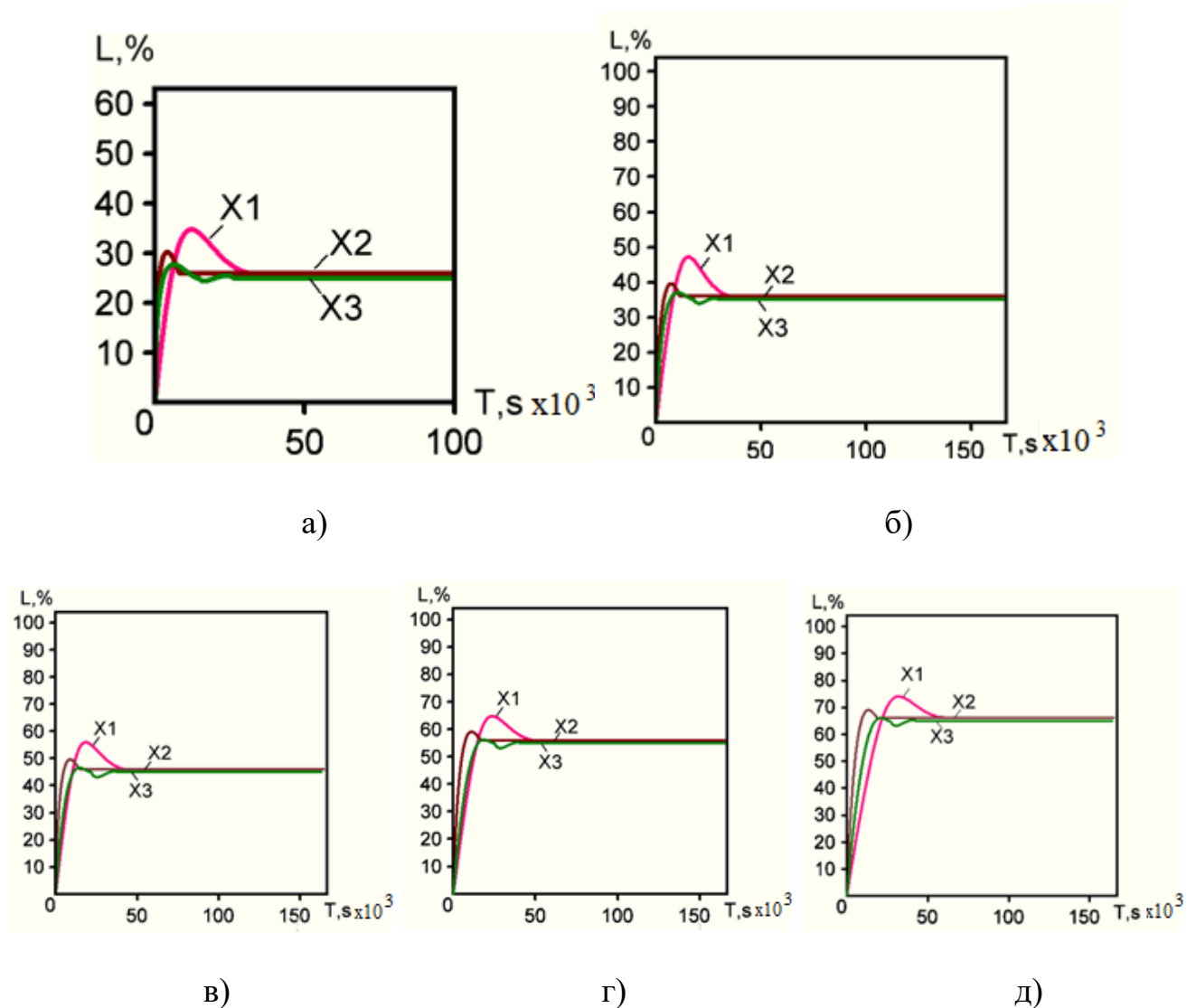


Рис. 36. Порівняння результатів регулювання рівня у корпусах випарної установки: а) у першому корпусі; б) у другому корпусі; в) у третьому корпусі; г) у четвертому корпусі; д) у п'ятому корпусі.

Порівнюючи наведені вище рисунки можна зробити висновок, що при використанні нейромережевих регуляторів (X2) значно зменшується час регулювання порівняно з використанням класичних (X1) та нечітких (X3).

регуляторів. Проте використання нечітких регуляторів (X2) забезпечує меншу амплітуду коливання, ніж використання класичних та нейромережевих регуляторів та дозволяє позбутися статичної похибки.

Окрім перевірки точності моделі також необхідно провести перевірку її адекватності. Це дозволяє оцінити наскільки якісно властивості моделі описують перебіг реального процесу. Використання методів математичної статистики є найбільш поширеним способом перевірки моделей на адекватність. Фактичне значення досліджуваного об'єкта, відповідно до методів математичної статистики, можна представити у вигляді (40):

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i \quad (40)$$

де $\hat{y}_i$ – отримане в процесі моделювання значення;

ε_i – випадкова (залишкова) компонента.

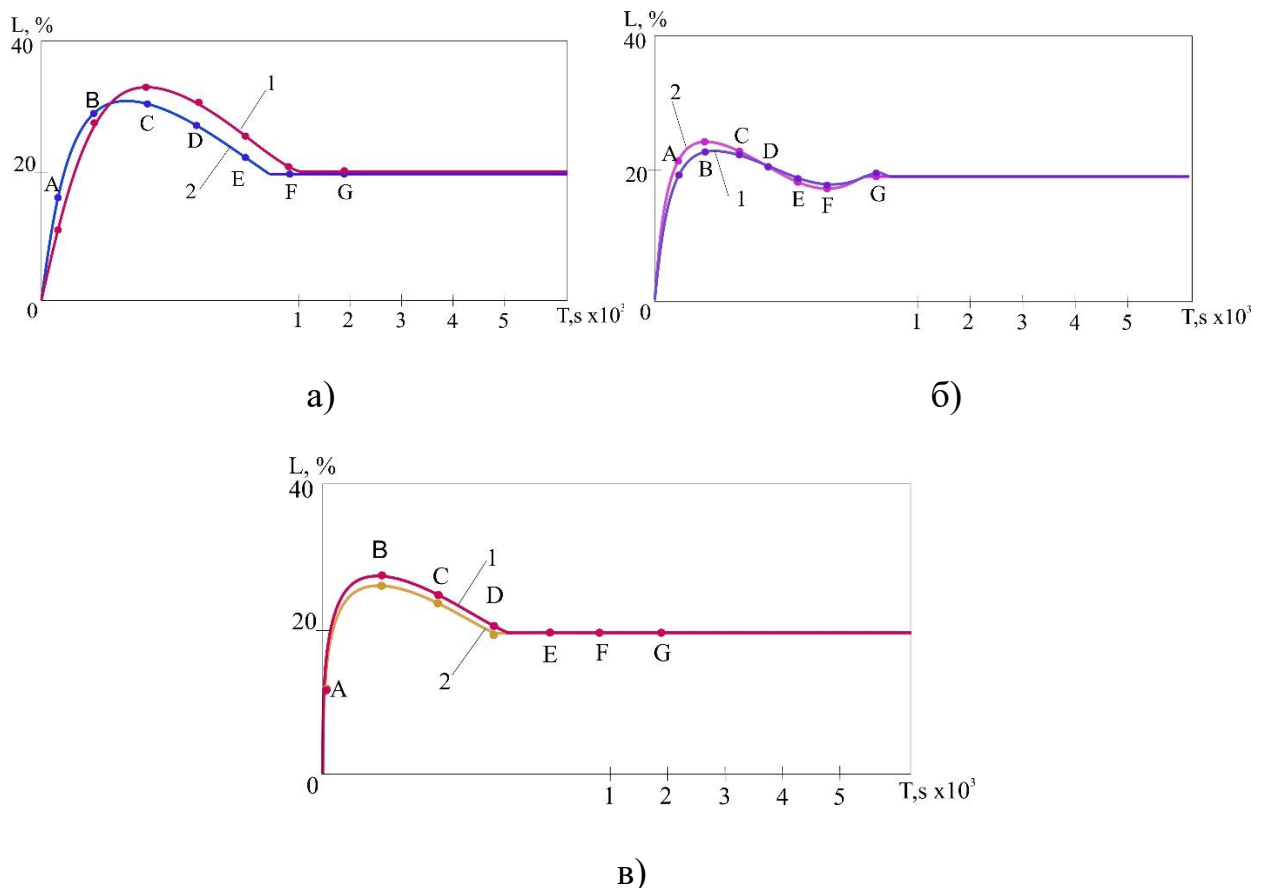


Рис. 37. Порівняння перебігу реального процесу та результатів моделювання: а) П-регулятор, б) нечіткий регулятор, в) нейромережевий регулятор, (1 – графік перебігу реального процесу, 2 – графік роботи моделі).

Один з таких методів для випарної установки розглядається у роботі [150]. Це d-критерій Дарбіна-Уотсона. Порівняння моделювання та перебігу реального процесу зображені на рис. 37.

Точність прогнозування числових значень було розраховано за формулою (41) [150].

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x'_i}{x_i} \right| \leq \varepsilon \quad (41)$$

де x – дійсне значення;

x' – значення моделі;

ε – випадкова (залишкова) компонента.

Таблиця 3. Порівняння результатів моделювання і значень перебігу реального процесу

Назва точки	x_t	x'_t	Абсолютна похибка моделі	Порівняння з максимально допустимою похибкою $\varepsilon = 10$
П-регулятор				
A	9	17	0,9	<10
B	25	26	0,04	<10
C	31	29	0,06	<10
D	27	24	0,11	<10
E	24	22	0,08	<10
F	20,5	19,5	0,05	<10
G	19,8	19,5	0,02	<10
Нечіткий регулятор				
A	19	21	0,1	<10

B	23	25	0,09	<10
C	22,5	23	0,02	<10
D	20	20	0	<10
E	19	18,5	0,03	<10
F	18,3	18	0,02	<10
G	20	21	0,05	<10
Нейромережевий регулятор				
A	10	10	0	<10
B	23	24	0,04	<10
C	22	23	0,05	<10
D	20	21	0,05	<10
E	20	20	0	<10
F	20	20	0	<10
G	20	20	0	<10

Оскільки показник точності моделі δ (табл. 3) не перевищує її максимального значення $\delta_{\max}=0,9$, то можна зробити висновок, що система є адекватною [151].

Отже, для оцінки адекватності роботи моделі було проведено перевірку методом d_a . а саме: було перевірено наскільки всі значення абсолютних похибок відповідають допустимому рівню, який було задано для побудови моделі: $\varepsilon_i=10$ (42).

$$d_a = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \Delta x_t$$

$$\Delta x_t = \begin{cases} 1, \text{ якщо } |\varepsilon_t| > d, \\ 0, \text{ якщо } |\varepsilon_t| \leq d. \end{cases} \quad (42)$$

З рис. 37 та формули (42) можна зробити висновок, що модель є адекватною за критерієм d_a , оскільки $d_a=0$.

Оцінку якості розроблених моделей було проведено з використанням показника середньоквадратичного відхилення регресії s_e , показника суми

квадратів залишків Q_e , F-критерія Фішера, перерегулювання Y_2 та коефіцієнта детермінації R^2 , результати вказано у таблиці 4.

Таблиця 4. Критерії оцінки якості моделей

Розроблені моделі	Критерії				
	Q_e	s_e	R^2	F	Y_2
<i>Модель з нечіткими регуляторами</i>	73,1	2,42	0,59	4,97	10%
<i>Модель нейромережеви ми регуляторами</i>	82,6	2,53	0,54	4,65	5%
<i>Модель з класичними регуляторами</i>	97,3	2,81	0,47	4,47	27%

Отже, при використанні нейромережевого регулятора, система є стійкою, але виникає невелика статична похибка. Проте перевагою такого типу регулювання є набагато більша швидкість регулювання, ніж при використанні класичних чи нечітких регуляторів. Тому, з метою виправлення даної ситуації, є можливим комбінування роботи нейромережевого та нечіткого регуляторів, а саме: можливо використовувати систему випарювання у режимі нейромережевого регулювання для зменшення часу регулювання, а потім переходити у режим регулювання за допомогою нейромережевого регулятора для того, щоб позбутися статичної похибки. Для того, щоб уникнути позаштатних ситуацій під час комбінування роботи регуляторів необхідно розробити модель прогнозування роботи системи нечіткого та нейромережевого регулювання. Крім того, така модель дозволить ще і враховувати вплив величезної кількості зовнішніх чинників, які можуть впливати на систему.

2.4. Синтез системи з компенсацією зовнішніх збурень

Наведені у даному розділі способи регулювання описували тільки можливість регулювати один контур технологічного параметру. Фактично це означає, що, наприклад, процес регулювання рівня у першому корпусі випарної не впливає на регулювання тиску у цьому ж корпусі і навпаки. Проте у реальних системах автоматизації регулювання різних параметрів являється взаємопов'язаним. Тобто, об'єкт керування на окремі контури розділити неможливо і необхідно розглядати у системі як єдиний (рис. 38), де $x_1, x_2, \dots, x_n$ – керуючий вплив; $y_1, y_2, \dots, y_n$ – вихідний сигнал; $w_1, w_2, \dots, w_n$ – прямі зв'язки; $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{n2}$ – перехресні зв'язки.

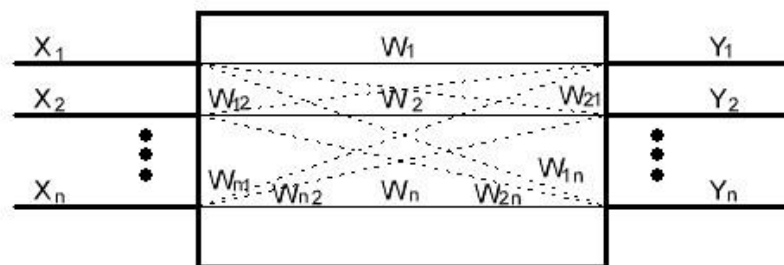


Рис. 38. Схема об'єкта управління

Розробка систем зв'язного регулювання відбувається на основі принципу автономності. Даний принцип складається з кількох умов інваріантності: інваріантності виходу y_1 у відношенні до сигналу регулятора x_n і виходу y_n у відношенні до сигналу регулятора x_1 і т.д. Тобто сигнали x можна розглядати як збурення для сигналів y у інших контурів.

Отже, було розроблено комбіновану систему з компенсацією зовнішнього збурення для контуру регулювання рівня у першому корпусі випарної установки. Першим кроком є побудова годографа для розроблених регуляторів методом розширеної амплітудно-фазової характеристики (РАФХ) (43 – 45):

$$K_p=3.751, T_i=8.8 \quad (43)$$

$$W_K(p) = \frac{W_B(p)}{W_P(p) \cdot W_{OB}(p)} \quad (44)$$

$$W_B(s) = \frac{0.2e^{-2p}}{(60p+1)} \quad (45)$$

Далі наведено алгоритм роботи методу у середовищі Matlab:

```
w=0:0.00001:0.5;
p=i*w;
Wa=(0.35*exp(-3.*p))./(10*p+1);
Wb=3.751.*(1+1./(8.8.*p));
Wc=(0.2*exp(-2.*p))./(60*p+1);
W=(Wc)./(Wa.*Wb);
Real=real(W);
Imagine=imag(W);
p=i*0.13;
Was=(0.35*exp(-3.*p))./(10*p+1);
Wbs=3.751.*(1+1./(8.8.*p));
Wcs=(0.2*exp(-2.*p))./(60*p+1);
Wds=(Wcs)./(Was.*Wbs);
Rep=real(Wds);
Imp=imag(Wds);
hold on;
xlabel('Re');
ylabel('Im');
grid on;
R=0.0127;
t=0:0.01:3.3
x=R*cos(t)+R
y=abs(R*sin(t));
plot(x,y,Real,Imagine,Rep,Imp,'r*');
xlabel('Real');
ylabel('Imagine');
```

grid on;

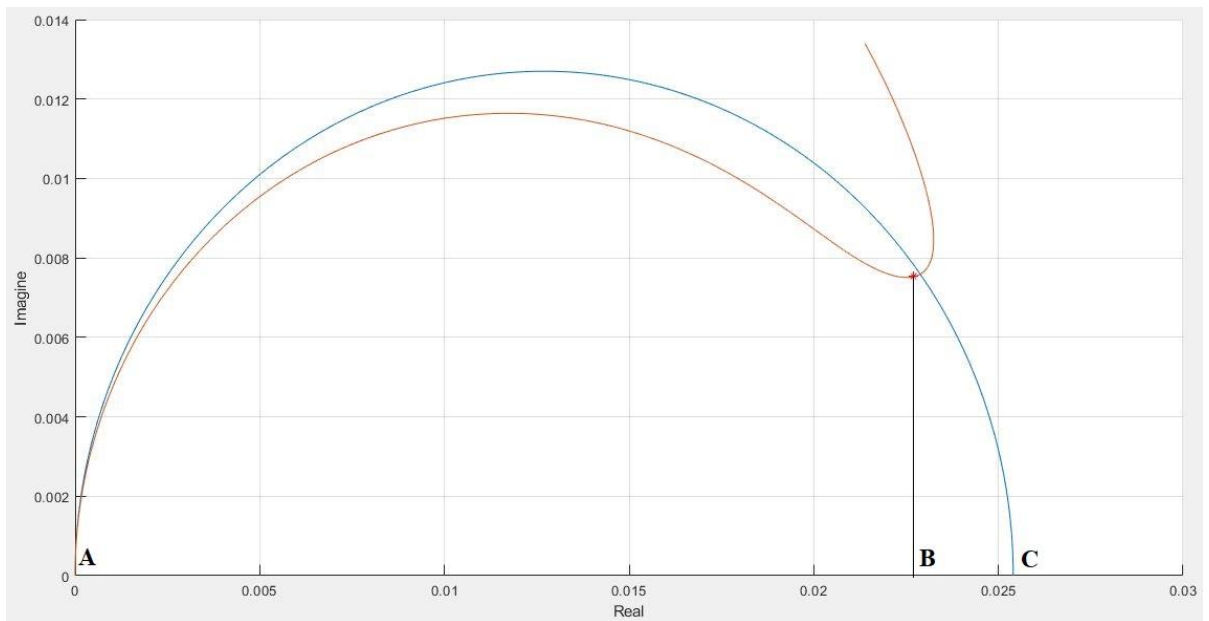


Рис. 39. Годограф амплітудно-фазової характеристики компенсатора.

На рис. 39 наведено годограф амплітудно-фазової характеристики компенсатора, з якого видно, що при обраній частоті, точка годографа знаходиться у першій чверті. Наступним кроком зробимо розрахунок компенсатора з урахуванням того, що він є реально-диференціальною ланкою (46 – 50).

$$K = |AC| = 0.026 \quad (46)$$

$$T = \frac{1}{\omega_{3\theta}} \sqrt{\frac{|AB|}{|BC|}} \quad (47)$$

$$|AB| = 0.0226 \quad (48)$$

$$|BC| = 0.0034 \quad (49)$$

$$T = 19.2 \quad (50)$$

Отже, параметри реально-диференціальної ланки матимуть наступний вигляд (51 – 53):

$$K = 0.026 \quad (51)$$

$$T = 19.2 \quad (52)$$

$$W_K(p) = 0.026 \frac{19.2p}{19.2p + 1} \quad (53)$$

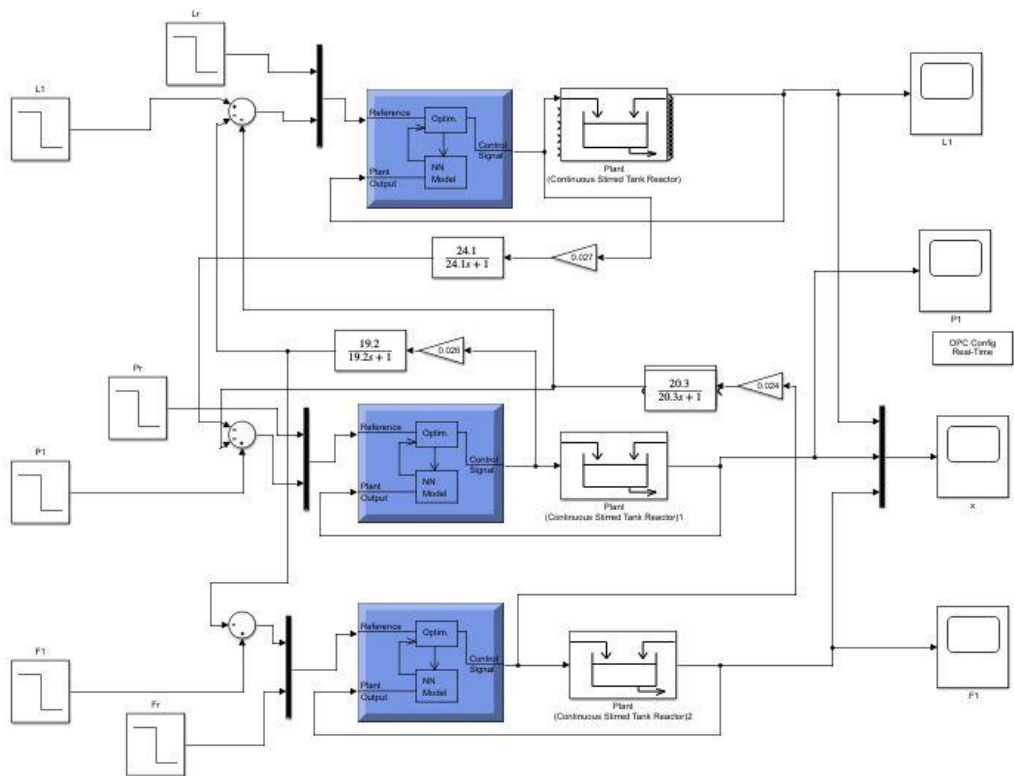


Рис. 40. Система регулювання з компенсаторами у контурах регулювання параметрів у першому корпусі випарної установки

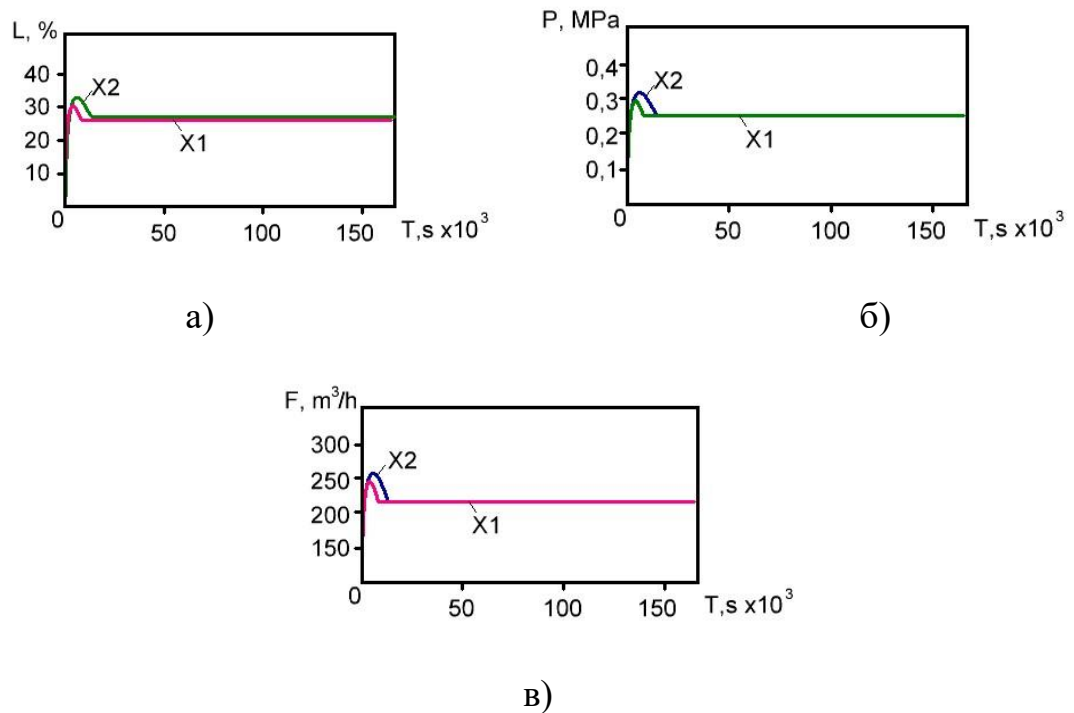


Рис. 41. Порівняння перехідних процесів без компенсаторів (X2) та з компенсаторами (X1): а) контур регулювання рівня; б) контур регулювання тиску; в) витрати.

Реакцію окремих контурів на збурення наведено на рис. 42.

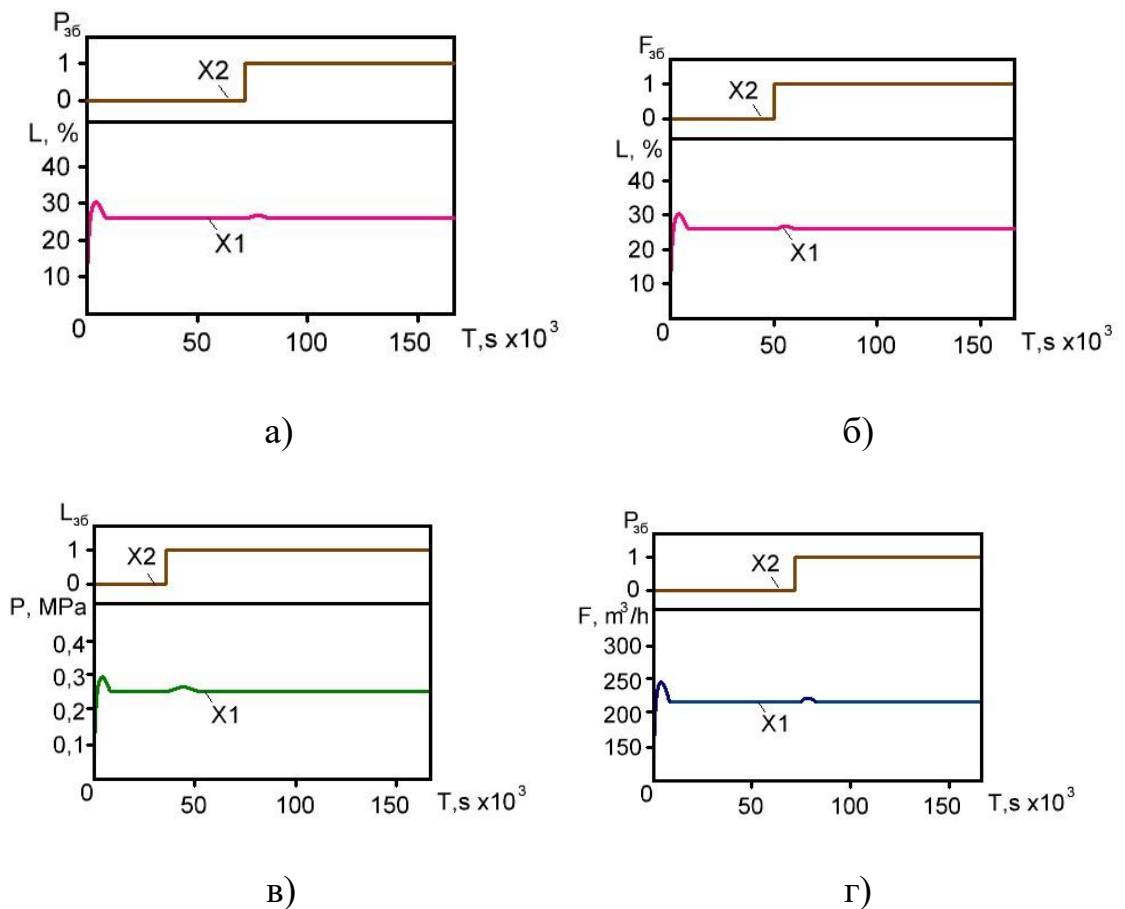


Рис. 42. Реакція окремих контурів на збурення (X1 – перехідний процес, X2 – збурення): а) регулювання рівня у першому корпусі при збуренні від регулятора тиску; б) регулювання рівня у першому корпусі при збуренні від регулятора витрати; в) регулювання тиску у першому корпусі при збуренні від регулятора рівня; г) регулювання витрати у першому корпусі при збуренні від регулятора тиску.

Аналогічним чином розраховано компенсатори і для інших контурів. Далі наведено фрагмент моделі для першого корпусу випарної станції з введенням компенсаторів (рис. 40).

Далі було отримано перехідні процеси для контурів з використанням компенсаторів. Порівняння перехідних процесів без компенсаторів та з компенсаторами наведено на рис. 41.

Розрахуємо показники якості для наведених перехідних процесів (табл. 5)

Таблиця 5. Показники якості для перехідних процесів

Параметр	Статична похибка	Час перехідного процесу, $c \cdot 10^3$	Ступінь затухання	Перерегулювання, %
Без компенсаторів				
Рівень	1	10	0,85	27
Тиск	0	12	0,84	26
Витрата	0	11	0,86	25
З компенсаторами				
Рівень	0,5	8	0,89	21
Тиск	0	8	0,86	23
Витрата	0	7	0,87	22

Після проведення аналізу отриманих показників зроблено висновок, що використання компенсаторів призводить до підвищення якості перехідних процесів по всім каналам регулювання.

Висновки

1. У даному розділі розглядається можливість застосування інтелектуальних регуляторів у процесі випарювання. А саме: нечіткого та нейромережевого регуляторів. Для вдалої розробки системи з нечітким регулятором було виділено нечіткі підмножини.
2. Було розроблено лінгвістичні змінні для роботи нечіткого регулятора. Також було розроблено бази правил на основі експертних даних для кожного контуру регулювання.
3. Було розроблено нову математичну модель. Розроблена модель дозволяє синтезувати та аналізувати автоматичну систему керування для підприємства. Ця модель характеризує динамічну продуктивність процесу випарювання у випарному апараті. Результати моделювання було досліджено на адекватність за d-алгоритмом. Дослідження моделі на адекватність показало, що модель є адекватною, оскільки $\varepsilon_1 < 10$.
4. У даному дослідженні було отримано результати моделювання роботи системи з використанням класичних, нейромережевих та нечітких регуляторів. Оцінка якості перехідних процесів отриманих моделей показала, що при використанні нейромережевих регуляторів значно зменшується час регулювання порівняно з використанням класичних та нечітких регуляторів. Також відбулось підвищення таких параметрів якості як: показник середньоквадратичного відхилення регресії s_e , показник суми квадратів залишків Q_e , F-критерій Фішера, перерегулювання Y_2 та коефіцієнт детермінації R^2 .
5. На основі проведеного аналізу отриманих показників зроблено висновок, що використання компенсаторів призводить до підвищення якості перехідних процесів по всіх каналах регулювання.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА І МОДЕЛЮВАННЯ МОДУЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ З НЕЧІТКИМ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ РЕГУЛЯТОРАМИ В ПІДСИСТЕМІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИПАРНОЇ СТАНЦІЇ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

3.1. Розробка підсистеми прогнозування для системи

Використання інтелектуальних систем в автоматизації процесу випарювання цукру передбачає виникнення великої кількості варіантів розвитку подій, частина яких може призводити до виникнення позаштатних та аварійних ситуацій. Саме тому дуже важливо завчасно запобігти їх появі. Для цього необхідно застосувати у даній роботі прогнозування стану даної системи. Також необхідно прогнозувати на короткий час технічний стан випарної установки. Задача прогнозування технічного стану полягає у діагностиці сукупності показників стану системи. Тобто, шляхом обробки існуючих значень діагностичних показників та прогнозуванні зміни діагностичних показників, що дозволить спрогнозувати технічний стан системи на короткий інтервал часу вперед та прийняти рішення про вид технічного стану.

Завдяки розвитку штучного інтелекту та нейронних мереж зараз доступно багато ефективних методів прогнозування. Для ефективної роботи таких засобів необхідно використовувати велику кількість даних. Саме тому, з метою підвищення ефективності прогнозування роботи випарної установки, було зібрано статистичні дані роботи вже існуючих систем. Одним із алгоритмів прогнозування, застосованих у дослідженні, став метод прогнозування локальних тенденцій. Його перевага полягає у тому, що, порівняно з іншими складними інтелектуальними алгоритмами, він досить простий у реалізації та, при цьому, має високий рівень ефективності. Крім того, використання цього алгоритму не потребує спеціального програмного та апаратного забезпечення.

Перш ніж створювати прогноз по роботі випарної установки, було зібрано статистичні дані поведінки контурів системи автоматизації у різних режимах роботи з використання розроблених у даній роботі регуляторів та класичних регуляторів. Отримані дані було перетворено на часові ряди методом розділення отриманих трендів на короткі часові інтервали.

Прогнозування роботи випарної установки за даним методом відбувається за допомогою нечітких моделей часових рядів. Модель числових рядів та локальної тенденції для системи автоматизації випарної установки задається наступним чином: необхідно перетворити дискретний часовий ряд вигляду $Y = \{t_i, x_i\}, i = [1, n]$, де t_i – деякий момент часу, x_i – рівень часового ряду, у нечіткий часовий ряд $\tilde{Y} = \{t_i, \tilde{x}_i\}, i \in [1, n]$, $X = \{x_i\}, \tilde{x}_i \in \tilde{X}$, де $\tilde{x}_i$ – нечітка мітка.

Таким чином кожна нечітка тенденція $\tau \in \mathfrak{T}$ може бути представлена структурною моделлю побудованою наступним чином (54):

$$\begin{aligned} \tilde{V} \times \tilde{A} \times \Delta T &\rightarrow \mathfrak{T} \\ \tau &= \langle \tilde{v}, \tilde{a}, \Delta t, \mu \rangle \end{aligned} \quad (54)$$

Де τ – назва нечіткої тенденції із множини $\mathfrak{T}$,

$\tilde{v}$ – тип нечіткої тенденції, який характеризує основні якісні залежності часового ряду (стабільність, падіння, зростання), $\tilde{v} \in \tilde{V}$,

$\tilde{a}$ – інтенсивність нечіткої тенденції, виражається лінгвістично (низький, високий, слабкий тощо), $\tilde{a} \in \tilde{A}$,

Δt – протяжність нечіткої тенденції, $\Delta t \in \Delta T$,

μ – функція належності ділянки нечіткого часового ряду обмеженого інтервалом Δt нечіткої тенденції τ .

Отже, для отримання прогнозної локальної тенденції необхідно згенерувати модель нечіткого часового ряду. Для цього можна використати модель нечіткого динамічного процесу з нечітким приростом, який виглядає наступним чином:

$X_t (t = 1, 2, \dots) \subset R^1$ – універсальна множина, для якої визначено нечіткі множини $\tilde{x}_t^i, (i = 1, 2, \dots), \tilde{v}_t^j, (j = 1, 2, \dots), \tilde{a}_t^s, (s = 1, 2, \dots)$

3.2. Розробка алгоритму прогнозування у програмному середовищі

Для роботи з алгоритмом локальних тенденцій необхідно задати наступні залежності параметрів (55):

$$\begin{aligned}\tilde{x}_i &= Fuzzy(x_i), \\ \tilde{v}_i &= TTend(\tilde{x}_i, \tilde{x}_{i-1}), \\ \tilde{v}_{i+1} &= \tilde{f}_{\tilde{v}}(\tilde{v}_i), \\ \tilde{a}_i &= RTend(\tilde{a}_i, \tilde{a}_{i-1}), \\ \tilde{a}_{i+1} &= \tilde{f}_{\tilde{a}}(\tilde{a}_i), \\ \tilde{x}_{i+1} &= Comp(\tilde{x}_{i+1}, \tilde{v}_{i+1}, \tilde{a} + 1), \\ x_{i+1} &= DeFuzzy(\tilde{x}_{i+1}) + \varepsilon_{i+1},\end{aligned}\tag{55}$$

Де Fuzzy – операція фазифікації шкали,

TTend – операція по визначенню типу відмінності,

RTend – операція по виявленню інтенсивності відмінності,

Comp – операція по розрахунку нової нечіткої оцінки,

DeFuzzy – операція дефазифікації шкали.

$\tilde{f}_{\tilde{v}}, \tilde{f}_{\tilde{a}}$ – нечіткі залежності представлені у вигляді композитного правила імплікації,

$x_{i+1}, \varepsilon_{i+1}$ – числова оцінка та помилка прогнозованого рівня часового ряду.

На першому етапі роботи обираємо такі нечіткі моделі часових рядів, які є схожими за поведінкою до фактичних часових рядів. Це пов'язано з тим, що такі моделі можна вважати адекватними за поведінкою.

Другим етапом є вибір моделі, які обираються з моделей, обраних на першому кроці, але при цьому є точністю. Для цього існує критерій відповідності показників точності прогнозування (K_{SMAPE}) (56).

$$K_{SMAPE} = \frac{abs(SMAPE_1 - SMAPE_2)}{\max(SMAPE_1, SMAPE_2)}\tag{56}$$

Де $SMAPE_1$ – помилка навчаючої вибірки,

$SMAPE_2$ – помилка тестуємої вибірки.

Помилка вибірки розраховується за наступною формулою (57):

$$SMAPE = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \frac{|F_t - A_t|}{(|A_t| + |F_t|) / 2} \quad (57)$$

Де F_t – прогнозоване значення,

A_t – реальне значення,

m – горизонт прогнозу у тестовій вибірці.

Для прогнозування роботи автоматизованої випарної установки було використано наступний алгоритм: спочатку необхідно перетворити початковий часовий ряд у нечіткий часовий ряд. Наступним кроком необхідно перетворити отриманий нечіткий часовий ряд у часовий ряд нечіткої елементарної тенденції та провести дефазифікацію методом центру тяжіння інтенсивності кожної нечіткої елементарної тенденції по кожному часовому ряду ($a_t = DeFuzzy(\tilde{a}_t)$).

Далі необхідно розділити отриманий ряд нечіткої елементарної тенденції на n інтервалів рівної довжини. Будь-яка модель нечіткого часового ряду вважається нечітким співвідношенням, до якого можна застосувати алгоритм Мамдані. Дефазифікація проводиться за допомогою метода цента тяжіння.

У даній роботі використано двоступінчастий алгоритм вибору моделі прогнозування часового ряду.

Результат виконання алгоритму прогнозування для рівня у першому корпусі випарної установки з використанням нечіткого регулювання наведено на рис 49. З даного рисунку можна побачити, що даний алгоритм прогнозує значення і тенденції часових рядів досить адекватно і точно. Проте, необхідну провести оцінку якісних показників даної моделі прогнозування. Дослідження помилок при роботі наведеної моделі прогнозування та оцінка її стабільності наводиться у наступному пункті даного розділу.

Необхідно розрахувати суму інтенсивностей нечітких елементарних тенденцій для кожного інтервалу наступним чином (58):

$$\begin{aligned}
& \text{if } P_{up}(\tau_t) = \text{true then } ST_{up} = ST_{up} + a_t, \\
& \text{if } P_{down}(\tau_t) = \text{true then } ST_{down} = ST_{down} + a_t, \\
& \text{if } ST_{up} = 0 \text{ and } ST_{down} = 0 \text{ then} \\
& \quad \tilde{v} = \text{"Stable"}, a = 0, \\
& \text{if } ST_{up} \geq 2 \cdot ST_{down} \text{ then} \\
& \quad \tilde{v} = \text{"Up"}, a = \text{abs}(ST_{up} - ST_{down}), \\
& \text{if } ST_{down} \geq 2 \cdot ST_{up} \text{ then} \\
& \quad \tilde{v} = \text{"Down"}, a = \text{abs}(ST_{up} - ST_{down}), \\
& \text{if } 0,9 \cdot ST_{up} \leq ST_{down} \leq 1,2 \cdot ST_{up} \\
& \text{or } 0,9 \cdot ST_{down} \leq ST_{up} \leq 1,2 \cdot ST_{down} \\
& \text{then } \tilde{v} = \text{"Regular"}, a = (ST_{up} + ST_{down}) / 2 \\
& \text{else } \tilde{v} = \text{"Chaos"}, a = \text{abs}(ST_{up} - ST_{down}), \\
& \tilde{a} = \text{Fuzzy}(a).
\end{aligned} \tag{58}$$

Де P – кінцева множина точок на інтервалі p (кінцева множина тенденцій),
 ST – часовий інтервал протяжності нечіткої тенденції.

За допомогою даного алгоритму можна проводити оцінку локальних тенденцій за допомогою лінгвістичної та числової форм (рис. 43.). Даний алгоритм не потребує додаткової інтерпретації користувачем. Недоліком даного алгоритму є обмеження його роботи кількістю попередньо заданих часових інтервалів, через що кількість ідентифікованих локальних тенденцій буде рівною кількості заданих розробником інтервалів. Даний алгоритм дозволяє отримати часові ряди, які можуть бути використані в подальшому для прогнозування локальних тенденцій. Перевагою даного алгоритму є можливість скорочення бази знань, яку можна представити у вигляді сукупності правил, які генеруються за нечітким часовим рядом.

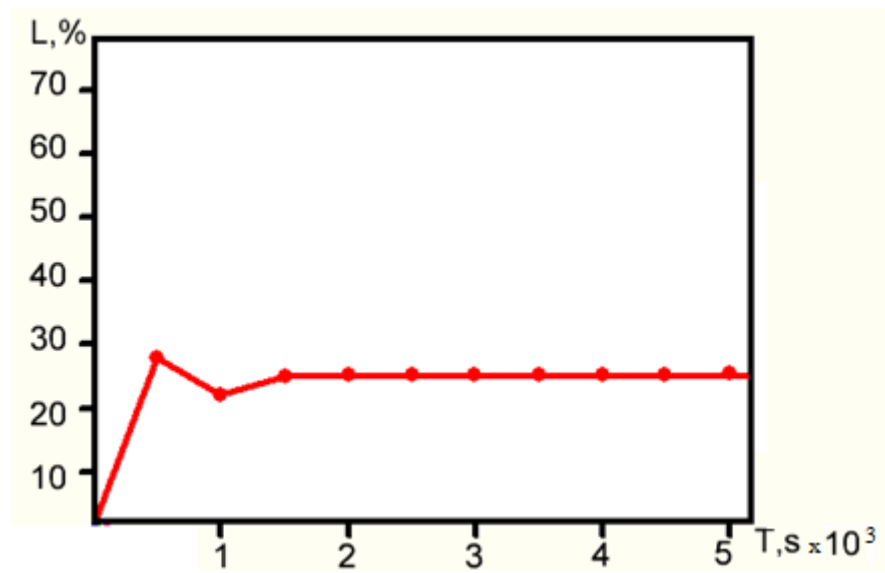


Рис. 43. Результат виконання алгоритму прогнозування для рівня у першому корпусі.

3.3. Аналіз і синтез керувального діяння з використанням методів прогнозування у системі керування випарною установкою

Пропонуємо використати структурну схему регулювання [23], модифікувавши її таким чином, щоб включити до неї можливість прогнозування [8] та зміни типу регулювання [24].

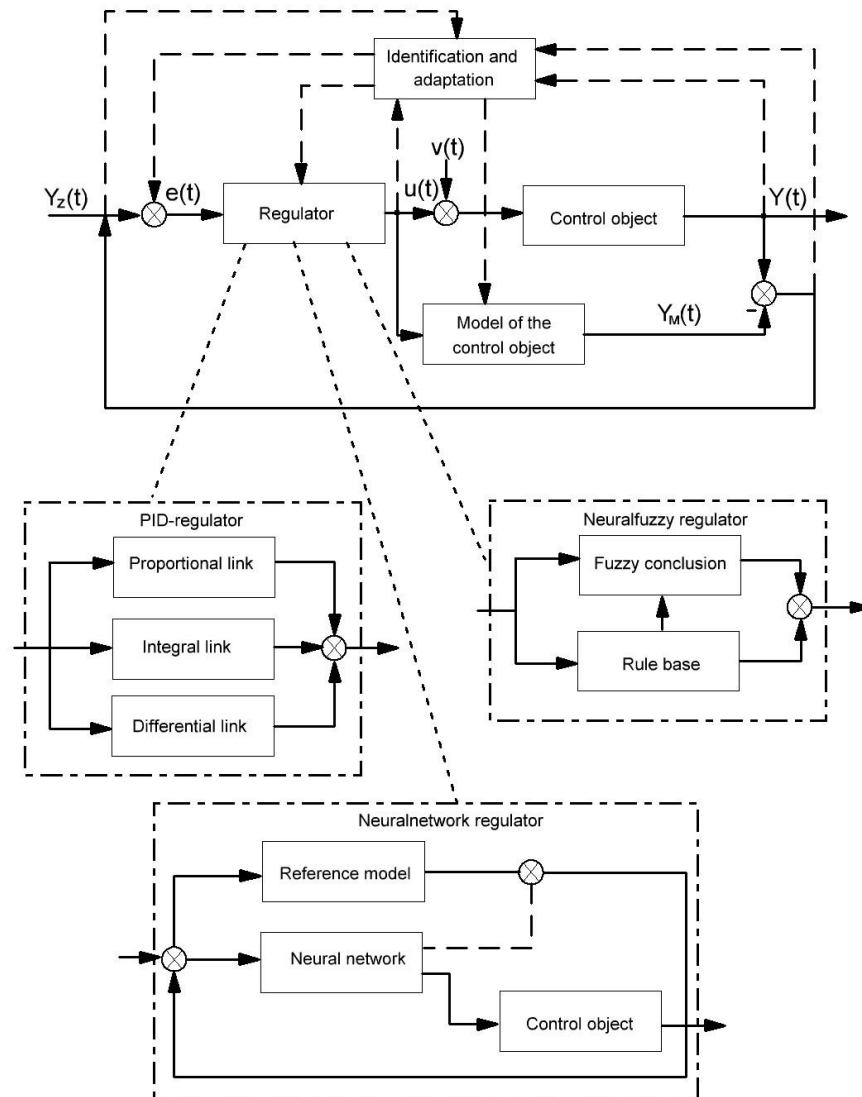


Рис. 44. Рисунок структурної схеми регулювання

Структурна схема регулювання наведена на рисунку 44, де $Y_z(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – розузгодження між сигналом завдання та зворотним зв'язком, $u(t)$ – керуючий сигнал, $v(t)$ – зовнішнє збурення, $Y(t)$ – вихідний сигнал, $Y_M(t)$ – вихідний сигнал з моделі об'єкту.

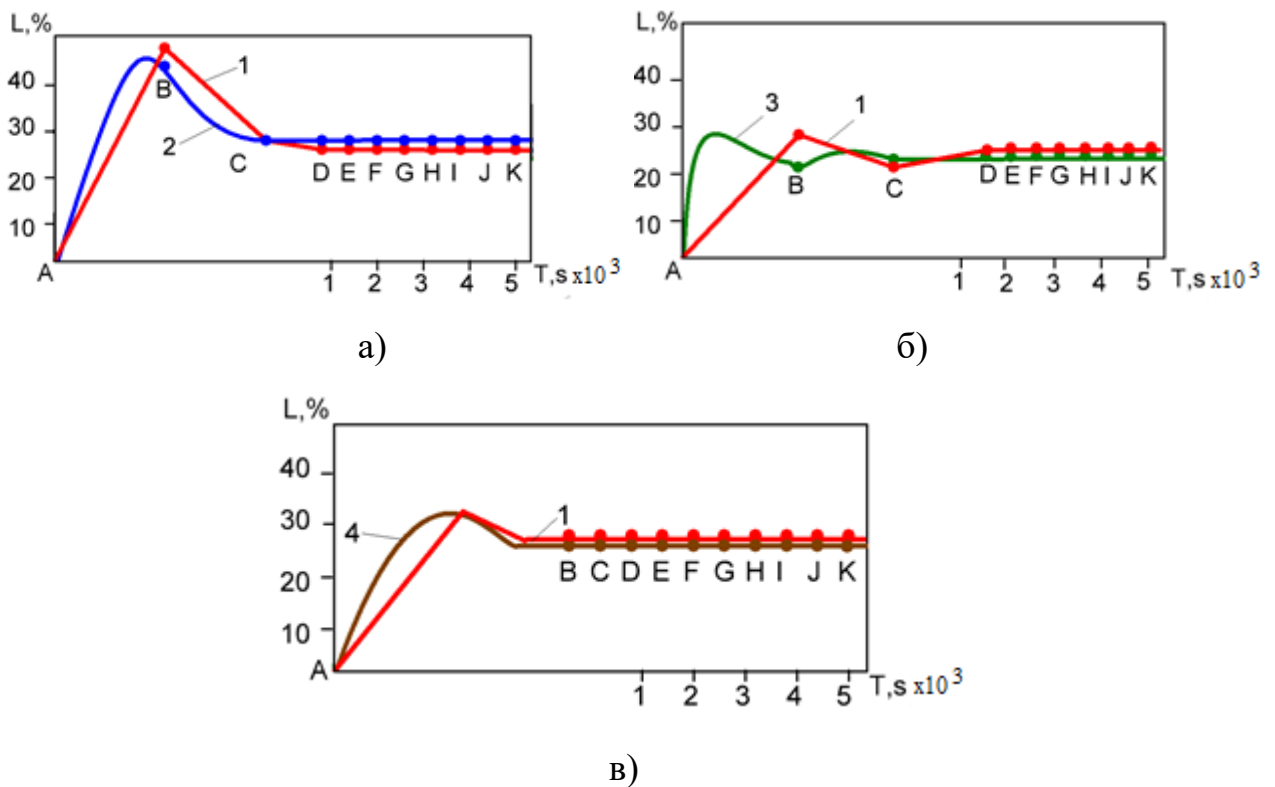


Рис. 45. Порівняння перехідних процесів прогнозованого та фактичного рівнів у першому корпусі випарної установки з використанням: а) ПД, б) нечіткого та в) нейромережевого регуляторів (1 (—) – прогнозоване значення рівня, 2 (—) – фактичне значення рівня (ПД-регулятор), 3 (—) – фактичне значення рівня (нечіткий регулятор), 4 (—) – фактичне значення рівня (нейромережевий регулятор), АВ, ВС, CD, ..., JK – інтервали часового ряду)

Для того, щоб правильно розуміти наскільки можна довіряти отриманому алгоритму прогнозування процесу випарювання необхідно також оцінити точність отриманого прогнозу. Точність отриманого прогнозу оцінюється за допомогою методів статистичної оцінки помилки прогнозування часових рядів. На рис. 45. наведено порівняння прогнозованого значення зміни рівня у першому корпусі випарної установки з використанням нечіткого регулятора та фактичної зміни рівня.

Найпростішим показником для оцінки помилки прогнозування є середня помилка (SP) (59).

$$SP = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z(t) - \tilde{Z}(t)) \quad (59)$$

Де SP – середня помилка прогнозного значення часового ряду,

n – кількість інтервалів часового ряду,

$Z(t)$ – фактичне значення часового ряду,

$\tilde{Z}(t)$ – прогнозне значення часового ряду.

Даний показник характеризує величину відхилення та кількісне відхилення прогнозу процесу випарювання від фактичного значення. За допомогою цього параметра можна також визначити був прогноз оптимістичним чи песимістичним. Тобто, від'ємне значення даного показника повідомляє, що прогноз було завищено, а додатне – було занижено.

Ще одним показником є середня абсолютна помилка (SAP) (60).

$$SAP = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Z(t) - \tilde{Z}(t)| \quad (60)$$

Найчастіше в автоматизації цей показник застосовують для оцінки прогнозування витрати. Для оцінки прогнозування цього параметра його було застосовано у даному дослідженні. Також цей показник прийнято застосовувати для часових рядів, у котрих відсутні значення, що наближаються до нуля. Частіше цей показник використовується для розрахунку іншого параметра оцінки якості прогнозування – середньої відносної похибки прогнозування (SVP) (61).

$$SVP = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Z(t) - \tilde{Z}(t)|}{Z(t)} \times 100\% \quad (61)$$

Середня відносна похибка прогнозування застосовується для часових рядів, фактичне значення яких більше одиниці або дуже близьке до неї. Це пов'язано з тим, що при використанні чисел близьких до нуля ($Z(t) = 0,05$) можна отримати значення помилки близькі до нескінченності, хоча насправді помилка буде не дуже суттєвою. Саме тому у таких випадках використовують наведену вище середню абсолютну помилку (SAP).

Рідше використовуються середня квадратична помилка (SKP), квадратний корінь із середньої квадратичної помилки (SQSKP) та стандартне відхилення (SV). Їх формули та розрахунки наведено нижче (62).

$$\begin{aligned}
 SKP &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z(t) - \tilde{Z}(t))^2 \\
 SQSKP &= \sqrt{SKP} \\
 SV &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z(t) - SKP)^2}
 \end{aligned} \tag{62}$$

У таблиці 6 наведено результати розрахунків для рівня у першому корпусі випарної установки з використанням нечіткого регулятора. Опираючись на результати, наведені у таблиці 6, можна зробити висновок, що, оскільки, значення SP від'ємне, то прогноз було завищено відносно фактичних даних. Це відповідає дійсності, оскільки прогноз показує, невелику абсолютну похибку в 1% при використанні нечіткого регулювання, а при фактичному використанні даного типу регулювання вона відсутня. Проте таке завищення є несуттєвим, що видно з показника середньої відносної похибки прогнозування.

В теорії, при застосуванні середньої відносної похибки при оцінці точності моделі прогнозування процесу випарювання, значення точності прогнозу може досягати відмітки у 100%. Це буде означати, що обрана модель прогнозування описує процес з абсолютною точністю. На практиці таке явище майже неможливе, оскільки прогноз не може врахувати абсолютно усі чинники, які впливають на систему автоматизації. У випадку, коли значення точності прогнозу наближається до 0%, то дана модель зовсім не описує прогнозований процес.

Таблиця 6. Показники оцінки помилки прогнозування для першого корпусу випарної установки.

№	Точка	Прогнозоване значення, %	Фактичне значення, %	Абсолютна похибка, %	SP	SAP	SVP, %	SKP	SQSKP	SV
1	A	0	0	0	-0,9	1,27	5	0.002	0,045	24,02
2	B	28	26	2						

3	C	24	26	2												
4	D	27	25	2												
5	E	26	25	1												
6	F	26	25	1												
7	G	26	25	1												
8	H	26	25	1												
9	I	26	25	1												
10	J	26	25	1												
11	K	26	25	1												
Точність моделі прогнозування:											95%					
Нечіткий регулятор																
1	A	0	0	0	-0,9	0,9	5	0,002	0,045	24,02						
2	B	28	25	2												
3	C	24	25	2												
4	D	27	25	2												
5	E	26	25	1												
6	F	26	25	1												
7	G	26	25	1												
8	H	26	25	1												
9	I	26	25	1												
10	J	26	25	1												
11	K	26	25	1												
Точність моделі прогнозування (8):									95%							
Нейромережевий регулятор																
1	A	0	0	0	-0,9	1,27	4	0.9	0,94	21,87						
2	B	26	25	1												
3	C	26	25	1												
4	D	26	25	1												
5	E	26	25	1												
6	F	26	25	1												
7	G	26	25	1												
8	H	26	25	1												
9	I	26	25	1												
10	J	26	25	1												
11	K	26	25	1												
Точність моделі прогнозування:									96%							

Показник точності прогнозу також використовується з метою вибору оптимальної моделі прогнозування. Оптимальною вважається та модель, точність якої найбільше наближається до 100%, оскільки вона з більшою вірогідністю зробить більш точний прогноз.

Оскільки, у нашому випадку, значення середньої відносної похибки становить 5%, то звідси випливає, що точність моделі становить 95%, що є дуже високою оцінкою якості нашої системи прогнозування. Оскільки точність моделі прогнозування є дуже близькою до 100%, то її можна вважати оптимальною.

Окрім точності моделі прогнозування також необхідно дослідити її стабільність. Для цього необхідно порівняти залежність відносної похибки при зміні рівня шуму (тобто зміні абсолютної похибки). Розрахуємо відносну похибку (V) для кожного значення точки часового ряду за наступною формулою (63):

$$V = \frac{|Z(t) - \tilde{Z}(t)|}{Z(t)} \times 100\% \quad (63)$$

Отримані дані занесемо до таблиці 7.

Таблиця 7. Абсолютні та відносні похибки моделі прогнозування рівня випарної установки.

№	Точка	Прогнозоване значення, %	Фактичне значення, %	Абсолютна похибка, %	Відносна похибка, %
1	A	0	0	0	0
2	B	28	26	2	7,7
3	C	24	26	2	7,7
4	D	27	25	2	8
5	E	26	25	1	4
6	F	26	25	1	4
7	G	26	25	1	4
8	H	26	25	1	4
9	I	26	25	1	4
10	J	26	25	1	4
11	K	26	25	1	4

Графік залежності відносної похибки від абсолютної наведено на рис. 46.

З даного графіка видно, що відносна похибка не перевищує 8%. Крім того видно, що при розподілі часового ряду на інтервали точність вимірювань залишається стабільною, якщо абсолютна похибка не змінюється. Даний факт дозволяє стверджувати, що отримана модель прогнозування системи є стабільною та може застосовуватись для прогнозування роботи випарної установки.

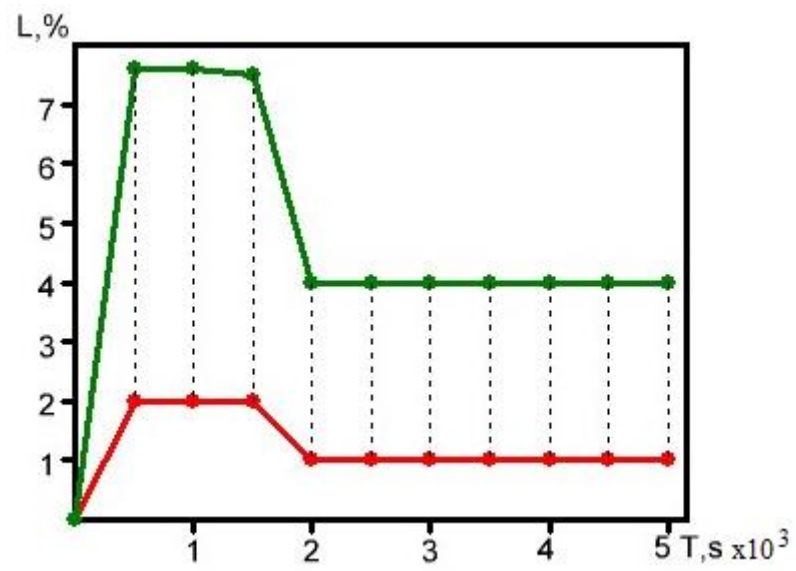


Рис. 46. Графік залежності відносної похибки від абсолютної (— — зміна абсолютної похибки, — — зміна відносної похибки).

3.4. Розробка системи автоматизації вдосконаленого керування

Для того, щоб на основі прогнозованих даних користувач швидко міг приймати рішення необхідно розробити людино-машинний інтерфейс таким чином, щоб він міг надати об'єктивно вірні підказки користувачу. З цією метою необхідно використати підсистему прийняття рішень.

Існує два класи методик розробки підсистеми прийняття рішень: зовнішні методики та внутрішні. Зовнішні методики базуються на даних, які отримують на основі опитування користувачів. Внутрішні – на основі експертних оцінок, методика розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів. До зовнішніх методів відносяться: метод клієнтської задоволеності Кано, метод відображення історії користувача, метод «швидкого човна». До зовнішніх методів відносять методи: метод ціна-якість, модель Systemico, метод сегментних функцій. Більшість із наведених методик потребує високих часових та фінансових затрат. До недорогих та швидких методик відносяться методики ціна-якість та методика розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів. У зв'язку з тим, що методика ціна-якість не передбачає участь користувачів у зборі даних, а методика розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів дозволяє розрахувати та спрогнозувати пріоритет запитів користувачі на внесення змін у людино-машинному інтерфейсі за допомогою кількісних та якісних характеристик, то у даній роботі було обрано метод розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів для розробки підсистеми прийняття рішень.

Дана методика дозволить суттєво скоротити часові та трудові затрати на процес розрахунку пріоритетів запитів користувачів на модифікацію людино-машинного інтерфейсу процесу випарювання цукру та підвищить якість роботи системи при використанні підсистеми прогнозування.

Для роботи з даною методикою необхідно отримати інформацію про користувачів (U), їх звернень (Q) та їх запитів на модифікацію (D). Отримання цих даних дозволяє сформувати часові ряди зміни оцінок пріоритетів (64):

$$X = \{x_t, t = t', \dots N\} \quad (64)$$

Де t – номер спостереження, $t \in (1, \dots, N)$,

t' – номер спостереження, в якому вперше було зафіксовано запит користувача,

x_t – значення пріоритету запиту користувача на момент початку ітерації з номером t ,

N – кількість ітерацій, протягом яких ведеться моніторинг та пріоритезація запитів користувачів.

Результатом роботи обраної методики є отримання рекомендацій P_j у вигляді ранжованих за степенями важливості оцінок запитів на внесення змін у людино-машинному інтерфейсі (65):

$$P_j = F(x_{N+1,j}, B(X_j)), j = 1, \dots, L \quad (65)$$

Де x_{N+1} , – прогнозована оцінка пріоритету запита користувача,

j – ідентифікатор запита користувача,

L – кількість запитів користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу,

$B(X_j)$ – оцінка тенденції зміни пріоритету запиту користувача, отримана часовим рядом X_j ,

F – процедура інтеграції точкової прогнозованої $x_{N+1,j}$ та темпоральної $B(X_j)$ оцінок пріоритету запитів користувача на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу.

Дана методика пріоритезації запитів користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу складається з декількох наступних етапів:

1. Етап вилучення та перетворення даних. Наданому етапі відбувається вилучення даних з бази записів про звернення користувачів про внесення змін. Перетворення даних звернень на модифікацію людино-машинного інтерфейсу. На даному етапі формується інформація про користувачів (U), їх звернень (Q) та їх запитів на модифікацію (D). Далі формується матриця відношень запитів користувачів (R). Після цього відбувається розрахунок точкових та темпоральних оцінок пріоритетів запитів на модифікацію (X_j та $B(X_j)$).

2. На другому етапі відбувається моделювання і прогнозування оцінок пріоритетів по часовому ряду X_j . Спочатку необхідно побудувати моделі нечітких часових рядів за допомогою лінгвістичних змінних. Далі проводиться прогнозування точкових оцінок пріоритетів на основі нечітких моделей.

3. На третьому етапі відбувається формування рекомендацій для підсистеми прийняття рішень. Основою для цього стає лінгвістичне резюмування темпоральних та прогнозних оцінок пріоритетів запитів користувачів.

Дана методика відрізняється від інших тим, що при застосуванні цього методу відбувається пріоритезація запитів користувачів на модифікацію людино-машинного інтерфейсу.

Для правильної розробки підсистеми прийняття рішень необхідно провести збір даних. Вхідними даними є ключові характеристики користувачів людино-машинного інтерфейсу та інформація про їх дії. Дані про головні характеристики користувачів можна записати у наступному вигляді (66):

$$U = \{u_i, i = 1, \dots, M\} \quad (66)$$

де u_i – ключова характеристика користувача,

i – ідентифікатор користувача,

M – кількість користувачів.

Із бази даних вивантажуються лише ті дані, які необхідні для дослідження та відповідають заявленому періоду, на протязі якого дані будуть оброблятися. Для цього людино-машинний інтерфейс має містити можливість ідентифікації користувачів. Список запитів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу можна записати у наступному вигляді (67):

$$\begin{aligned} Q &= \{q_k, k = 1, \dots, K\} \\ q_k &= \{i, j, t\} \end{aligned} \quad (67)$$

де q_k – опис запитів користувачів на внесення змін у людино-машинному інтерфейсі.

k – індекс звернення,

K – кількість звернень,

i – ідентифікатор користувача,
 j – ідентифікатор звернення користувача,
 t – номер ітерації розробки.

Також необхідно класифікувати звернення користувачів з метою відокремлення внесення змін на зміну типу регулювання. Список запитів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу можна записати наступним чином (68):

$$D = \{d_j, j = 1, \dots, L\} \quad (68)$$

де d_j – опис запиту користувача,
 j – ідентифікатор звернення користувача,
 L – кількість запитів користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу.

Також важливим параметром є дата та час внесення користувачем змін до людино-машинного інтерфейсу. Цей параметр необхідний для формування часових рядів оцінок пріоритетів запитів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу.

Пріоритет запиту на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу можна розрахувати наступним чином (69):

$$R = \{r_{i,j}\}$$

$$r_{i,j} = \begin{cases} t', & \text{якщо } \{i,j,t\} \in Q, \\ 0 & \end{cases} \quad (69)$$

де R – матриця відношень,
 $r_{i,j}$ – номер ітерації розробки t' .

Далі необхідно провести розрахунок точкових та темпоральних оцінок пріоритетів запитів модифікації по кожній проблемі, які отримані від користувачів у вигляді часових рядів. Розрахунок цих оцінок дозволяє відобразити інформацію по запитах до змін у людино-машинному інтерфейсі більш детально. Після цього розраховується оцінка пріоритету користувача та формується темпоральна оцінка, яка розглядається у вигляді нечіткої тенденції.

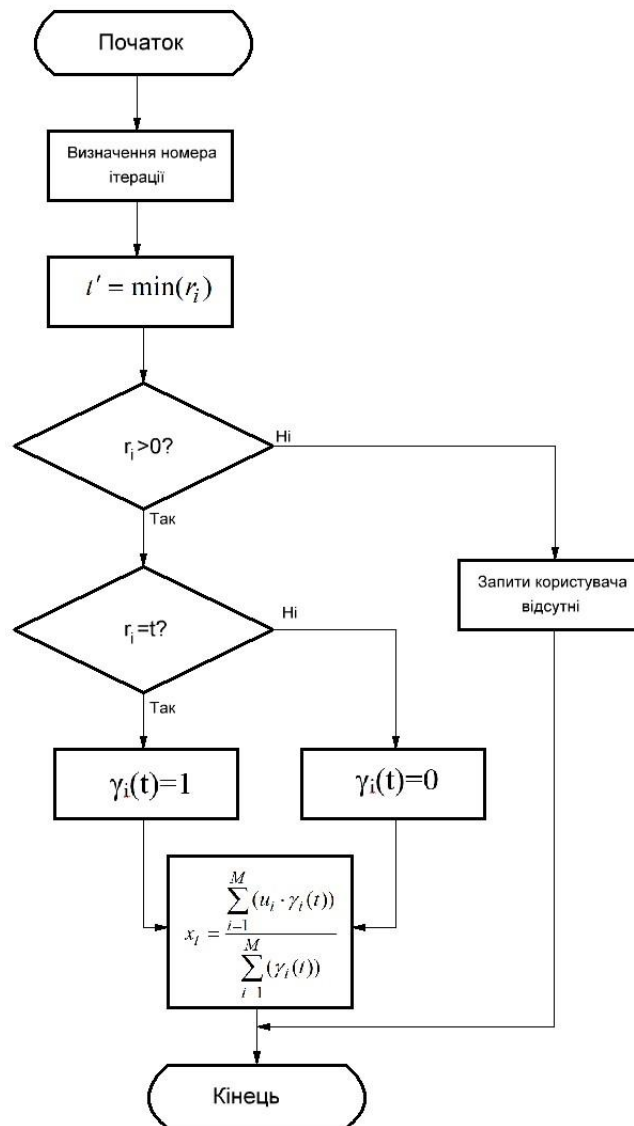


Рис. 47. Спеціальний алгоритм оцінки пріоритету запитів користувачів

Для оцінки пріоритету запиту користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу та формування з їх допомогою часових рядів використовується спеціальний алгоритм (рис. 47.).

Першим кроком даного алгоритму є визначення номера ітерації розробки людино-машинного інтерфейсу. Для цього необхідно визначити таке значення t' , при якому значення вектору $\{r_i\}$ буде мінімальним, але не нульовим. Нульове значення означає, що користувачі людино машинного інтерфейсу не звертаються до даної функції або проблеми (70).

$$t' = \min(r_i), r_i > 0. \quad (70)$$

Наступним кроком є визначення оцінки пріоритету x_t деякого запиту користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу. Даний розрахунок відбувається за формулою (71):

$$x_t = \frac{\sum_{i=1}^M (u_i \cdot \gamma_i(t))}{\sum_{i=1}^M (\gamma_i(t))}$$

$$\gamma_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } r_i = t, \\ 0 & \end{cases} \quad (71)$$

де γ_i – індекс відношення користувача до досліджуваного запиту на зміни в людино-машинному інтерфейсі.

u_i – значення ключової характеристики користувача.

Після виконання даного алгоритму необхідно визначити тенденції змін оцінок пріоритетів запитів. З цією метою необхідно застосовувати алгоритм на базі аналізу нечітких елементарних тенденцій часових рядів. У даному алгоритмі відбувається групування інтенсивностей нечітких тенденцій різноманітних типів, далі відбувається формування лінгвістичних правил основної тенденції часових рядів. Виконання даного алгоритму дозволяє сформувати набір оцінок пріоритетів запитів. У даному дослідженні використовуються наступні оцінки: «Зростання пріоритетів запитів», «Зменшення пріоритетів запитів», «Пріоритети залишаються стабільними», «Невизначеність змін пріоритетів», «Коливання змін пріоритетів», «Зростання пріоритетів запитів з коливанням», «Зменшення пріоритетів запитів з коливанням». Якщо застосовувати даний алгоритм для кожного запиту користувачів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу випарної установки та відносити кожний запит з відповідним йому часовим рядом, то можна визначити лінгвістичний терм, який несе у собі інформацію про зміни пріоритетів. Дана інформація дозволяє формувати рекомендації підсистеми прийняття рішень.

Обґрунтуванням використання нечітких моделей часових рядів є: мала довжина часових рядів оцінок пріоритетів запитів користувачів на внесення змін до

людино-машинного інтерфейсу. Ще причиною є те, що нечіткі моделі генерують лінгвістичні оцінки прогнозу. Використання нечітких моделей дозволяє представити значення у вигляді нечітких множин, що дозволяє використовувати лінгвістичні змінні при побудові моделі.

Для отримання числового значення прогнозу застосовується дефазифікація методом центра тяжіння. Таке прогнозування відбувається одним інтервалом, тобто, на одну ітерацію вперед для кожного запиту.

Тобто, виконання всіх наведених розрахунків дозволяє отримати інформацію про пріоритети користувачів на внесення запитів на модифікацію людино-машинного інтерфейсу та спрогнозувати зміни таких пріоритетів при внесенні змін до людино-машинного інтерфейсу.

На основі даних оцінок можна згенерувати рекомендації на перетворення запитів користувачів у функціональні вимоги на розробку наступної ітерації підсистеми прийняття рішень. Дані рекомендації базуються на предиктивному аналізі пріоритетів запитів. Дані запити поділяються за рівнем їх значущості за допомогою лінгвістичних змінних: «Запит не важливий», «Запит не дуже важливий», «Запит важливий», «Запит дуже важливий», «Найбільш важливий запит». Для цього застосовано лінгвістичні змінні на множинах значень.

На основі даної методики розробки підсистеми прийняття рішень формуються основні вимоги до функціонування програмного забезпечення роботи випарної установки. Було проведено кілька ітерацій розробки програмного забезпечення. У розробці приймало участь 20 користувачів, які зробили приблизно 100 запитів. Фрагменти даних наведено у наступних таблицях 8 – 10.

Наступним кроком, за формулою (72), формуємо часові ряди зміни оцінок пріоритетів. Далі наведено часовий ряд щодо виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання:

$$X_1 = \{3, 1; 2, 2; 1, 3; 1, 4\} \quad (72)$$

Таблиця 8. Опис запитів користувачів на модифікацію програмного
забезпечення

Індекс j	Опис запитів користувачів d
1	Можливість зміни режиму регулювання.
2	Перегляд прогнозування регулювання з використанням різних типів регуляторів.
3	Виведення рекомендацій щодо зміни режиму регулювання.
4	Виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання.

Таблиця 9. Опис ключових характеристик користувачів

Індекс користувача i	Ключова характеристика користувача u
1	Директор
2	Інженер
3	Інженер
4	Оператор
...	...
20	Оператор

Таблиця 10. Опис запитів користувачів

Індекс користувача i	Індекс запиту j	Номер ітерації розробки ПЗ t
2	1	1
3	1	1
4	2	3
5	4	2
...	...	...

1	3	4
---	---	---

Отже, з часового ряду X_1 можна сказати, що при першому спостереженні функція виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання серед користувачів мала третій пріоритет, але при подальших спостереженнях пріоритетність даної функції зростала і після третього спостереження зайняла перше місце. З цього можна зробити висновок, що прогнозований пріоритет користувачів даної функції буде високим.

Отже, за формулою (73) можна отримати рекомендації P_i у вигляді ранжованих оцінок запитів. Для функції виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання такий ряд має вигляд:

$$P_1 = F(1, \text{"Запит важливий"}) \quad (73)$$

За формулою (66) дані про головні характеристики користувачів можна записуємо у наступному вигляді (75):

$$U = \{\text{"директор"}, 1; \text{"інженер"}, 2; \text{"інженер"}, 3; \dots; \text{"оператор"}, 20\} \quad (75)$$

Далі, за формулою (76) створюється список запитів на внесення змін до людино-машинного інтерфейсу:

$$q_1 = \{1, 5, 2\} \quad (76)$$

За формулою (77) необхідно класифікувати звернення користувачів з метою відокремлення внесення змін на зміну типу регулювання:

$$D = \{\text{"зміна типу регулювання"}, 5\} \quad (77)$$

Далі, за допомогою формул (73) та (74) заповнюється матриця відношень з метою визначення пріоритетів запитів. За формулою (71) розраховується визначення оцінок пріоритетів. Результати занесено до таблиці 11.

Таблиця 11. Визначення оцінок пріоритетів.

Запит	Оцінка пріоритету запиту, X_{N+1}	Ранг пріоритету запиту	Лінгвістична оцінка запиту	Тенденція зміни пріоритету запиту, В	Рекомендація для створення функціональних вимог, Р
X_1	2	1	Важливо	Коливання	Дуже важливо
X_2	3	2	Важливо	Зріст	Дуже важливо
X_3	4	3	Важливо	Зріст	Важливо
X_4	1	4	Важливо	Зріст	Дуже важливо

Згідно таблиці можна зробити висновок, що найбільш важливою при виведенні інформації підсистемою прийняття рішень є функція виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання. Також дуже важливою є наявність функції перегляду прогнозування регулювання з використанням різних типів регуляторів. Тому під час роботи підсистеми прийняття рішень дані функції матимуть найвищий пріоритет.

3.5. Розробка алгоритму роботи людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки

Загальний вигляд алгоритму роботи системи можна побачити у додатку. На рис. 48. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за запуск людино-машинного інтерфейсу.



Рис. 48. Фрагмент алгоритму, який відповідає за запуск людино-машинного інтерфейсу.

Після запуску інтерфейсу користувача будь-який вплив на систему автоматизації випарної установки залишається неможливим поки не відбудеться авторизація користувача. Якщо користувач авторизувався, то далі стає доступним головний екран. Інші екрани та деякі функції на головному екрані будуть доступними лише за умови наявності необхідних прав у користувача. Після запуску головного екрану одразу розпочинається перевірка наявності тривоги, яка триватиме постійно, поки інтерфейс є активним. Одночасно з цим відбувається очікування подальших дій користувача.



Рис. 49. Фрагмент алгоритму, який відповідає за перевірку і повідомлення про наявність тривоги.

На рис. 49. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за перевірку і повідомлення про наявність тривоги. Якщо тривоги відсутні, то в інтерфейсі користувача ніяких змін не відбувається. Якщо ж виникає якась позаштатна ситуація, то відбувається виведення повідомлення про тривогу не залежно від того, який з екранів інтерфейсу користувача відкрито у даний момент. У користувача є можливість квітувати тривогу, але остаточно повідомлення про наявність тривоги зникне лише у разі усунення причин виникнення тривоги.

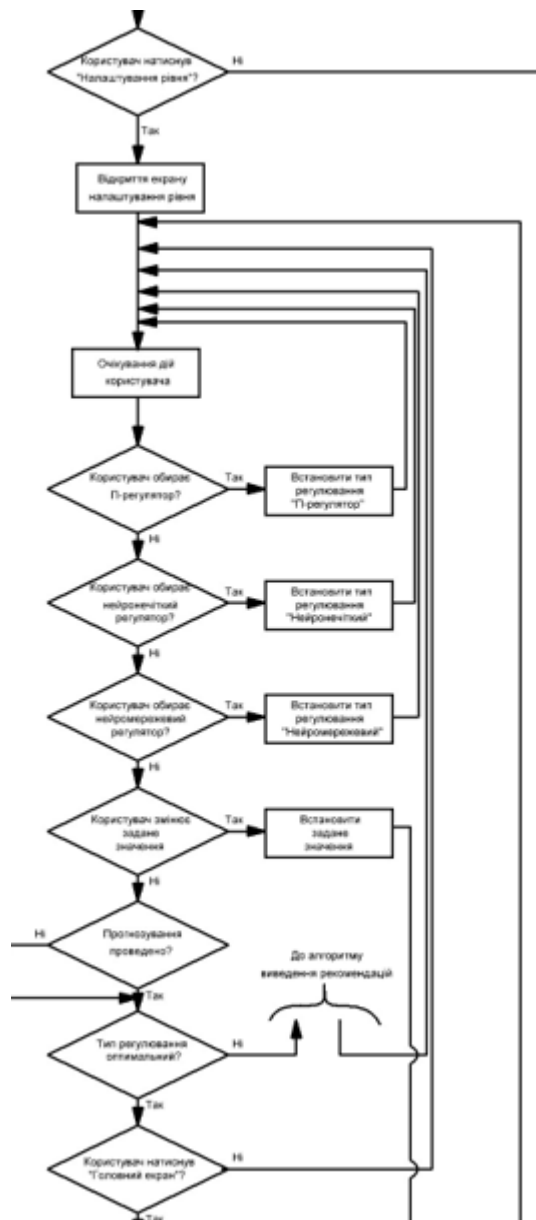


Рис. 50. Фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу екрану «Налаштування рівня».

Під час перебування головного екрану у режимі очікування відбувається перевірка наступних умов: чи натиснута кнопка «Налаштування рівня», чи натиснута кнопка «Налаштування тиску», чи натиснута кнопка «Налаштування витрати», чи натиснута кнопка «Архів», чи натиснута кнопка «Тренди», чи натиснута кнопка «Тривоги», чи натиснута кнопка «Журнал подій», чи натиснута кнопка «Вихід».

На рис. 50. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу екрану «Налаштування рівня». Якщо користувач натискає кнопку «Налаштування

рівня», то відбувається відкриття екрану налаштування рівня. Після чого система очікує наступних дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «П-регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням П-регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нечіткий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нечіткого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нейромережевий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нейромережевого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач змінює задане значення регульованого параметра, то дане значення надходить до алгоритму регулювання з використанням певного типу регулювання. Даний алгоритм описано нижче. Одночасно з цим запускається алгоритм прогнозування. Даний алгоритм описано нижче. Якщо, після проведення прогнозування отримано результат, який вказує на те, що даний режим не є оптимальним, то запускається алгоритм виведення рекомендацій. Даний алгоритм також описано нижче. Якщо даний режим виявляється оптимальним, то людино-машинний інтерфейс переходить до режиму очікування внесення інших змін на даному екрані. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Якщо користувач натискає кнопку «Налаштування тиску», то відбувається відкриття екрану налаштування тиску. Після чого система очікує наступних дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «ПІІ-регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням ПІІ-регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нечіткий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нечіткого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нейромережевий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нейромережевого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач змінює задане значення регульованого

параметра, то дане значення надходить до алгоритму регулювання з використанням певного типу регулювання. Даний алгоритм описано нижче. Одночасно з цим запускається алгоритм прогнозування. Даний алгоритм описано нижче. Якщо, після проведення прогнозування отримано результат, який вказує на те, що даний режим не є оптимальним, то запускається алгоритм виведення рекомендацій. Даний алгоритм також описано нижче. Якщо даний режим виявляється оптимальним, то людино-машинний інтерфейс переходить до режиму очікування внесення інших змін на даному екрані. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Подібно до регулювання рівня та тиску, у разі, коли користувач натискає кнопку «Налаштування витрати», то відбувається відкриття екрану налаштування витрати. Після чого система очікує наступних дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «ПІ-регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням ПІ-регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нечіткий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нечіткого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Нейромережевий регулятор», то встановлюється тип регулювання з використанням нейромережевого регулятора. Далі система повертається до очікування подальших дій користувача. Якщо користувач змінює задане значення регульованого параметра, то дане значення надходить до алгоритму регулювання з використанням певного типу регулювання. Даний алгоритм описано нижче. Одночасно з цим запускається алгоритм прогнозування. Даний алгоритм описано нижче. Якщо, після проведення прогнозування отримано результат, який вказує на те, що даний режим не є оптимальним, то запускається алгоритм виведення рекомендацій. Даний алгоритм також описано нижче. Якщо даний режим виявляється оптимальним, то людино-машинний інтерфейс переходить до режиму очікування внесення інших змін на даному екрані. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.



Рис. 51. Фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу екрану «Архів».

На рис. 51. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу екрану «Архів». Якщо користувач натисне кнопку «Архів», то відбудеться перехід до екрану «Архів». Після цього відбувається очікування дій користувача. Якщо користувач вносить певні зміни до архіву, то відбувається їх збереження. Після чого продовжується подальше очікування дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Якщо користувач натисне кнопку «Тренди», то відбудеться перехід до екрану «Тренди». Після цього відбувається очікування дій користувача. Якщо користувач

вносить певні зміни на даному екрані, то відбувається їх збереження. Після чого продовжується подальше очікування дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Якщо користувач натисне кнопку «Тривоги», то відбудеться перехід до екрану «Тривоги». Після цього відбувається очікування дій користувача. Якщо користувач вносить певні зміни на даному екрані, то відбувається їх збереження. Після чого продовжується подальше очікування дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Якщо користувач натисне кнопку «Журнал подій», то відбудеться перехід до екрану «Журнал подій». Після цього відбувається очікування дій користувача. Якщо користувач вносить певні зміни до журналу подій, то відбувається їх збереження. Після чого продовжується подальше очікування дій користувача. Якщо користувач натискає кнопку «Головний екран», то відбувається перехід на головний екран.

Якщо користувач натисне кнопку «Вихід», то відбудеться закриття інтерфейсу користувача.

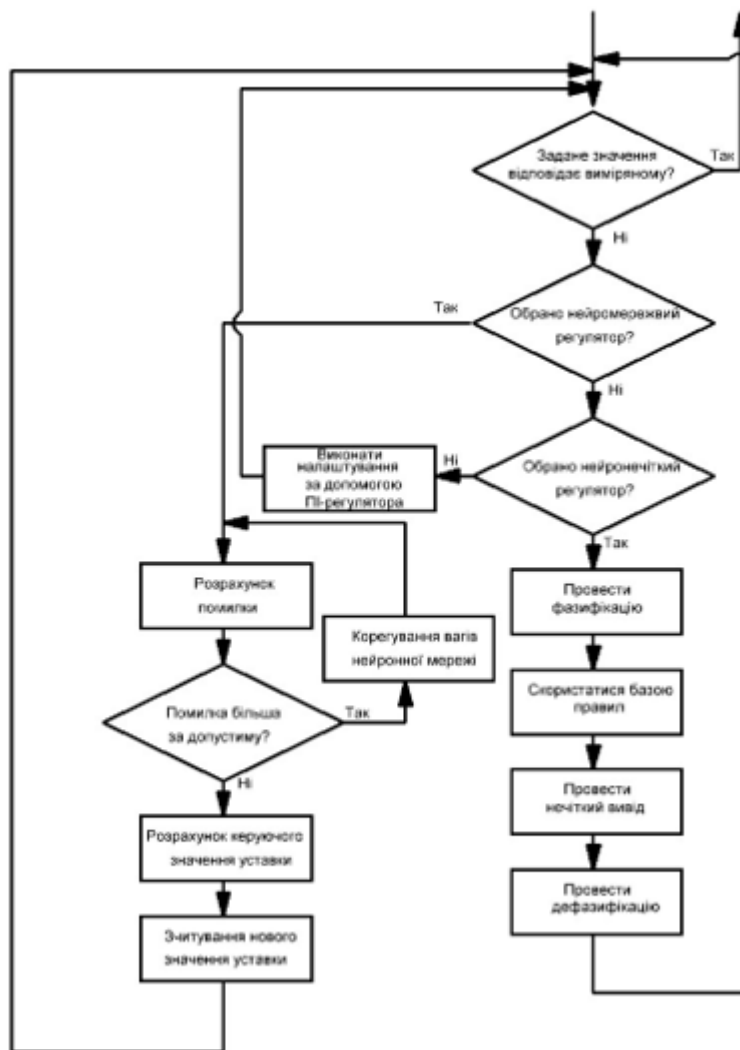


Рис. 52. Фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму регулювання.

На рис. 52. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму регулювання. Робота алгоритму регулювання відбувається наступним чином. Якщо задане значення відповідає вимірюваному, то система повертається до очікування внесення змін користувачем. Якщо ж виникає розузгодження, то система переходить до процесу регулювання за заданим типом. Якщо користувач обрав нейромережвий регулятор, то спочатку відбувається розрахунок помилки регулювання. Якщо помилка більша за допустиму, то проходить корегування вагів нейронної мережі. Коли помилка стає меншою за допустиму, відбувається розрахунок керуючого значення уставки. Далі відбувається зчитування нового

значення уставки. Після цього система повертається у режим очікування до тих пір, поки знову не виникне розузгодження.

Якщо користувач обрав нечіткий тип регулювання, то першим кроком відбувається проведення фазифікації. Далі, користуючись базою правил, проводиться нечіткий вивід, а потім дефазифікація. Після цього система повертається у режим очікування до тих пір, поки знову не виникне розузгодження.

Якщо користувач обрав П- (для регулювання рівня) або ПІ-регулятор (для регулювання тиску або витрати) то відбувається розрахунок нового значення уставки за допомогою заданих налаштувань коефіцієнтів регулювання. Після цього система повертається у режим очікування до тих пір, поки знову не виникне розузгодження.

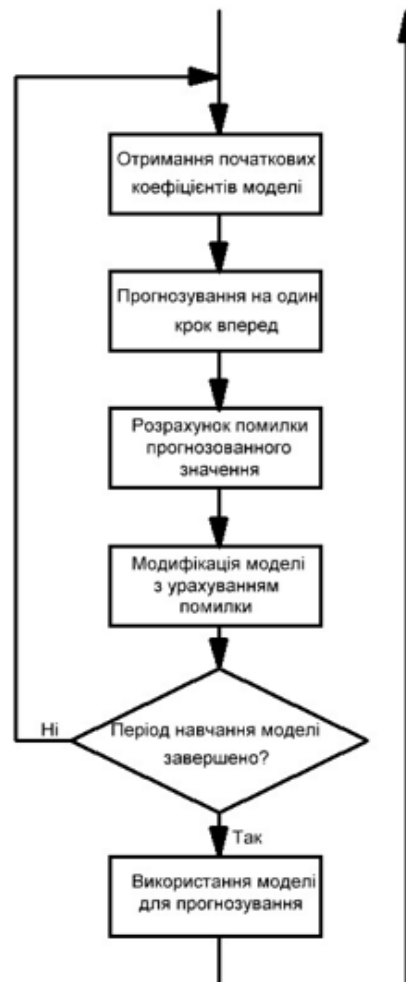


Рис. 53. Фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму прогнозування.

На рис. 53. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму прогнозування. Після вибору користувачем режиму регулювання (класичний регулятор, нейромережевий чи нечіткий) запускається алгоритм прогнозування. Спочатку відбувається отримання початкових коефіцієнтів моделі, після чого проводиться прогнозування на один крок вперед. Це дозволяє провести розрахунок помилки прогнозованого значення і скорегувати модель з урахуванням отриманої помилки. Після отримання скорегованої моделі з урахуванням помилок для кожного кроку дану модель можна використовувати для прогнозування роботи обраного режиму регулювання.

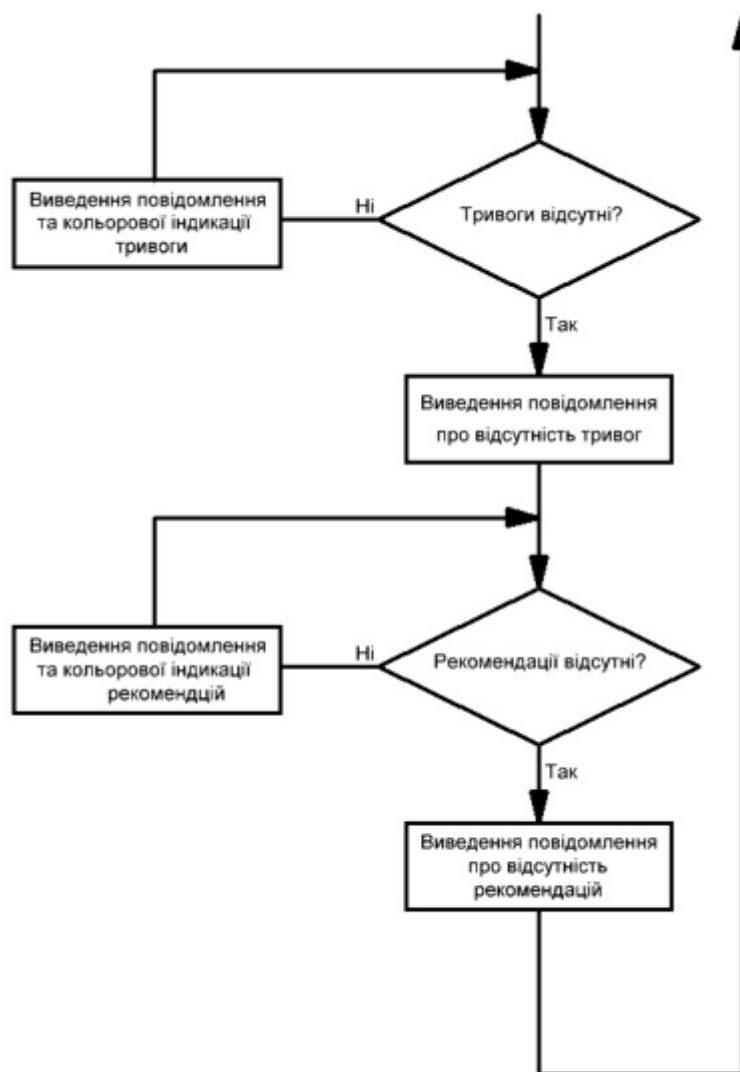


Рис. 54. Фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму виведення рекомендацій.

На рис. 54. зображено фрагмент алгоритму, який відповідає за роботу алгоритму виведення рекомендацій. Алгоритм виведення рекомендацій працює

наступним чином. Якщо під час роботи системи відсутні тривоги то на екрані відображено повідомлення «Тривоги відсутні». Якщо виникає якась тривога, то повідомлення змінюється на «Тривога» з червоною кольоровою індикацією. Якщо алгоритм прогнозування дає результат, який свідчить про можливість внесення змін до роботи системи з метою покращення ефективності її роботи, то на екрані користувача виникає повідомлення «Наявні рекомендації» з жовтою кольоровою індикацією. Якщо ж рекомендації відсутні, то відбувається відображення повідомлення «Рекомендації відсутні».

3.6. Розробка структури роботи системи SCADA

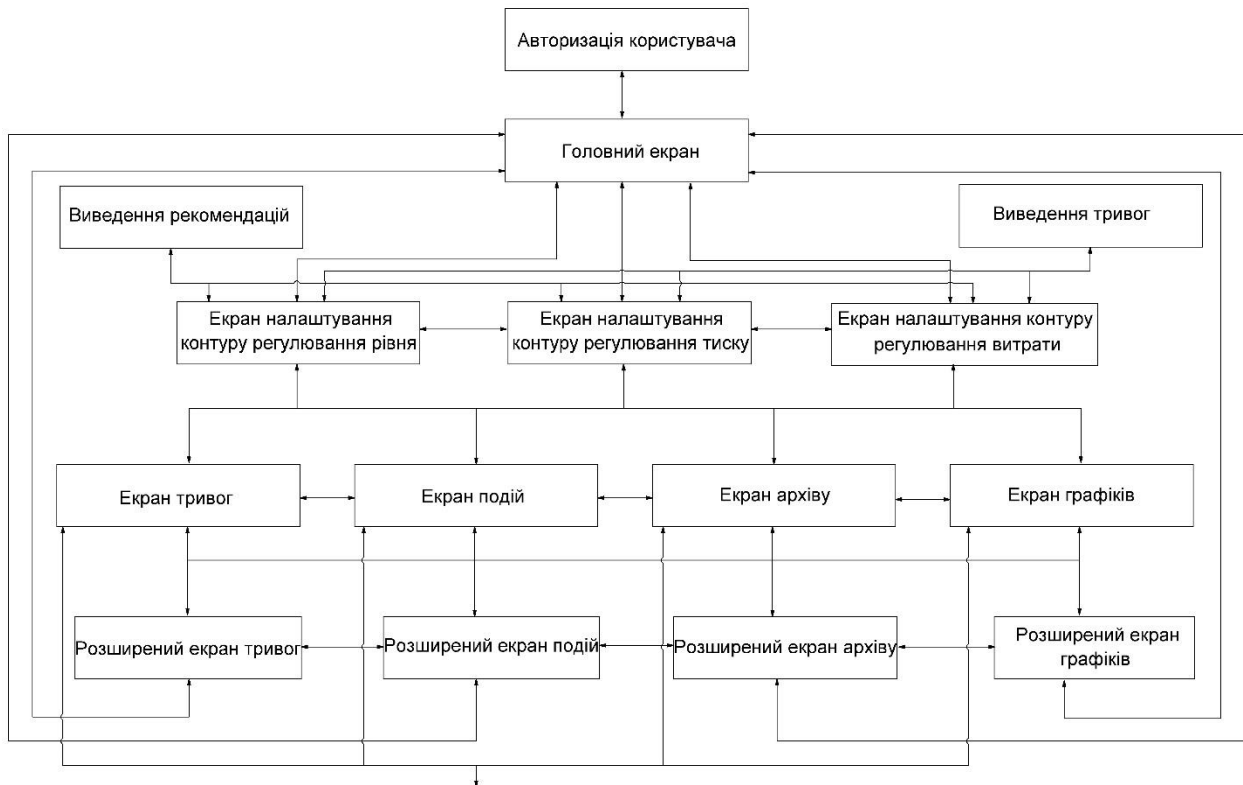


Рис. 55. Структура взаємодії головного екрану з іншими екранами та елементами людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки.

Ядром структурної схеми роботи людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки є головний екран (рис. 55.). Саме за його допомогою можна отримати доступ до усього функціоналу керування роботою випарної установки. Саме тому, перш ніж отримати доступ до головного екрану, необхідно пройти авторизацію користувача. Безпосередньо з головного екрану можна отримати прямий доступ до екранів налаштування контурів регулювання рівнів, тиску, витрати; до розширених екранів тривоги, подій, архіву, трендів. Крім того на головний екран виводяться усі рекомендації та тривоги.

Виведення усіх рекомендацій та усіх тривог відбувається і на усіх структурних елементах SCADA-системи: екранах налаштування рівнів, тиску, витрати, екрани подій, архіву, графіків та тривоги. Дані повідомлення можуть

бачити навіть неавторизовані користувачі, але не можуть при цьому вносити ніяких змін.

Також існує можливість переходити між екранами регулювання рівнів, тиску, витрати, тривоги, подій, архіву та графіків без повернення на головний екран. Крім того, на екранах регулювання рівнів, тиску та витрати є навігаційна панель у правій частині, яка, окрім функції швидкого переходу між цими екранами, інформує про наявні тривоги та рекомендації щодо роботи інших екранів регулювання. Також на екранах регулювання є можливість відкривати спрощені спливаючі версії екранів тривоги, подій, архіву та графіків, які мають дещо зменшений функціонал але несуть інформативність аналогічну до розширених версій цих екранів, але дозволяють одразу контролювати інформацію, наведену на цих екранах та контролювати і вносити зміни до перебігу процесу регулювання необхідних параметрів.

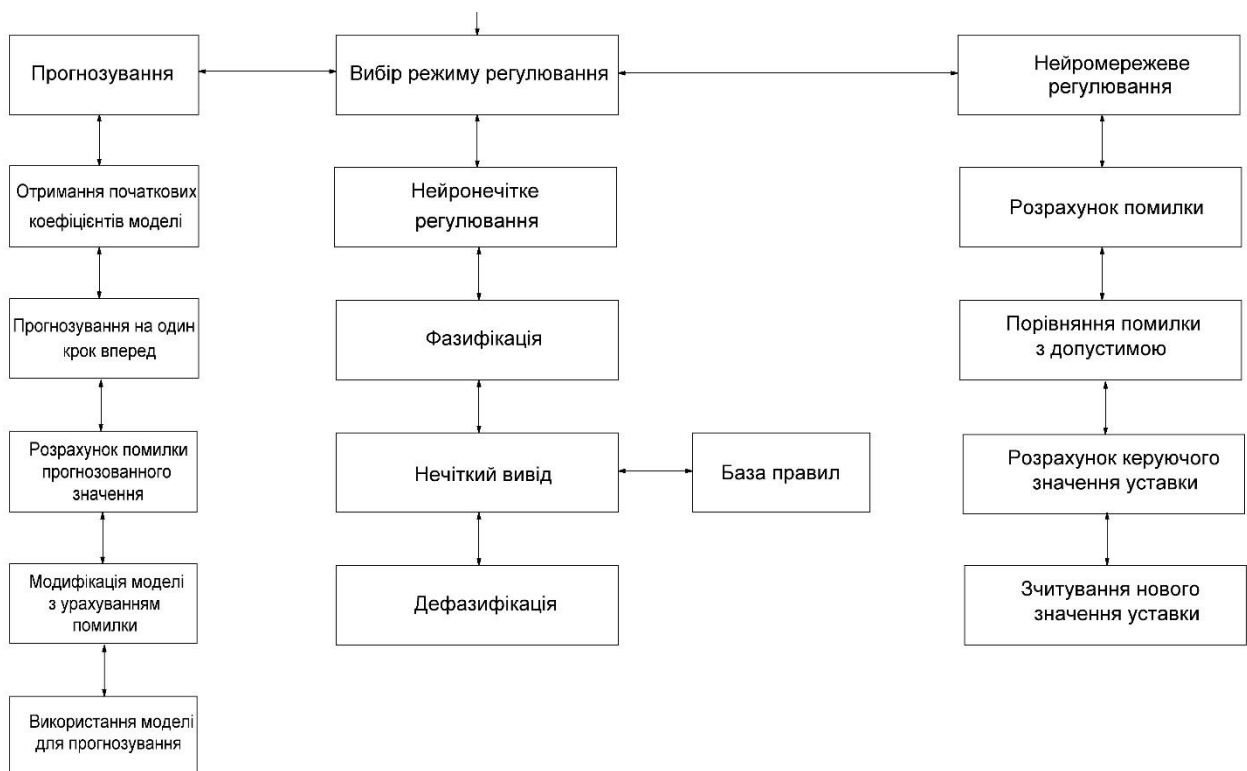


Рис. 56. Структура взаємодії виконання прогнозування та обраного режиму регулювання з екранами та елементами людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки.

На екранах регулювання є можливість вибору користувачем режиму регулювання. Дана можливість (рис. 56.) передбачає не лише вибір класичного, нечіткого чи нейромережевого регулятора, а й одночасне прогнозування їх роботи.

Після вибору користувачем режиму регулювання (класичний регулятор, нейромережевий чи нечіткий) розпочинається процес прогнозування. Спочатку відбувається отримання початкових коефіцієнтів моделі, після чого проводиться прогнозування на один крок вперед. Це дозволяє провести розрахунок помилки прогнозованого значення і скорегувати модель з урахуванням отриманої помилки. Після отримання скорегованої моделі з урахуванням помилок для кожного кроку дану модель можна використовувати для прогнозування роботи обраного режиму регулювання.

Якщо користувач обрав нейромережевий регулятор, то спочатку відбувається розрахунок помилки регулювання. Якщо помилка більша за допустиму, то проходить корегування вагів нейронної мережі. Коли помилка стає меншою за допустиму, відбувається розрахунок керуючого значення уставки. Далі відбувається зчитування нового значення уставки. Після цього система повертається у режим очікування до тих пір, поки знову не виникне розузгодження.

Якщо користувач обрав нечіткий тип регулювання, то першим кроком відбувається проведення фазифікації. Далі, користуючись базою правил, проводиться нечіткий вивід, а потім дефазифікація. Після цього система повертається у режим очікування до тих пір, поки знову не виникне розузгодження. Загальну функціональну структуру системи управління із підсистемою прийняття рішень наведено на рис. 57, де $Y_z(t)$ – сигнал завдання, $e(t)$ – розузгодження між сигналом завдання та зворотним зв'язком, $u(t)$ – керуючий сигнал, $v(t)$ – зовнішнє збурення, $Y(t)$ – вихідний сигнал, $Y_m(t)$ – вихідний сигнал з моделі об'єкту.

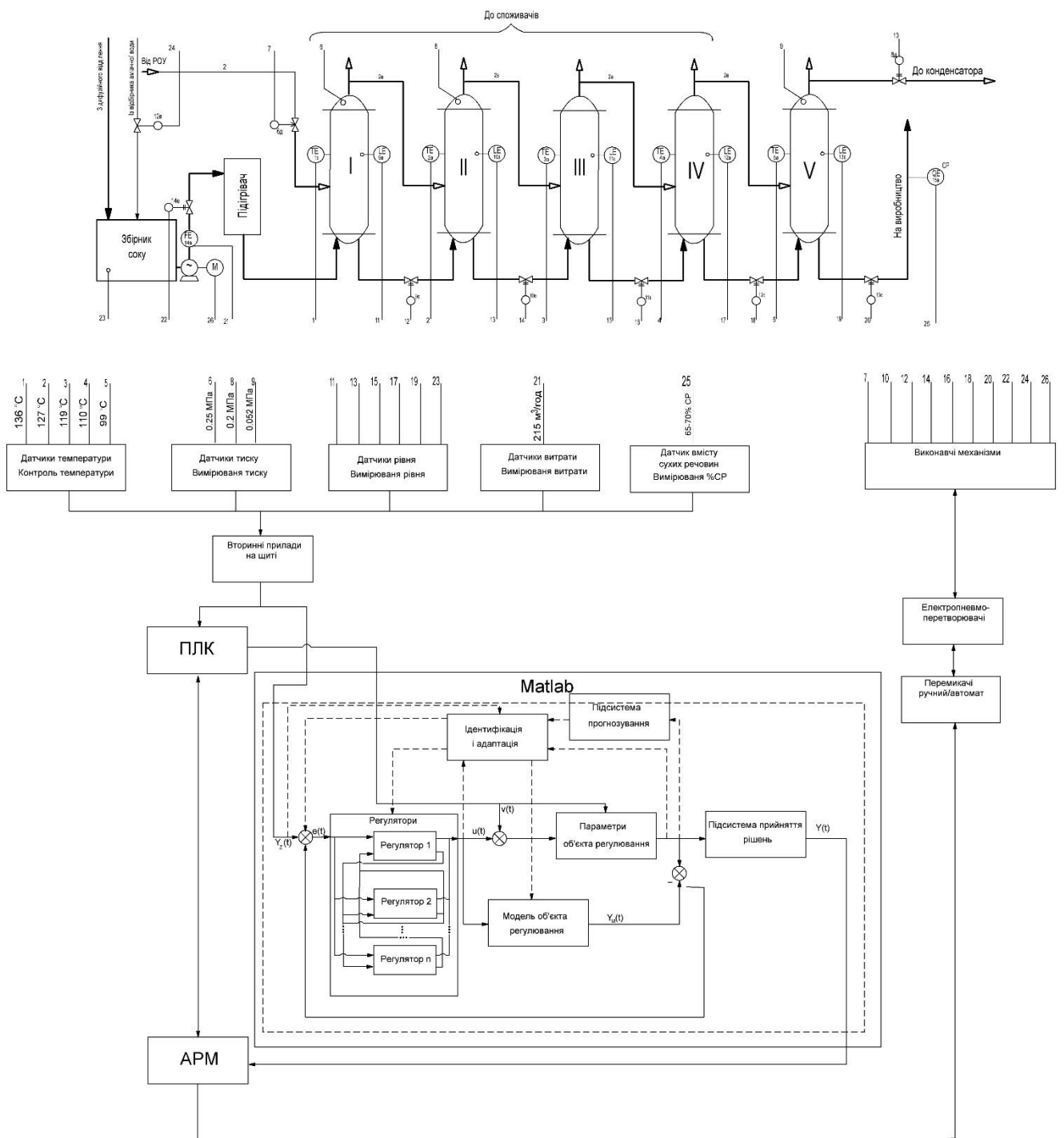


Рис. 57. Функціональна структура системи управління із підсистемою підтримки прийняття рішень

Висновки

1. У інших дослідженнях велика частина проблематики інтелектуального керування у процесі випарювання залишається невирішеною. Використання нечітких регуляторів відбувається лише в окремих специфічних випадках. Крім того відсутнє порівняння використання інтелектуальних регуляторів з класичними. Також відсутнє висвітлення можливості комбінування роботи кількох типів інтелектуальних регуляторів у разі виникнення необхідності. Крім того відсутні чіткі засоби прогнозування роботи інтелектуальних регуляторів.
2. На основі отриманих моделей було розроблено алгоритм прогнозування для системи нечіткого та нейромережевого регулювання. Були розраховані показники оцінки помилки прогнозування для випарної установки. Оскільки, у нашому випадку, значення середньої відносної похибки становить 5%, то звідси випливає, що точність моделі становить 95%, що є дуже високою оцінкою якості нашої системи прогнозування. Оскільки точність моделі прогнозування є дуже близькою до 100%, то її можна вважати оптимальною.
3. Окрім точності модель прогнозування також має бути стабільною. Порівняння залежності відносної похибки від шуму доводить, що при зміні параметрів, зміна відносної похибки проходить стабільно, отже, модель прогнозування можна вважати стабільною.
4. Для підняття ефективності роботи системи, на основі моделі прогнозування також необхідно розробити підсистему прийняття рішень, яка дозволить виробити рекомендації з коригування технологічних параметрів процесу випарювання. Метою даної підсистеми є можливість користувача швидко приймати рішення на основі прогнозованих даних.
5. Для правильної розробки підсистеми прийняття рішень було проведено збір даних. Проведено розрахунок оцінок пріоритетів запитів модифікації по кожній проблемі, які отримані від користувачів у вигляді часових рядів. Розрахунок цих оцінок дозволив відобразити інформацію по запитах до змін у людино-машинному інтерфейсі більш детально. Після цього розраховано

оцінка пріоритету користувача за якою можна зробити висновок, що найбільш важливою при виведенні інформації підсистемою прийняття рішень є функція виведення інформації про можливе внесення змін до параметрів регулювання інших контурів регулювання. Також дуже важливою є наявність функції перегляду прогнозування регулювання з використанням різних типів регуляторів. Тому під час роботи підсистеми прийняття рішень дані функції матимуть найвищий пріоритет.

6. Описано алгоритм роботи людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки. Даний алгоритм відображає принцип роботи головного екрану системи, екранів керування окремими контурами, екранів відображення тривоги, подій, архіву та трендів. Крім того, даний алгоритм описує роботу системи виведення рекомендацій, прогнозування та роботи нечіткого та нейромережевого регуляторів.
7. Описано структурну схему роботи людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки. Розглянуто взаємодію головного екрану з іншими екранами та елементами людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки. Також розглянуто структуру взаємодії виконання прогнозування та обраного режиму регулювання з екранами та елементами людино-машинного інтерфейсу системи автоматизації випарної установки. Більш детально з реалізацією системи можна ознайомитись у наступному розділі.

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

4.1. Вимоги до технічного та програмного забезпечення

Для реалізації системи необхідно використовувати сучасне програмне та технічне забезпечення.

У даному проекті використовується ПЛК фірми Schneider Electric Modicon M340.

Детальніше перелік модулів наведено у таблиці 12.

Таблиця 12. Перелік модулів Schneider Electric, які використовуються у дослідженні.

Поз.	Найменування та технічна характеристика засобу	Тип, марка, позначення документу, листа опитування	Завод-виготовлювач/виробник
1	2	3	4
1	Модуль живлення CPS 2000 0.3 A	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
2	Процесорний модуль CPU P34 2020	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
3	Модуль аналогових входів BMX AMI 0810	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
4	Модуль аналогових виходів BMX AMO 0802	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
5	Модуль дискретних входів BMX DDI 1602	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
6	Модуль дискретних виходів BMX DDO 1602	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
7	Платформа модулів вводу/виводу BMX XBP 0800	Catalogue September 2014 Modicon M340 automation platform	Schneider Electric Франція
8	Клемні колодки ХТ4.1 (щит PDS) з прохідними клемами та 3 контакти		
9	Мережні з'єднувачі XS1 – неекранований RJ-45 типу вилка		

10	Мережеві кабелі ХВТ Z968 - комунікаційний адаптер TSX Premium □ ХВТ Magelis LTP-LTP - кабель на базі подвійної екранованої витой пари, КПВ-ВП (100) 4*2*0,48 (UTP-CAT.5E-SL) UTP – UTP кабель 4х2 CAT5e 0,5 мм PVC		
----	---	--	--

На рис. 58. зображена схема комплектування ПЛК.

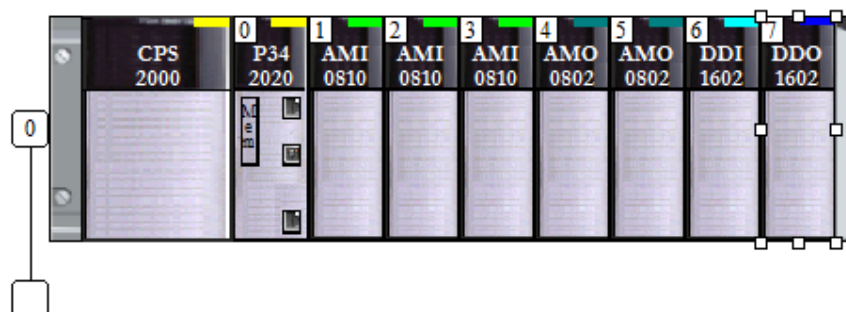


Рис. 58. Схема комплектування ПЛК.

Також у даному дослідженні використовується комп'ютер на базі процесора Intel Core 2 Duo з 4Гб оперативної пам'яті та жорстким диском на 500 Гб.

У дослідженні використовуються наступні програмні засоби:

- операційна система Microsoft Windows 7;
- пакет програм для вирішення задач технічних розрахунків Matlab R2017b;
- середовище програмування промислових контролерів Schneider Electric Unity Pro 7.0;
- середовище для програмування засобів людино-машинного інтерфейсу COPA-DATA Zenon Supervisor 7.60 SP0 36068 x64;
- середовище для запуску засобів людино-машинного інтерфейсу COPA-DATA Zenon Runtime 7.60.

4.2. Перелік елементів на екрані людино-машинного інтерфейсу

На рисунку 59. виділено всі активні елементи людино-машинного інтерфейсу.

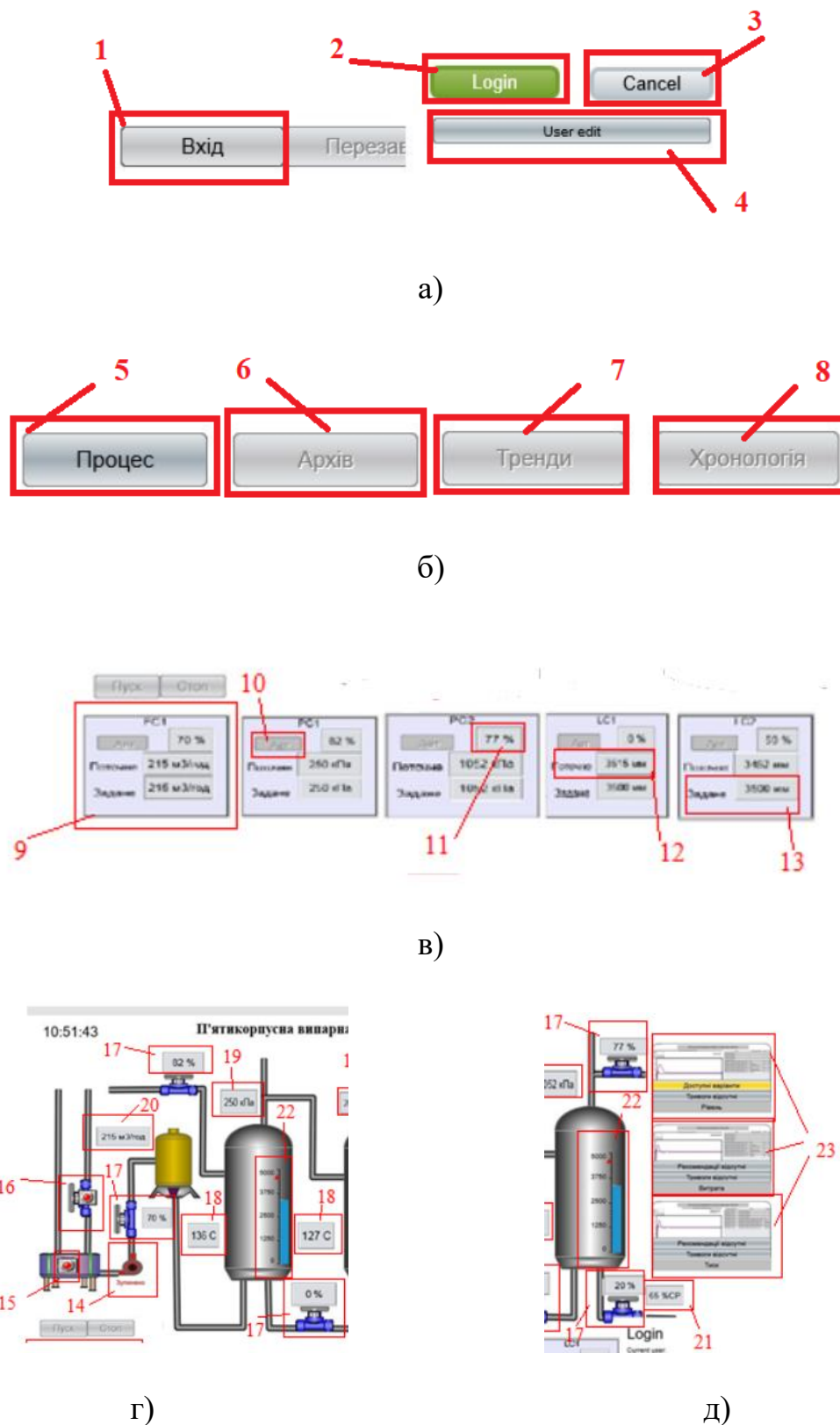


Рис. 59. Активні елементи головного екрану людино-машинного інтерфейсу.

1 – кнопка входу. При натисканні автоматично відкривається вікно авторизації та реєстрації користувача.

2 – кнопка авторизації. Якщо логін та пароль користувача введено вірно, то на екрані ЛМІ стануть активними елементи, які відповідають наданим користувачу правам.

3 – кнопка відміни авторизації.

4 – кнопка реєстрації нового користувача. Доступна Адміністратору або користувачу, який авторизувався з відповідним правом доступу (за замовчанням – це користувач «Інженер»).

5 – перехід на екран «Процес».

6 – Перехід на екран «Архів».

7 – Перехід на екран «Тренди».

8 – Перехід на екран «Хронологія».

9 – Елемент управління налаштуваннями регулятора. Стає доступним лише користувачам з відповідними правами доступу.

10 – Перемикач з ручного режиму регулювання в автоматичний і навпаки.

11 – Положення РО. Користувач може вносити зміни лише якщо включено ручний режим.

12 – Поточне значення параметра в регулюємому контурі. Не може редагуватися користувачем.

13 – Задане значення параметра в регулюємому контурі. Вноситься користувачем.

14 – Насос. Має кольорову та текстову індикацію двох станів: «Зупинено» та «Насос в роботі». Може перемикатися користувачем лише в ручному режимі роботи.

15 – Індикація рівня у збірнику соку. Зелений – збірник заповнено, червоний – збірник неповний. Не може змінюватись користувачем.

16 – Дискретний клапан. Червоний – клапан закрито, зелений – клапан відкрито. Може змінюватись користувачем у ручному режимі.

17 – Регулюючий орган із вказаним положенням. Користувач може змінювати лише у ручному режимі.

18 – значення температури у корпусах. Не можуть змінюватися користувачем.

19 – значення тиску у корпусах. Не можуть змінюватися користувачем.

20 – витрата бурякового соку. Не може змінюватися користувачем.

21 – вміст сухих речовин у цукровому сиропі. Не може змінюватися користувачем.

22 – Рівень у корпусі. Не може змінюватись користувачем.

23 – Кнопки швидкого переходу до екранів додаткових налаштувань контурів та головного екрану.

На рис. 60. відображено активні елементи на екранах налаштування окремих контурів.

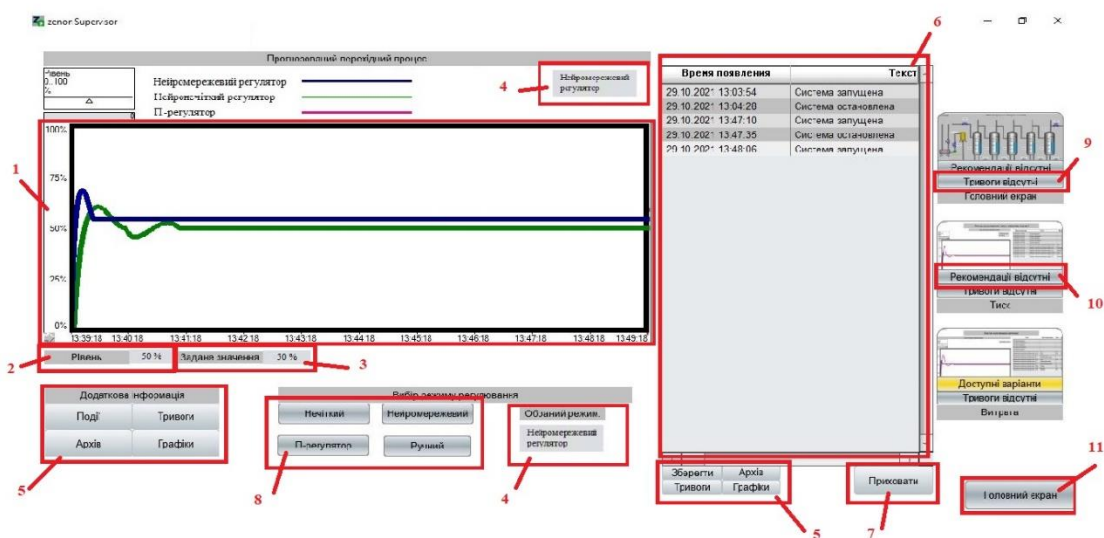


Рис. 60. Активні елементи екранів налаштування окремих контурів.

1 – Відображення прогнозованого перехідного процесу. Не може змінюватись користувачем.

2 – Поточне значення параметра в регулюємому контурі. Не може редагуватися користувачем.

3 – Задане значення параметра в регулюємому контурі. Вноситься користувачем.

4 – Відображення обраного режиму регулювання.

5 – Кнопки вибору режимів відображення додаткової інформації.

6 – Вікно відображення додаткової інформації.

7 – Кнопка закриття вікна з додатковою інформацією.

8 – Кнопки вибору типу регулювання.

9 – Кнопка швидкого переходу у разі виникнення тривоги.

10 – При виникненні рекомендацій про налаштування вмикається кольорова індикація.

11 – Кнопка повернення на головний екран.

4.3. Розробка головного екрану системи та інтерфейсу взаємодії

Сторінка авторизації клієнта

Для того, щоб запобігти несанкціонованому доступу до ЛМІ, використовується сторінка авторизації клієнта. Неавторизований користувач може лише спостерігати за перебігом процесу на однойменному екрані. Всі недоступні елементи підсвічуються сірим кольором (рис. 61.).

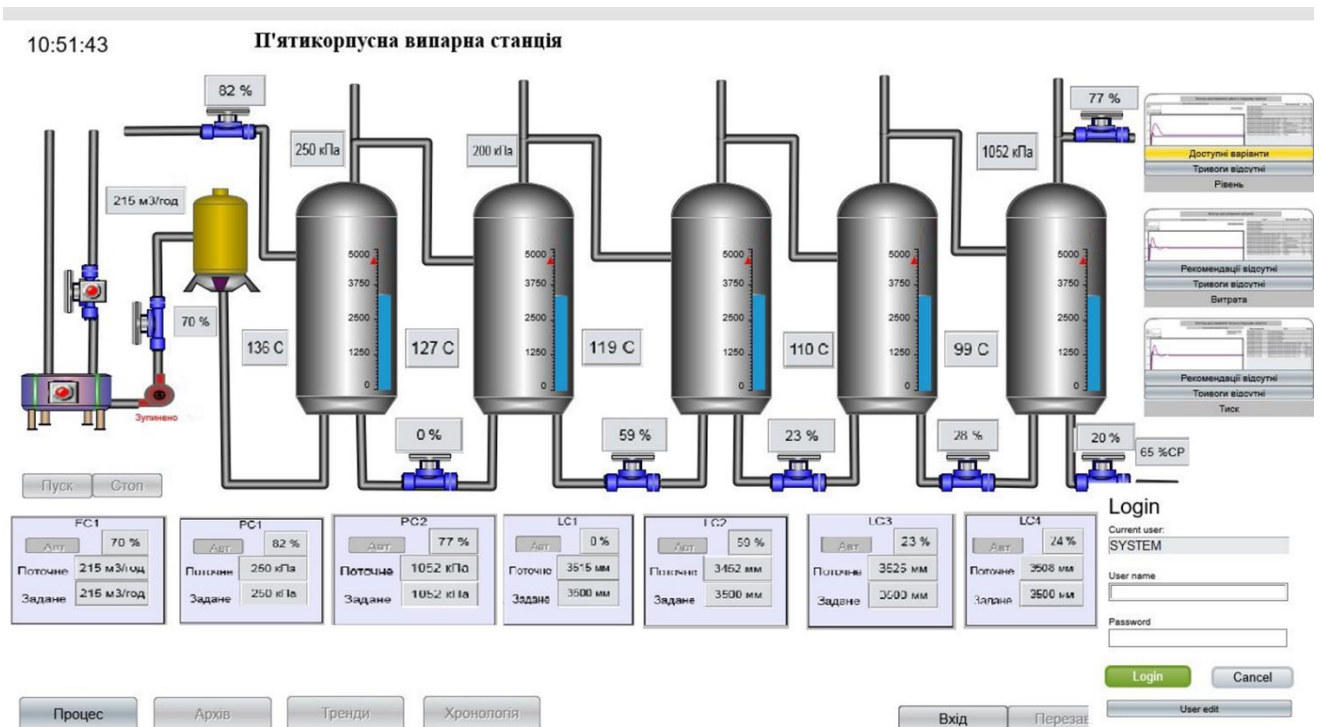


Рис. 61. Перегляд екрану «Процес» неавторизованим користувачем

За замовчанням в системі зареєстровано двох користувачів «Оператор» та «Інженер», але користувач «Інженер» має право реєструвати додаткових користувачів.

Користувач «Оператор» має доступ до всіх екранів та може змінювати всі налаштування, але виключенням є те, що даний користувач не може перезавантажити операторський екран та здійснити вихід з ЛМІ

Користувач «Інженер» має доступ до всіх екранів та може змінювати всі налаштування (рис. 62.), крім того він може перезавантажувати середовище виконання, закривати ЛМІ та реєструвати або видаляти користувачів

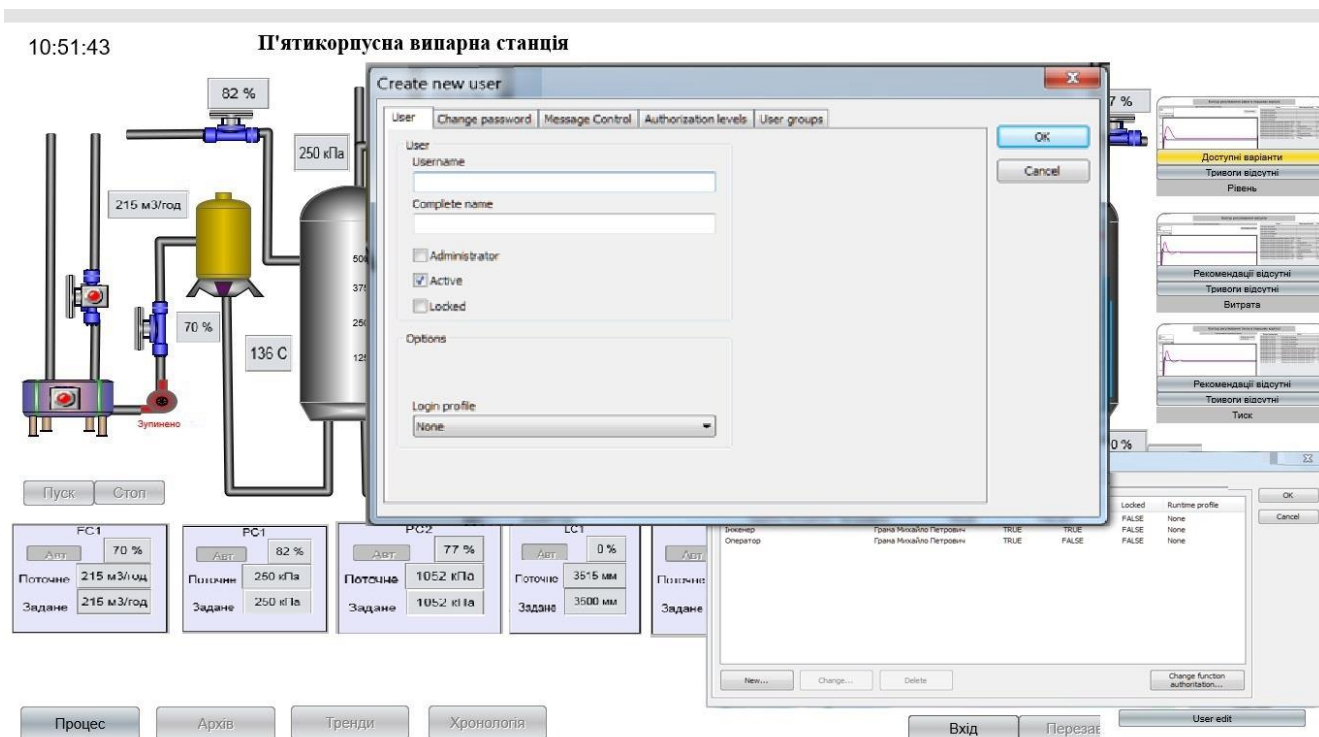


Рис. 62. Реєстрація нового користувача користувачем «Інженер»

Дисплейна мнемосхема випарної установки

На дисплейній мнемосхемі випарної установки відображаються основні елементи системи та параметри процесів в реальному часі. Ідентифікований користувач може запускати або вимикати систему, переводити регулятори в ручний або автоматичний режим, змінювати завдання регуляторам та керувати регулювальними органами в ручному режимі. Праворуч на головному екрані

розташовується зручна панель із кнопками швидкого переходу до екранів налаштування рівня, тиску та витрати. Також на даних кнопках присутня інформація щодо виведення рекомендацій про зміни у виборі регулятора та інформація про виникнення тривог у певних контурах.

Сторінка перегляду архіву

На даній сторінці користувач може переглянути архів значень усіх параметрів (рис. 63.), що використовувалися в даній системі за певний період часу. За замовченням цей період часу становить одну добу, але його можна збільшити або зменшити. Доступ до даної сторінки мають лише авторизовані користувачі з відповідним рівнем доступу (1 і вище).

Filter
Relative period of time: 0 01:00:00

Filter profile

Date / time	Variable	Identification	Value	Text	Measuring	Status
25.05.2017 16:24:00.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:00.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:05.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:05.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:05.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:05.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:05.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:10.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:10.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:10.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:10.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:10.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:15.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:15.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:15.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:15.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:15.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:20.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:20.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:20.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:20.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:20.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:25.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:25.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:25.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:25.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:25.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:30.000	Температура:	136			C	SPONT
25.05.2017 16:24:30.000	Температура:	127			C	SPONT
25.05.2017 16:24:30.000	Температура:	119			C	SPONT
25.05.2017 16:24:30.000	Температура:	110			C	SPONT
25.05.2017 16:24:30.000	Температура:	99			C	SPONT
25.05.2017 16:24:35.000	Температура:	136			C	SPONT

Short name
TA

Number of values
1755

Archive status
Active

Number invalid
260

Archive

Грама Михайло Петрович

Рис. 63. Сторінка перегляду архіву

Сторінка перегляду трендів

На даній сторінці користувач може переглянути графічне відображення значень усіх параметрів (рис. 64.), що використовувалися в даній системі за певний період часу. Кількість відображуваних параметрів можна змінювати. За замовченням цей період часу становить одну добу, але його можна збільшити або зменшити. Доступ до даної сторінки мають лише авторизовані користувачі з відповідним рівнем доступу (1 і вище).



Рис. 64. Сторінка перегляду трендів

Сторінка перегляду хронології подій

На даній сторінці в хронологічній послідовності відображуються всі зміни, які здійснив оператор та про критичні значення параметрів (рис. 65.).

Filter
["*"]["T,Rel:0d,1h,0m,0s"]

Filter...

Stop

Filter profiles

Save

Import

Export

Delete

Number
22

Time received	Text	Variable name	Value	Mea...	User - full name
25.05.2017 16:16:47	System was started				SYSTEM
25.05.2017 16:17:00	System was stopped				SYSTEM
25.05.2017 16:20:53	System was started				SYSTEM
25.05.2017 16:21:51	System was stopped				SYSTEM
25.05.2017 16:22:01	System was started				SYSTEM
25.05.2017 16:28:52	User 'Оператор - Грама Михайло Петрович' logged				Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:33:21	User 'Інженер - Грама Михайло Петрович' logged				Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:34:02	Низький	Вміст СР	0	%СР	
25.05.2017 16:34:03	Зупинено насос	Насос	0		
25.05.2017 16:34:46	Насос в роботі	Насос	1		
25.05.2017 16:35:48	Project 'DIPLOM1' reloaded				Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:42:20	Invalid user identification! -				Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:52:21	Низький	Вміст СР	0	%СР	
25.05.2017 16:52:22	Зупинено насос	Насос	0		
25.05.2017 16:52:59	Насос в роботі	Насос	1		
25.05.2017 16:55:45	Modify spontaneous value: (4700 мм)	Завдання рівень 1	4700	мм	Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:55:47	Високий рівень	Рівень 1	4707	мм	
25.05.2017 16:57:11	Modify spontaneous value: (0)	Руч\Авт рівень1	0		Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:57:12	Переведено в ручний режим	Руч\Авт рівень1	0		
25.05.2017 16:57:12	Modify spontaneous value: (1)	Руч\Авт рівень1	1		Грама Михайло Пет
25.05.2017 16:57:13	Переведено в автоматичний режим	Руч\Авт рівень1	1		
25.05.2017 16:57:14	Високий рівень	Рівень1	4703	мм	

Comment

Print

Процес

Архів

Тренди

Хронологія

Тривоги

Грама Михайло Петрович

Login

Reload

EXIT

Рис. 65. Сторінка перегляду хронології подій.

Сторінка перегляду журналу тривог

В журналі тривог реєструються всі критичні або аварійні значення параметрів (рис. 69). Всі критичні або аварійні значення параметрів можна квітувати, тривоги, що стосуються контрольованих параметрів можна видалити. Крім того, повідомлення про неквітовану тривогу відображається на всіх сторінках (рис. 70). На сторінці «Процес» параметри, що знаходяться на критичному рівні, відображаються жовтим кольором, параметри, що досягли аварійного значення, відображаються червоним кольором. Крім того відображення неквітованих параметрів супроводжується блимання.

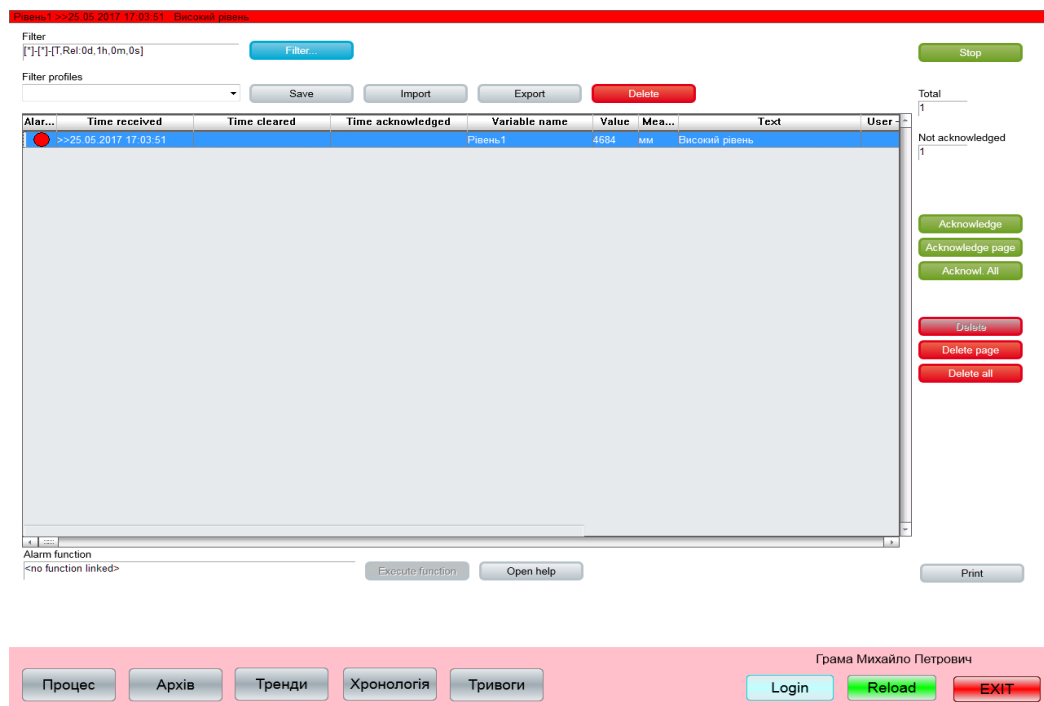


Рис. 66. Сторінка перегляду тривог

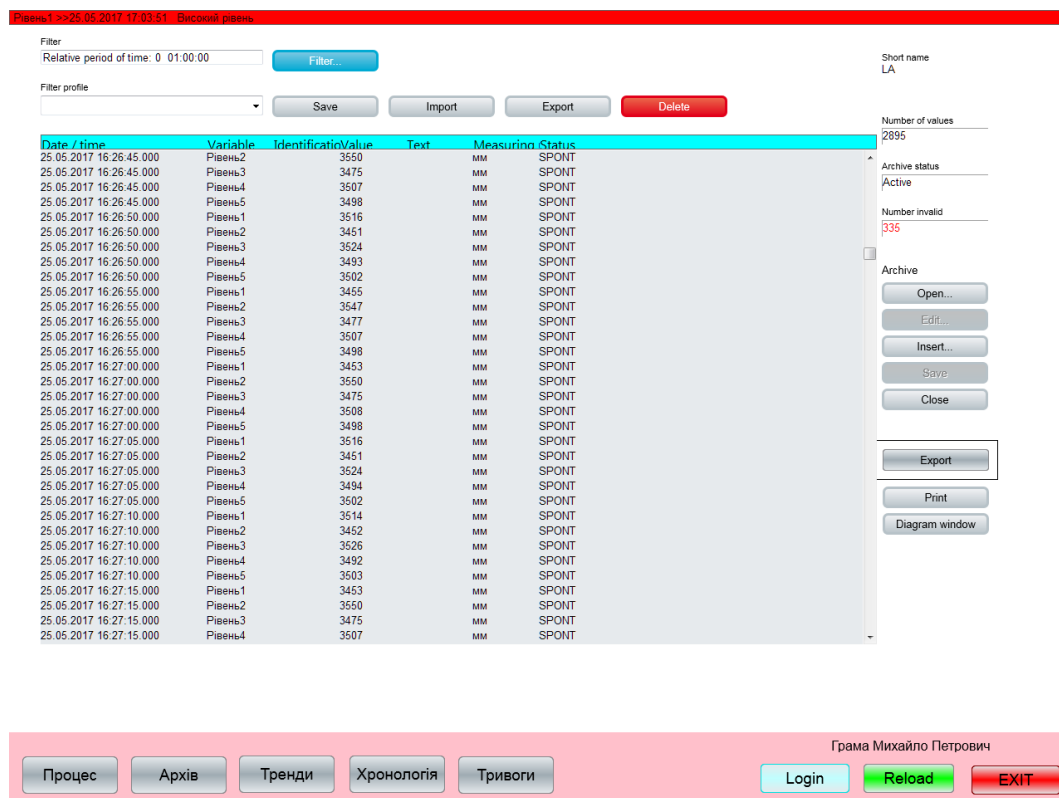


Рис. 67. Відображення повідомлення про тривогу на інших сторінках (сторінка «Архів»)

4.4. Розробка екранів налаштування контуру регулювання рівня

Для більш точного та зручного налаштування контурів розроблено окремі екрани налаштування. На екрані налаштування рівня (рис. 68.) зображено прогнозований перехідний процес по каналу регулювання рівня у даному корпусі. Перевагою використання даного екрану над головним є більша кількість функцій налаштування даного контуру регулювання. На даному екрані можна обирати тип регулювання. Таким чином, за необхідності, у користувача, який має необхідні права надані адміністратором, є можливість обирати між використанням П-, нечіткого та нейромережевого регуляторів. Крім того, на даному екрані виведено інформацію про те, в якому режимі зараз працює система. Як і на головному екрані, користувач має можливість контролю та регулювання наведеного процесу, а саме: введення заданого значення параметру та перегляду тривог.

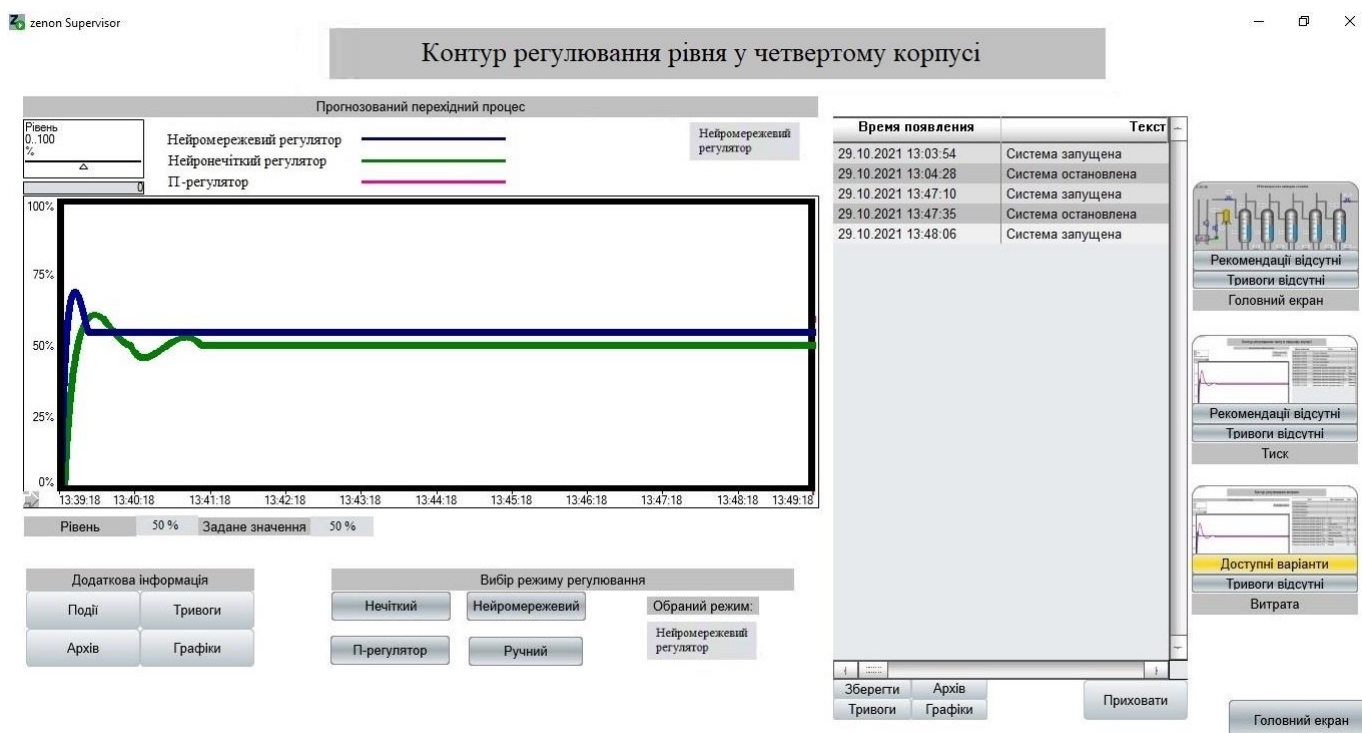


Рис. 68. Відображення екранів налаштування контуру регулювання рівня

Праворуч на екрані регулювання рівня розташовується зручна панель із кнопками швидкого переходу до екранів налаштування тиску, витрати та на головний екран. Також на даних кнопках присутня інформація щодо виведення

рекомендацій про зміни у виборі регулятора та інформація про виникнення тривоги у певних контурах.

Відображення зміни налаштувань рівня можна побачити на рис. 69.

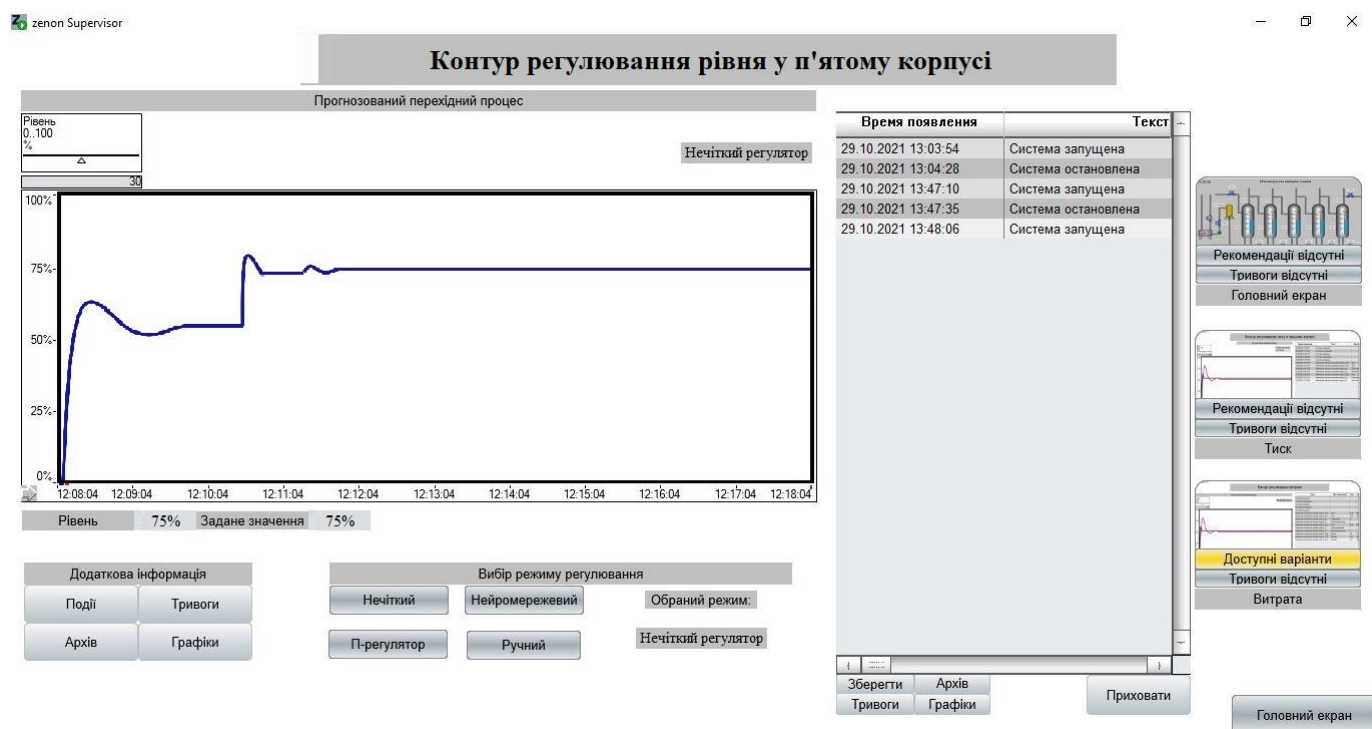


Рис. 69. Зміна налаштувань рівня

Також на екрані присутня можливість відкриття спрощених версій екранів подій, тривоги, архіву та графіків.

4.5. Розробка екранів налаштування контуру регулювання тиску

Як і на екрані налаштування рівня (розділ 4.2.), на екрані регулювання тиску (рис. 70.) зображено прогнозований перехідний процес по каналу регулювання рівня у даному корпусі. Перевагою використання даного екрану над головним є більша кількість функцій налаштування даного контуру регулювання. За аналогією з розділом 4.2. на даному екрані можна обирати тип регулювання. Таким чином, за необхідності, у користувача, який має необхідні права надані адміністратором, є можливість обирати між використанням ПІ-, нечіткого та нейромережевого регуляторів. Крім того, на даному екрані виведено інформацію про те, в якому режимі зараз працює система. Як і на головному екрані, користувач має можливість контролю та регулювання наведеного процесу, а саме: введення заданого значення параметру та перегляду тривоги.

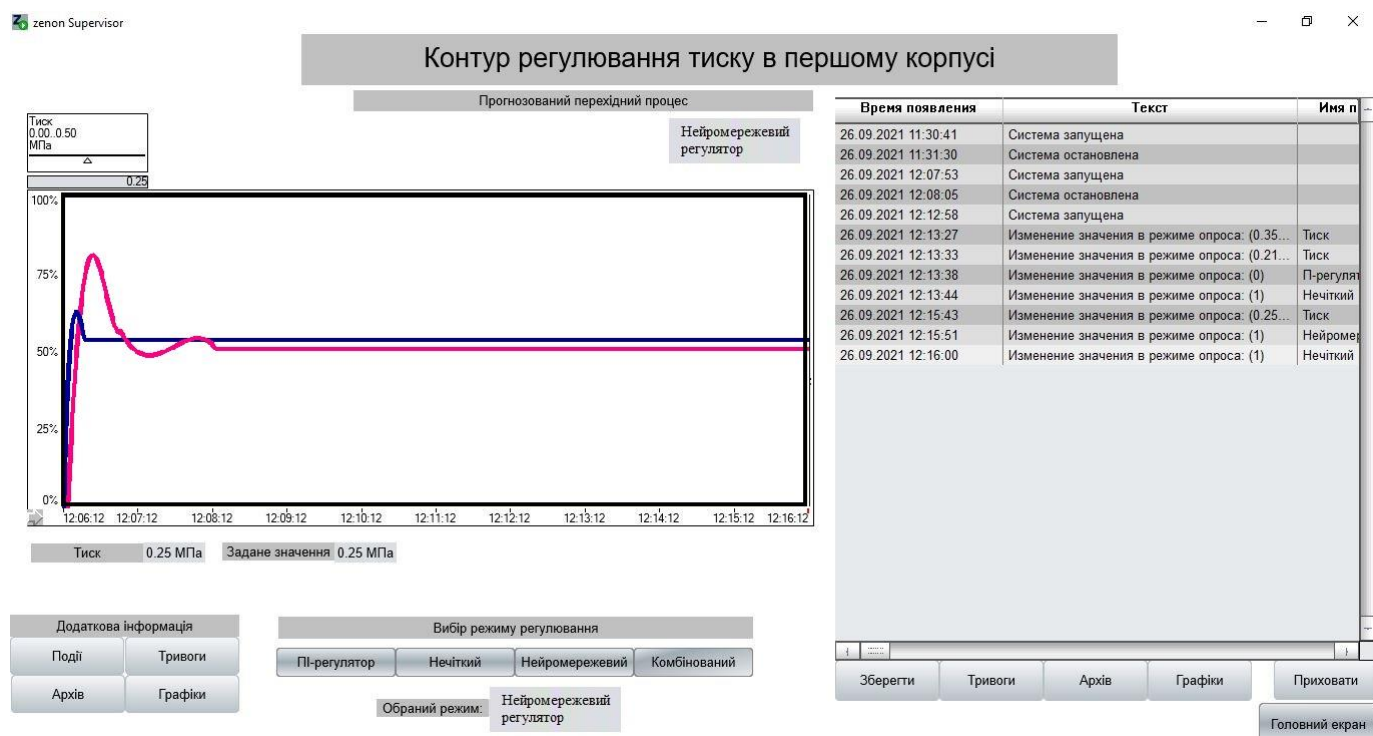


Рис. 70. Відображення екранів налаштування контуру регулювання тиску

Праворуч на екрані регулювання тиску розташовується зручна панель із кнопками швидкого переходу до екранів налаштування рівня, витрати та на головний екран. Також на даних кнопках присутня інформація щодо виведення

рекомендацій про зміни у виборі регулятора та інформація про виникнення тривоги у певних контурах.

Також на екрані присутня можливість відкриття спрощених версій екранів подій, тривоги, архіву та графіків.

4.6. Розробка екранів налаштування контуру регулювання витрати

На екрані налаштування витрати (рис. 71.) зображено прогнозований перехідний процес по каналу регулювання витрати у даному корпусі Аналогічно до екранів, наведених у розділах 4.2. та 4.3. перевагою використання даного екрану над головним є більша кількість функцій налаштування даного контуру регулювання. На даному екрані можна обирати тип регулювання. Таким чином, за необхідності, у користувача, який має необхідні права надані адміністратором, є можливість обирати між використанням ПІ-, нечіткого та нейромережевого регуляторів. Крім того, на даному екрані виведено інформацію про те, в якому режимі зараз працює система. Як і на головному екрані, користувач має можливість контролю та регулювання наведеного процесу, а саме: введення заданого значення параметру та перегляду тривог.

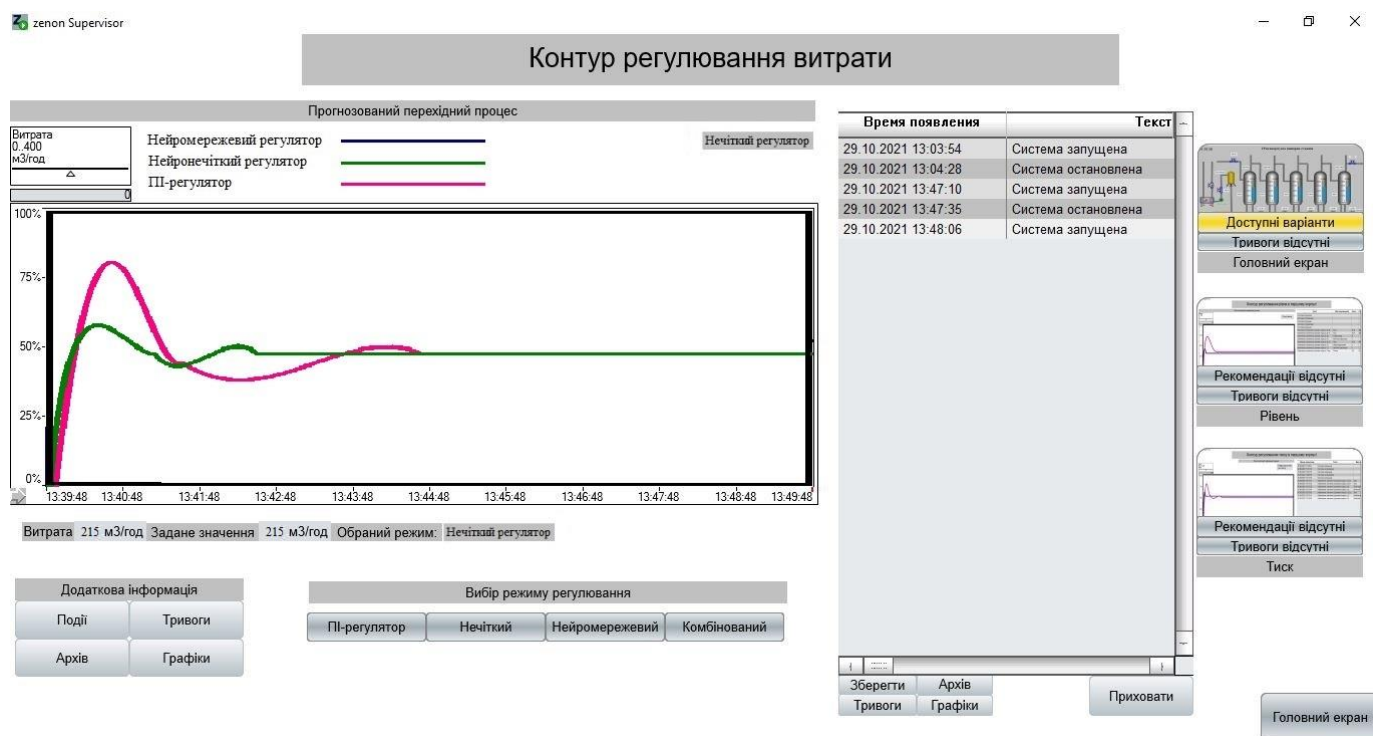


Рис. 71. Відображення екранів налаштування контуру регулювання витрати

Праворуч на екрані регулювання витрати розташовується зручна панель із кнопками швидкого переходу до екранів налаштування рівня, тиску та на головний екран. Також на даних кнопках присутня інформація щодо виведення рекомендацій про зміни у виборі регулятора та інформація про виникнення тривог у певних контурах.

Також на екрані присутня можливість відкриття спрощених версій екранів подій, тривоги, архіву та графіків.

Висновки

1. У даному розділі було розглянуто реалізацію людино-машинного інтерфейсу системи відповідно до вимог міжнародних стандартів та безпеки. Екрани операторів були розроблені таким чином, щоб досягти максимальної зручності та інтуїтивної зрозумілості для навіть непідготованого користувача.
2. З метою забезпечення максимального рівня безпеки було розроблено процес авторизації користувачів з декількома рівнями надання прав користувача. Таким чином неавторизований користувач не може впливати на перебіг процесу випарювання взагалі, користувач з обмеженими правами не зможе вийти за межі своїх повноважень, а користувач з правами «Адміністратор» має права на повний контроль та вплив на процес, а також на додавання інших користувачів з обмеженням прав.
3. Було розроблено екран «Архів», який дозволяє переглядати історію зміни всіх параметрів на протязі певного часу. За замовченням виставлено термін зберігання архіву одну добу, але користувачі «Адміністратор» та «Інженер» мають права на зміну цього періоду часу у разі виникнення необхідності.
4. Для графічного відображення зміни певних параметрів було розроблено екран «Тренди». Користувачі можуть змінювати параметри, які відображаються на даному екрані та час їх збереження та відображення.
5. Екран перегляду хронології подій дозволяє швидко відслідковувати основні зміни, які відбувались у системі, у тому числі яким користувачем і коли було проведено втручання у роботу системи (зміни завдання, зміни режиму роботи тощо).
6. Сторінка перегляду тривог дозволяє користувачу швидко помітити і відреагувати на позаштатні ситуації. Окрім повідомлення про тривогу на головному екрані, вони також заносяться до журналу тривог. Перевагою журналу тривог є доступ до більш детальної інформації щодо виникнення

позаштатної ситуації. Крім того, усі тривоги, які виникали під час процесу випарювання зберігаються у журналі «Архів».

7. Також було розроблено окремі екрани для контурів налаштування рівня, тиску та витрати. Дані екрани дозволяють провести більш точне налаштування параметрів регулювання кожного контуру регулювання. За допомогою даних екранів можна обрати тип регулювання для кожного контуру окремо (класичний регулятор, нечіткий регулятор, нейромережевий регулятор), подивитись у якому режимі працює кожен контур у даний момент часу, подивитись прогнозований перехідний процес при використанні того чи іншого типу регулювання.
8. Розроблено зручну систему навігації між головним екраном та додатковими екранами налаштування контурів. Панель швидкої навігації, яка розташована праворуч дозволяє користувачу швидко переходити до розширених налаштувань усіх контурів регулювання та при цьому бачити всю інформацію про перебіг процесу у інших контурах. Крім того дана панель дозволяє користувачу швидко реагувати на виникнення тривог у інших контурах та побачити рекомендації щодо покращення роботи інших контурів.

ВИСНОВКИ

1. Більшість сучасних систем автоматизації процесу випарювання використовує переважно класичні регулятори. Наприклад, П-регулятори для регулювання рівня соку у корпусах. Недоліком таких регуляторів є наявність статичної похибки, амплітуда коливання, час регулювання. Тому у даному дослідженні запропоновано використання інтелектуальних регуляторів, зокрема нечітких, дозволить знизити ризик виникнення усіх зазначених вище проблем. Велика частина проблематики, яку розглянуто в інших існуючих сучасних дослідженнях, для інтелектуального керування у процесі випарювання залишається невирішеною. Використання нечітких регуляторів відбувається лише в окремих специфічних випадках. Крім того відсутнє порівняння використання інтелектуальних регуляторів з класичними. Також відсутнє висвітлення можливості комбінування використання кількох типів інтелектуальних регуляторів у разі виникнення необхідності. Крім того відсутні чіткі засоби прогнозування роботи інтелектуальних регуляторів.
2. У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до удосконалення систем автоматизованого управління випарною установкою шляхом використання інтелектуальних регуляторів, розробка засобів прогнозування функціонування системи випарювання та включення підсистеми підтримки прийняття рішень, яка на основі розроблених моделей і алгоритмів формує рекомендації оператору для прийняття ефективних управлінських рішень з метою підтримання якісних показників роботи установки.
3. Отримано результати моделювання роботи системи з використанням класичних, нейромережевих та нечітких регуляторів. Порівняння результатів моделювання показало, що при використанні нейромережевих регуляторів значно зменшується час регулювання порівняно з використанням класичних та нечітких регуляторів. Проте використання нечітких регуляторів забезпечує меншу амплітуду коливання, ніж використання класичних та нейромережевих регуляторів та дозволяє позбутися статичної похибки. Тому було

запропоновано комбінування використання нейромережевого та нечіткого регуляторів, а саме: можливо використовувати систему випарювання у режимі нейромережевого регулювання для зменшення часу регулювання, а потім переходити у режим регулювання за допомогою нейромережевого регулятора з метою запобігання виникнення статичної похибки.

4. Результати дослідження показали, що, при використанні нейромережевих регуляторів значно зменшується час регулювання порівняно з використанням класичних та нечітких регуляторів. Проте використання нечітких регуляторів забезпечує меншу амплітуду коливання, ніж використання класичних та нейромережевих регуляторів та дозволяє позбутися статичної похибки. Тому було запропоновано комбінування роботи нейромережевого та нечіткого регуляторів, а саме: можливо використовувати систему випарювання у режимі нейромережевого регулювання для зменшення часу регулювання, а потім переходити у режим регулювання за допомогою нейромережевого регулятора з метою запобігання виникнення статичної похибки. Модель було досліджено на адекватність за d_A -алгоритмом. Розрахунки показали, що модель є адекватною, оскільки показник точності моделі δ не перевищує її максимального значення ϵ ($\delta_{\max}=0,9$).
5. З метою зменшення статичної похибки та щоб позбутися позаштатних ситуацій під час комбінування роботи регуляторів було розроблено модель прогнозування функціонування системи нечіткого та нейромережевого регулювання. Крім того, така модель дозволяє також враховувати вплив зовнішніх чинників, які можуть впливати на систему.
6. Для підвищення ефективності функціонування системи, на основі моделі прогнозування також було розроблено підсистему прийняття рішень, яка дозволяє виробити рекомендації з коригування технологічних параметрів процесу випарювання шляхом обробки експертних даних, зібраних і систематизованих за допомогою розробленої функціональної моделі за методикою розрахунку і прогнозування пріоритетів користувачів.

7. Для роботи з розробленими у дисертації моделями випарної установки з використанням класичних, нейромережевих та нечітких регуляторів, моделлю прогнозування та підсистемою прийняття рішень було розроблено людино-машинний інтерфейс системи відповідно до вимог міжнародних стандартів та безпеки. Екрани операторів були розроблені таким чином, щоб досягти максимальної зручності та інтуїтивної зрозумілості для навіть не підготованого користувача.

Список використаної літератури

1. Грама М, Сідлецький В, Ельперін І, Аналіз системи автоматизації випарної установки з нейромережевим регулятором. Наукові праці НУХТ. 2020; 26(6): 7-15.
2. Lajos R. A few thoughts on automation in sugar manufacturing. International Sugar Journal. 2003; 105(1252): 1-14.
3. Anuar N, Aziz H, Ahmad R. Integrated chemical, technology & equipment process knowledge management system based on risk based process safety. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2019; 702(1): 1-10.
4. Cyklis P. Selected issues of the multistage evaporator thermodynamics. Technical transactions. 2015; 1: 4-10.
5. Gash J, Shuttleworth W. Evaporation. Wallingford: IAHS Press; 2007. 526 p.
6. Чернобыльский И. Выпарные установки. Киев: КГУ; 1960. 240 с.
7. Бахмат М, Ігнат'єв М, Вітвіцький І. Буряковий цукор технології виробництва. Кам'янець-Подільський: Абетка - НОВА; 2004. 372 с.
8. Малезик І, Циганков С. Процеси і апарати харчових виробництв. Київ: НУХТ; 2003. 400 с.
9. Ladakis D, Papapostolou H, Vlysidis A, Koutinas A. Inventory of food processing side streams in European Union and prospects for biorefinery development. Food Industry Wastes. 2020;181–199.
10. Westphalen D, Franco M, Macie M. Strategies for process integration of evaporation systems. 14th International Congress of Chemical and Process Engineering. 2000; 7(4): 216.
11. Shield I. Sugar and starch crop supply chains. Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining. 2016; 249–269.
12. Стопакевич А, Улицкая Е. Багатомірне нелінійне управління випарними установками. Автоматика-2011. 2011; 175-176.
13. Улицкая Е. Програмно-технічна структура системи управління випарною установкою. Холодильна техніка і технологія. 2011; 2(130): 84-87.

14. Rabelo S, Paiva L de, Pin T, Pinto L, Tovar L, Nakasu P. Chemical and energy potential of sugarcane. *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. 2020; 141–163.
15. East C, Doherty W, Fellows C. Scale in sugar juice evaporators: Types, cases, and prevention. *Water-Formed Deposits*. 2022; 435–455.
16. Piri A, Hazervazifeh A, Nikbakht A. A comprehensive analysis of uncertainty in thermal utilities: 3E case study of a sugar plant. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Oct; 53:102.
17. Мамчур В. Разработка, исследование и внедрение системы автоматического управления многокорпусной выпарной установки с развитым пароотбором для пищевой промышленности. Автореферат: Ддсс. канд.техн.наук. Одесса; 1969.
18. Henao Toro S, Gómez-Narváez F, Contreras-Calderón J, Ariseto A. Acrylamide in sugar products. *Current Opinion in Food Science*. 2022 Jun; 45:841.
19. Pawar N, Moharkar S, Agrawal S, Dhamole P, Methekar R. Crystallization of erythromycin extracted using novel phase separation “sugaring-out extraction”: A combined modelling and experimental approach. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021 Dec; 169:108.
20. Либерман И, Гальперан Д, Бабенко Н, Армер В. Динамика тепловых процессов в энергетике и технологии. Киев: Наукова думка; 1975; 55-59.
21. Кон Л, Муратов Г, Мамчур В, Полоник В. Рациональный способ управления многокорпусной выпарной установкой с развитым пароотбором. Одесса: Труды и рефераты ин-та. Пищепромышленная автоматика; 1969; 15-25.
22. Ляшенко С. Автоматизация технологических процессов сахарного производства. Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення: матеріали між нар. наук.-техн. конф. 2011; 63-65.
23. Castro R, Alves R, Nascimento C. Dynamic simulation of multiple-effect evaporation. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022 Jun; 34: 135.

- 24.Ладанюк А, Архангельська К, Власенко Л. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: Навчальний посібник [Текст]. Київ: НУХТ; 2014. 274.
- 25.Велик В, Федоткин Й. Моделирование и оптимизация выпарных установок с пароотбором. Киев: Техника; 1974, 312.
- 26.Palacios-Bereche M, Palacios-Bereche R, Ensinas A, Gallego A, Modesto M, Nebra S. Brazilian sugar cane industry – A survey on future improvements in the process energy management. Energy. 2022 Nov; 259: 124.
- 27.van der Sman R, Jurgens A, Smith A, Renzetti S. Universal strategy for sugar replacement in foods? Food Hydrocolloids. 2022 Dec; 133: 966.
- 28.Власенко Л. Автоматизоване управління підсистемами технологічного комплексу цукрового заводу з використанням методів діагностики і прогнозування: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.07 “Автоматизація технологічних процесів”. Автореферат: НУХТ; 2010.
- 29.Ладанюк А, Кишенько В, Луцька Н, Іващук В. Методи сучасної теорії управління. Київ: НУХТ; 2010. 190.
- 30.Wang Y, Wu X, Wu P, Zhao J, Yang X, Owens G, et al. Enhancing solar steam generation using a highly thermally conductive evaporator support. Science Bulletin. 2021 Sep; 575.
- 31.Tunç M, Akdoğan A, Baltacı C, Kaya Z, Odabaş H. Production of grape pekmez by Ohmic heating-assisted vacuum evaporation. Food Science and Technology International. 2021 Feb 11; 28(1): 72–84.
- 32.Мусиенко В. Микропроцессорная система автоматизации станций Кириковского сахарного завода (диффузия, дефекосатурация, выпарная станция, вертикальный кристаллизатор). Київ: ООО “Скиф Контрол”; 2007; 17.
- 33.Ляшенко С, Фесенко А, Ляшенко А, Беляева И. Обоснование автоматического регулирования производственных процессов сахарных заводов. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Сучасні напрямки

- технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». 2009; 88: 104-109.
- 34.Ладанюк А, Ладанюк О, Бойко Р, Іващук В, Кроніковський Д, Шумігай Д. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : [монографія]. Київ: Інтер Логістик Україна; 2015. 408.
- 35.Henao Toro S, Gómez-Narváez F, Contreras-Calderón J, Ariseto A. Acrylamide in sugar products. *Current Opinion in Food Science*. 2022 Jun; 45: 35-41.
- 36.Cyklis P. Effect of fouling on falling film evaporator performance in industrial conditions of fruit juice concentrate production. *Journal of Food Engineering*. 2022 Mar; 317: 110.
37. Бабіченко А. Промислові засоби автоматизації [Текст]. Харків: НТУ «ХПІ»; 2001. 470.
- 38.Зайченко Ю. Основи проектування інтелектуальних систем [Текст]: навчальний посібник. Київ: Слово; 2004. 352.
- 39.Хоменко Т. Сучасні схеми та обладнання для переробки цукрових буряків. Транспортування, очищення, отримання стружки і дифузійного соку: [навч. посіб.]. Київ: Сталь; 2006. 240.
- 40.Штангеев В, Кобер В, Белостоцкий Л, Штангеева Н. Современные технологии и оборудование свеклосахарного производства. Київ: Цукор України; 2004; 320.
- 41.Чернявская Л. Исследование и разработка методов комплексной химико-технологической оценки качества сырья и продуктов сахарного производства с целью повышения его эффективности: дис... д-ра техн. наук. Київ; НУХТ; 1997. 523.
- 42.Ляшенко С. Автоматизация процессов управления технологическими отделениями сахарного производства на основе нейросетевого подхода: дис... д-ра техн. наук. Харків; ХПІ; 2015. 417.
- 43.Сідлецький В, Ельперін І. Система автоматизації управління процесом сокодобування з підсистемою підтримки прийняття рішень. Інтелектуальні

- системи прийняття рішень та інформаційні технології: Міжнародна наук.-тех. конф.; 2004 травень 19 – 21; Чернівці; 2004; 21-22.
44. Imbachi-Ordonez S. Benchmark study of evaporator cleaning practices in Louisiana cane sugar factories. *Sugar Industry*. 2022 Apr 1; 193–201.
45. Marasinghege C, Broadfoot R, Bottle S, Bartley J, Doherty W, Rackemann D. Investigation on the effect of the heating surface temperature of 1st evaporator on sucrose loss and the degradation of sugarcane juice constituents. *Journal of Food Engineering*. 2022 Sep; 329: 74.
46. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Intelligent automatic control of sugar factory evaporator operation using behavior prediction subsystem. *Ukrainian Food Journal*. 2022 Mar; 11(1): 148–163.
47. Taner T, Sivrioğlu M, Topal H, Dalkılıç A, Wongwises S. A model of energy management analysis, case study of a sugar factory in Turkey. *Sādhana*. 2018 Mar; 43(3): 21-22.
48. Чернявская Л. Сахарная свекла. Проблемы повышения технологических качеств и эффективности переработки. Київ: Фитосоциоцентр; 2003. 308.
49. Хоменко Т. Сучасні схеми та обладнання для переробки цукрових буряків. Транспортування, очищення, отримання стружки і дифузійного соку: [навч. посіб.]. Київ: Сталь; 2006. 240.
50. Борисюк П. Невідкладні питання діяльності цукрової промисловості України Цукор України. 2004; 1(2): 2–4.
51. Дусановський С, Павличенко Л, Павличенко С. Интенсификация свеклосахарного производства. Київ: Сталь; 1990. 132.
52. Skakovskij Yu, Mandro O. Modernizaciya strukturi sistemi keruvannya viparnoyi stancziyi buryakoczukrovogo zavodu na bazi mikroproczesornikh tekhnichnikh zasobiv i program ukrayinskogo virobnicztva. Automation of technological and business processes. 2018; 10(2): 14-15. DOI: 10.15673/atbp.v10i2.972.
53. Markitan S. Puti povysheniya tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelej teplovykh skhem sakharnykh zavodov. *Czukur Ukrayini*. 2001; 5: 6–7.

54. Shtanheiev K. (2015), Purpose installations and thermal schemes of sugar factories. UNIDO. 2015; 5-6.
55. Shtangeyev K, Khristenko V. Pro raczionalne vikoristannya pari v czukrovomu virobnicztvi. Czukor Ukrayini. 2002; 2: 2-3.
56. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Comparison between PID and fuzzy regulator for control evaporator plants. 2019 IEEE 39th International Conference on electronics and nanotechnology (ELNANO), Conference proceedings. 2019; 54–59.
57. Leviczkiy Ya, Dmitruk A, Chernyakhovskij I. Opyt Chortkovskogo sakharnogo zavoda po snizheniyu raskhoda topliva. Czukor Ukrayini. 2001; 5:19–20.
58. Khomichak L. Peredovi tekhnologiyi virobnicztva czukru. Kharchova i pererobna promislovist: Shhomisyachnij naukovo–virobnichij zhurnal Derzhpromu, Nacz. Universitetu kharchovikh tekhnologij ta TOV "Ukragropak". 2007; 4: 20–23.
59. Borysyuk P. Some features of sugar market. Tsukrovi buryaky. 2011; 1: 4–5.
60. Krasnyak O. Trends of sugar market development in Ukraine: problems and prospects. Zbirnyk naukovykh pratz Tavriyskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universytetu (ekonomichni nauky). 2012; 2(18):261–269.
61. Bondar V. Price trends on a world market of sugar and their influence on a domestic market of Ukraine. Tsukrovi buryaky. 2010; 1(1):9–10.
62. Mudrak P. Price factors on a sugar market in a context of food security providing. Naukovi pratsi Poltavskoyi derzhavnoyi akademiyi. 2011; 2:160–167.
63. Jantzen J. Foundations of Fuzzy Control. Wiley. 2007; 1(1):152–153.
64. Wibowo A. Energy balance analysis on increasing the capacity of a sugar factory in Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022 Jan 1; 963(1): 120.
65. Garcia Gonzalez M, Björnsson L. Life cycle assessment of the production of beet sugar and its by-products. Journal of Cleaner Production. 2022 Apr; 346: 134–137.
66. Gardner E. Exponential smoothing: the state of the art – part II, International Journal of Forecasting. 2006; 22 (4): 637–666.

67. Hyndman R, Khandakar Y. Automatic Time Series Forecasting. The forecast Package for R. Journal of Statistical Software. 2008; 27(3):1–22.
68. Hyndman R, Koehler Anne B, Ord J, Snyder R. (2006), Forecasting with Exponential Smoothing: the state space approach. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006; 1(1):17–18.
69. Чернявская Л. Исследование и разработка методов комплексной химико-технологической оценки качества сырья и продуктов сахарного производства с целью повышения его эффективности: дис... д-ра техн. наук. Київ: НУХТ; 1997. 523.
70. Hrama M, Sidletskyi V, Elperin I. Justification of the neuro-fuzzy regulation in evaporator plant control system. Ukrainian Food Journal. 2019; 8(4): 873–890.
71. Cheesman O. Environmental impacts of sugar production: the cultivation and processing of sugar cane and sugar beet. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2004; 255.
72. Ghiasirad H, Saray R, Abdi B, Bahlouli K. Detailed 3E Exploration of a Sugar Industry Using Its Experimental Data. Green Energy and Technology. 2022; 391–429.
73. Chantasiriwan S. Distribution of juice heater surface for optimum performance of evaporation process in raw sugar manufacturing. Journal of Food Engineering. 2017; 195: 21–30.
74. Verma O, Manik G, Jain V. Simulation and control of a complex nonlinear dynamic behavior of multi-stage evaporator using PID and Fuzzy–PID controllers. Journal of Computational Science. 2018; 25:238–251.
75. Chowdhury J, Nguyen B, Thornhill D. Modelling of Evaporator in Waste Heat Recovery System using Finite Volume Method and Fuzzy Technique. Energies. 2015; 8(12): 14078–14097.
76. Jolly P, Tso C, Chia P, Wong Y. (2000), Intelligent Control to Reduce Superheat Hunting and Optimize Evaporator Performance in Container Refrigeration. HVAC&R Research. 2000; 6(3):243–255.

- 77.Lahtinen S. Identification of fuzzy controller for use with a falling–film evaporator. *Food Control*. 2001; 12(3): 175–180.
- 78.Tang K, Kim F, Guanrong C, Kwong S. An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2001; 48(4):757–765.
- 79.Carvajal J. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. *Information Sciences*. 2000; 123(3–4):249–270.
- 80.Sidletskyi V, Elperin I, Polupan V. Analiz ne vymiriuvalnykh parametriv na rivni rozpodilenoho keruvannia dlia avtomatyzovanoi systemy, ob'ektiv i kompleksiv kharchovoi promyslovosti. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*. 2016; 22(3): 7–15.
- 81.Lapin M, Sidletskyi V. Vykorystannia system nechitkoi lohiky dlia dynamichnoho upravlinnia potuzhnistiu parovykh kotloahrehativ/ *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*. 2016; 22(4): 24 – 31.
- 82.González–Potes A, Mata–López W, Ochoa–Brust A, Escobar–del Pozo C. Smart Control of Multiple Evaporator Systems with Wireless Sensor and Actuator Networks. *Energies*. 2016; 9(3): 142-143.
- 83.Zhang J, Zhang W, Hou G. Design of evaporator control system using fuzzy sliding mode controller, *The 2011 Internati onal Conference on Advanced Mechatronic Systems*. 2011; 1(1): 510–512.
- 84.Liu T, Wang Y, Yang X. Optimal fuzzy control of electronic expansion valve–evaporator system. *BioTechnology: An Indian Journal*. 2013; 1(1): 586 – 589.
- 85.Bao–hua Z. Simulation and analysis of evaporator superheat electronic expansion valve fuzzy control. *Energy Research and Utilization*. 2005; 1(1): 4 – 5.
- 86.Xiao–yang H. (2007), Fuzzy control for superheat of evaporator based on variable–universe method. *Journal of Guangxi University of Technology*. 2007; 2(4): 7 – 9.
- 87.Normey–Rico J, Merino A, Cristea S, de Prada C. Robust dead–time compensation of an evaporation process in sugar production. *IFAC Proceedings Volumes*. 2005; 38(1): 460–465.

- 88.Lavarack B, Hodgson J, Venning J. (2004), Improving the energy efficiency of sugar factories: Case study for Pioneer Mill. *International Sugar Journal*. 2004; 106(1266): 337-342.
- 89.Roger K, Sparr E, Wennerström H. Evaporation, diffusion and self-assembly at drying interfaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2018. 20(15): 10430–10438.
- 90.Srivastava D, Mohanty B, Bhargava R. Modeling and simulation of mee system used in the sugar industry. *Chemical Engineering Communications*. 2013; 200(8): 1089–1101.
- 91.Patan K, Parisini T. Identification of neural dynamic models for fault detection and isolation: the case of a real sugar evaporation process. *Journal of Process Control*. 2005; 15(1): 67–79.
- 92.Merino A, Acebes L, Alves R, de Prada C. Real Time Optimization for steam management in an evaporation section. *Control Engineering Practice*. 2018; 79: 91–104.
- 93.Polupan V, Sidletsnyi V. Genetic algorithm usage for optimization of saturator operation. *Ukrainian food journal*. 2018; 7(4): 754–762.
- 94.Sidletsnyi V, Korobiichuk I, Ladaniuk A, Elperin I, Rzeplińska-Rykała K. Development of the Structure of an Automated Control System Using Tensor Techniques for a Diffusion Station. *AUTOMATION 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 7(3): 175–185.
95. Urbaniec K. The evolution of evaporator stations in the beet-sugar industry. *Journal of Food Engineering*. 2004; 61(4):505–508.
- 96.Madaeni S, Zereshki S. Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis. *Energy Conversion and Management*. 2010; 51(6): 1270–1276.
- 97.Chantasiriwan S. Online determination of heat transfer coefficients in sugar juice evaporation process. *Journal of Food Engineering*. 2018; 230: 63–71.

98. Chantasiriwan S. Optimum surface area distribution of quadruple-effect evaporator in sugar juice evaporation process. *Chemical Engineering Communications*. 2017; 204(12): 1466–1473.
99. Grabowski M, Klemeš J, Urbaniec K, Vaccari G, Zhu X. Minimum energy consumption in sugar production by cooling crystallisation of concentrated raw juice. *Applied Thermal Engineering*. 2001; 21(13–14): 1319–1329.
100. Syfert M, Rzepiejewski P, Wnuk P, Kościelny J. Current diagnostics of the evaporation station. *IFAC Proceedings Volumes*. 2005; 38(1): 365–370.
101. Marcu T, Mireat L, Ferariu L, Paul F. Miscellaneous Neural Networks Applied to Fault Detection and Isolation of an Evaporation Station. *IFAC Proceedings Volumes*. 2000; 33(11): 359–364.
102. Prada C, Villar E, Aleixandre E. Dynamic Simulation of a Multiple-effect Evaporation Station. *IFAC Proceedings Volumes*. 1987; 20(12): 129–132.
103. Ji Y, Zhang Y, Chen W, Xie Y. Bridge the Gap between Neural Networks and Neuromorphic Hardware with a Neural Network Compiler. *Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems - ASPLOS '18*. 2018; 38(1): 365–370.
104. Eldridge S, Waterland A, Seltzer M, Appavoo J, Joshi A. Towards General-Purpose Neural Network Computing. *2015 International Conference on Parallel Architecture and Compilation (PACT)*. 2015; 204(12): 1466–1473.
105. Wang L, Yang B, Chen Y, Zhang X, Orchard J. Improving Neural-Network Classifiers Using Nearest Neighbor Partitioning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2017; 28(10): 2255–2267.
106. Holden D, Saito J, Komura T. Neural network ambient occlusion. *SIGGRAPH ASIA 2016 Technical Briefs on - SA '16*. 2016; 20(12): 129–132.
107. Kowalski P, Kulczycki P. Interval probabilistic neural network. *Neural Computing and Applications*. 2015; 28(4): 817–834.
108. Costarelli D. Neural network operators: Constructive interpolation of multivariate functions. *Neural Networks*. 2015; 67: 28–36.

109. Gao X, Liao L. A Novel Neural Network for Generally Constrained Variational Inequalities. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2016; 28(3): 1–14.
110. Hansen L, Salamon P. Neural network ensembles. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1990; 12(10): 993–1001.
111. Han H, Lu W, Hou Y, Qiao J. An Adaptive-PSO-Based Self-Organizing RBF Neural Network. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2018; 29(1): 104–117.
112. Stanimirovic P, Zivkovic I, Wei Y. Recurrent Neural Network for Computing the Drazin Inverse. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015; 26(11): 2830–2843.
113. Sha S, Luo Y, Wang Z, Wang X. A Neural Network Model for Cache and Memory Prediction of Neural Networks. 2018 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing & Communications, Big Data & Cloud Computing, Social Computing & Networking, Sustainable Computing & Communications (ISPA/IUCC/BDCloud/SocialCom/SustainCom). 2018; 29(1): 104–117.
114. Humbird K, Peterson J, Mcclarren R. Deep Neural Network Initialization With Decision Trees. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2019; 30(5): 1286–1295.
115. Baig M, Awais M, El-Alfy E. AdaBoost-based artificial neural network learning. *Neurocomputing*. 2017; 248: 120–126.
116. Bueno J, Maktoobi S, Froehly L, Fischer I, Jacquot M, Larger L, Brunner D. Reinforcement learning in a large-scale photonic recurrent neural network. *Optica*. 2018; 5(6): 756.
117. Liu Q, Wang J. A Projection Neural Network for Constrained Quadratic Minimax Optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015; 26(11): 2891–2900.
118. Kusy M, Kowalski P. Weighted probabilistic neural network. *Information Sciences*. 2018; 430–431: 65–76.

119. Xia Y, Wang J. A Bi-Projection Neural Network for Solving Constrained Quadratic Optimization Problems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2016; 27(2): 214–224.
120. Qin S, Xue X. A Two-Layer Recurrent Neural Network for Nonsmooth Convex Optimization Problems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2015; 26(6): 1149–1160.
121. Qin S, Feng J, Song J, Wen X, Xu C. A One-Layer Recurrent Neural Network for Constrained Complex-Variable Convex Optimization. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2018; 29(3): 534–544.
122. Watanabe C, Hiramatsu K, Kashino K. Modular representation of layered neural networks. *Neural Networks*. 2018; 97: 62–73.
123. Lin S, Runger G. GCRNN: Group-Constrained Convolutional Recurrent Neural Network. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2018; 29(10): 4709–4718.
124. Jia W, Zhao D, Zheng Y, Hou S. A novel optimized GA–Elman neural network algorithm. *Neural Computing and Applications*. 2017; 31(2): 449–459.
125. Liu A, Laili Y. Balance gate controlled deep neural network. *Neurocomputing*. 2018; 320: 183–194.
126. Zhang Y, Tao G, Chen M. Adaptive Neural Network Based Control of Noncanonical Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2016; 27(9): 1864–1877.
127. Bergmeir C, Benítez J. Neural Networks in R Using the Stuttgart Neural Network Simulator: RSNNS. *Journal of Statistical Software*. 2012; 46(7): 183–194.
128. Adhikari S, Changju Y, Hyongsuk K, Chua L. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its Learning. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2012; 23(9): 1426–1435.
129. Qin S, Fan D, Wu G, Zhao L. Neural network for constrained nonsmooth optimization using Tikhonov regularization. *Neural Networks*. 2015; 63: 272–281.
130. Luts kaya N, Vlasenko L. Development of multidimensional optimal controllers for sugarmill evaporation plant which operates in interval

indetermination conditions. Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii. 2013; 52: 48–61.

131. Власенко Л. Використання математичної моделі випарної установки при сценарно-цільовому управлінні комплексом цукрового заводу. Матеріали XVIII междунар. конф. з автом. управл. 2011; 77.
132. Школьна О, Кишенько В, Ладанюк А. Прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2016; №50: 127-132.
133. Kyshenko V, Ladanyuk A, Sych M, Shkolna O. Non-linear recurrent analysis of the behavior of a complex technological object. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016; 2(82): 59-65.
134. Ладанюк А, Бойко Р, Шумигай Д, Смітюх Я. Управління ситуаціями в технологічному комплексі на основі когнітивних карт. Харчова промисловість. 2014; 16: 127-132.
135. Бойко Р, Загоровська Л. Система управління технологічним комплексом цукрового заводу з використанням комбінованого критерію ефективності. Вост.-Европ. журн. передовых технологий. 2011; 6/9: 58-60.
136. Луцька Н, Ладанюк А. Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами: монографія. Київ: Видавництво Ліра-К; 2016. 288 с.
137. Ладанюк А, Бойко Р, Смітюх Я, Школьная Е. Идентификация процесса функционирования технологического комплекса. Современный научный вестник: научно-теоретический и практический журнал. 2014; 19 (215)6: 143-149.
138. Ладанюк А, Школьна О. Управління випарною установкою цукрового заводу в складі теплоенергетичного комплексу. Автоматика – 2015: матеріали XXII Міжнародної конференції з автоматичного управління, м. Одеса. 10-11 вересня 2015 р; 97-98.

139. Ладанюк А, Кишенько В, Школьна О. Управління випарною установкою в умовах невизначеності: інтелектуалізація прикладних функцій. Наукові праці НУХТ. 2015; 6: 7-14.
140. Ладанюк А, Луцкая Н. Особенности задач робастного управления технологическими объектами. Часть 1. Технологические объекты и их математические модели. Проблемы управления и информатики. 2016; 5: 16-23.
141. Ладанюк А, Смітюх В, Власенко Л, Заєць Н, Ельперін І. Системний аналіз складних систем керування: Навч. посіб. Київ: НУХТ; 2013. 274 с.
142. Ладанюк А, Кравчук А, Куриленко О. Реконструкция теплового комплекса: основные параметры и задачи управления процессом. Цукор України. 2003; 4-5: 26-32.
143. Ладанюк А, Трегуб В, Ельперін І, Цюцюра В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник. Київ: Аграрна освіта; 2001. 224 с.
144. Ладанюк А, Архангельська К, Власенко Л. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навч. посіб. Київ: НУХТ; 2014. 274 с.
145. Veronesi M. Performance improvement of Smith predictor through automatic computation of dead time. Yokogawa technical Report. 2003; 35: 25-30.
146. Власенко Л. Автоматизоване управління підсистемами технологічного комплексу цукрового заводу з використанням методів діагностики і прогнозування [дисертація]. Київ: НУХТ; 2010. 234 с.
147. Ladanyuk A, Shkolna O, Kyshenko V. Automation of Evaporation Plants Using Energy-Saving Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing, Warsaw, Poland. 2016; 543: 220-226.
148. Луцька Н. Дослідження та синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу [автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07]. Київ: Національний університет харчових технологій; 2006. 16 с.

149. Горобійчук М, Когутяк М, Борин В. Порівняльний аналіз методів фільтрації при експериментальному дослідженні динамічних властивостей об'єктів. Методи та прилади контролю якості. 2020; 2(45): 66-82.
150. Школьна О. Автоматизована система випереджувального багатокритеріального управління випарною установкою цукрового заводу [автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07]. Київ: Національний університет харчових технологій; 2017. 25 с.
151. Школьна О. Автоматизована система випереджувального багатокритеріального управління випарною установкою цукрового заводу [дисертація]. Київ: Національний університет харчових технологій; 2017. 190 с.

Додаток 1

Таблиця 13. Завдання на розробку системи автоматизації

№ з.п.	Машина, агрегат, установка	Параметр, місце відбору сигналу	Припустиме значення параметра	Вид автоматизації	Характер контролю чи управління	Засоби управління та контролю, реалізація управляючої дії
1	2	3	4	5	6	7
1	1-й корпус	Температура у 1-му корпусі	136 °С	Контроль	Відображення Реєстрація	АРМ оператора
2	2-й корпус	Температура у 2-му корпусі	127 °С			
3	3-й корпус	Температура у 3-му корпусі	119 °С			
4	4-й корпус	Температура у 4-му корпусі	110 °С		Сигналізація	АРМ оператора
5	5-й корпус	Температура у 5-му корпусі	99 °С			

Продовження таблиці 13.

6	1-й корпус	Тиск сокової пари у 1-му корпусі	0,25 МПа	Контроль	Відображення	АРМ оператора
					Реєстрація	
				Регулювання	Сигналізація	АРМ оператора
7	2-й корпус	Тиск сокової пари у 2-му корпусі	0,25 МПа	Контроль	Відображення	АРМ оператора
					Реєстрація	
				Регулювання	Сигналізація	АРМ оператора
8	5-й корпус	Розрідження у 5-му корпусі	0,052 МПа	Контроль	Відображення	АРМ оператора
					Реєстрація	
				Регулювання	Сигналізація	АРМ оператора
					Вплив на витрату пари від РОУ	
					Вплив на відбір пари на конденсатор	

Продовження таблиці 13.

9	1-й корпус	Рівень у 1-му корпусі	0- 100%	Контроль	Відображенн я Реєстрація	АРМ оператора
1 0	2-й корпус	Рівень у 2-му корпусі			Сигналізація	АРМ оператора
1 1 1 2	3-й корпус 4-й корпус	Рівень у 3-му корпусі Рівень у 4-му корпусі				
1 3	5-й корпус	Рівень у 5-му корпусі	0- 100%	Регулюванн я	Стабілізація	Вплив на перетоку соку на наступний корпус або на виробництв о
1 4	Трубопрові д подачі соку насосом на 1 корпус	Витрата соку на випарну установк у	215 м ³ /го д	Контроль	Відображенн я Реєстрація	АРМ оператора
					Сигналізація	АРМ оператора

Продовження таблиці 13.

				Регулювання	Стабілізація	Вплив на витрату соку
15	Збірник соку	Рівень соку у збірнику перед випаркою		Контроль	Відображення	АРМ оператора
					Сигналізація	АРМ оператора
				Дискретне управління	Забезпечення знаходження рівня соку в межах норми	Подача аміачної води у збірник соку
16	Трубопровід на виході соку з 5-ого корпусу	Вміст сухих речовин у сиропі	65-70%СР	Контроль	Відображення Реєстрація	АРМ оператора

Продовження таблиці 13.

17	Насос подачі соку на 1- й корпус	Стан насосу подачі соку на 1-й корпус		Контроль	Відображен ня Реєстрація	АРМ оператора
				Дискретне управління	Ручне, дистанційне	Пуск/зупин ка з контролера, АРМа оператора по місцю

Додаток 2

Затверджую
Головний інженер ТОВ
«Памраївський цукор»
Шутенко А.В.

« _____ » _____ 2020р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, з однієї сторони представники ТОВ «Памраївський цукор»: головний інженер Шутенко А.В., головний технолог Калініченко С.В., начальник лабораторії КВПіА Бадіон Р.М., та представники Національного університету харчових технологій: завідувач кафедри АКТСУ Ельперін І.В., аспірант кафедри АКТСУ Грама М.П. склали цей акт аналізу роботи системи автоматизації п'ятикорпусної випарної станції та можливості впровадження матеріалів наукової роботи Грами М.П.,

- Було розроблено математичні моделі систем з використанням інтелектуальних регуляторів.
- Було порівняно показники якості систем та визначено, яка система є оптимальною.
- Отримані результати досліджень були рекомендовані для включення до складу існуючої системи автоматизації.

від ТОВ «Памраївський цукор»

головний технолог Калініченко С.В.

начальник лабораторії КВПіА Бадіон Р.М.

від Національного університету
харчових технологій

к.т.н. Ельперін І.В.

Грама М. П.

Затверджую

Директор Філії «Жданівський цукровий завод» ТОВ «Цукорагропром»
Омельченко В.А.
15 лютого 2021р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписались, з однієї сторони представник Філії «Жданівський цукровий завод» ТОВ «Цукорагропром» начальник лабораторії КВПіА Даніель В.О., та представники Національного університету харчових технологій: в.о. завідувача кафедри АКТСУ Смітюх Я.В., доц. каф. АКТСУ Сідлецький В.М., аспірант кафедри АКТСУ Грама М.П. склали цей акт аналізу роботи системи автоматизації п'ятикорпусної випарної станції та можливості впровадження матеріалів наукової роботи Грами М.П.:

- аналіз ведення технологічного процесу та історичних трендів та виявлення причинно наслідкових зв'язків в роботі ділянки;
- аналіз технологічної схеми на невідповідність в роботі ділянки випарювання соку на цукровому заводі;
- аналіз технічних засобів та пристроїв зв'язку з об'єктом існуючої системи автоматизації;
- аналіз програмних модулів промислового контролера, та засобів конфігурування пристроїв зв'язку з об'єктом;
- аналіз існуючої SCADA програми. Виявлення можливості коригування та доповнення необхідних елементів людино машинного інтерфейсу;
- аналіз мережевих комунікацій та засобів керування верхнього рівня;
- способи покращення роботи систем керування випарювання соку на цукровому заводі.

від Філії «Жданівський цукровий завод» ТОВ «Цукорагропром»

нач. лаб. КВПіА
Даніель В.О.

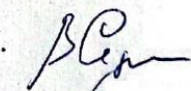


від Національного університету харчових технологій

к.т.н. Смітюх Я.В.



к.т.н. Сідлецький В.М.



Грама М. П.



Додаток 4

УДК 004.8.032.26, 658.012.011.56:658.512, 658.012.011.56:658.512 004.8.032.26

УКПП

№ держреєстрації 0121U113863

Інк. №

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

01601, м. Київ-33, вул. Володимирська 68



Професор

Проректор з наукової роботи

Сергій ТОКАРЧУК

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

МОДЕРНІЗАЦІЯ ІСНУЮЧОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ
КЕРУВАННЯ ВИПАРНОЮ УСТАНОВКОЮ В РАМКАХ
КОНЦЕПЦІЙ ІНДУСТРІЯ 4.0

(остаточний)

Науковий керівник НДР

канд.техн. наук, доц.

Віктор СІДЛЕЦЬКИЙ

Київ 2021

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

канд.техн. наук, доц.



Віктор СІДЛЕЦЬКИЙ

(реферат, вступ, розділи
1.7, 1.8, рекомендації,
додаток А,Б,В.)

Відповідальні виконавці

Аспірант Phd .



Михайло ГРАМА

(розділи 1.2, 1.3, 1.4, 2.1,
2.2, 2.3)

Аспірант Phd .



Олексій ДІБРОВ

(розділи 1.5, 1.6)