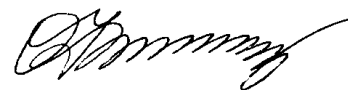


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

На правах рукопису



ШКОЛЬНА ОЛЕНА ВАЛЕНТИНІВНА

УДК 004.896:681.513.54:664.12

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО
БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ВИПАРНОЮ
УСТАНОВКОЮ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет харчових технологій,
м. Київ,
завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування,
заслужений діяч науки і техніки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Кіровоградський національний технічний університет,
м. Кропивницький,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів;

доктор технічних наук, професор
Нефьодов Леонід Іванович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
м. Харків,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться «26» червня 2017 року о 13-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. А-311.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ-33, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «26» травня 2017 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к. т. н., доцент



О. М. М'якшило

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Цукрова промисловість є однією із провідних галузей агропромислового комплексу України. Цукровий завод характеризується багатотонажністю, високим рівнем механізації та автоматизації виробництва, енергомісткістю технологічних процесів. Зважаючи на високе зростання цін на паливо, особливо на природний газ як основний енергоносіє в цукровому виробництві, однією з проблем автоматизації цукрового виробництва є підвищення енергоефективності при забезпеченні необхідних якісних кондицій продукції. Основним споживачем та розподільвачем теплоенергетичних ресурсів на цукровому заводі є випарна установка (ВУ), яка забезпечує необхідні якісні показники цукру, в значній мірі визначає продуктивність виробництва, а також виробляє і розподіляє по інших технологічних відділеннях теплову енергію. Режими роботи такого об'єкта визначаються характеристиками сировини, особливостями функціонування інших технологічних підсистем (бурякопереробного, сокоочисного та кристалізаційного відділень) і характеризується суттєвими коливаннями у споживанні теплової енергії, включаючи і навантаження пікового характеру. Звідси важливою практичною задачею є організація ефективного багатокритеріального керування випарною установкою з метою забезпечення раціонального розподілу теплової енергії між споживачами при достатній якості сиропу та досягненні необхідного рівня ритмічності роботи технологічного обладнання.

З точки зору керування випарну установку слід віднести до складних технологічних систем, що характеризуються багатомірністю, нелінійністю, багатозв'язністю, нестационарністю, високим рівнем невизначеності, різнорідністю ситуаційної поведінки. Такі особливості об'єкта керування вимагають застосування сучасних принципів і методів теорії та практики керування складними організаційно-технічними системами з використанням передових комп'ютерних технологій: теорія інтелектуальних систем, теорія оптимального і адаптивного керування, методи технологічного і енергетичного моніторингу, мережеве моделювання, методи прогнозування.

Актуальною проблемою є розробка підходу до керування випарною установкою, що оснований на випереджувальних оцінках ефективності функціонування технологічних процесів цукрового виробництва. Оцінки базуються на комбінованих мережевих моделях та інтелектуальному аналізі часових рядів технологічних змінних. Такий підхід створює природні умови досягнення функціональної та експлуатаційної ефективності цукрового виробництва.

Розробка математичних моделей, інтелектуальних алгоритмів керування, програмного забезпечення на основі новітніх інформаційних технологій, що реалізують випереджувальне керування випарною установкою на основі багатокритеріальної оптимізації процесів випарювання із забезпеченням високих кондицій сиропу, значної продуктивності та

раціонального розподілу пари між споживачами, є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування 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 робастно-оптимальних 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).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування випарної установки цукрового заводу шляхом розробки енергоефективних алгоритмів інтелектуального багатокритеріального керування на основі випереджувальних оцінок потреб в енергоресурсах власне випарної установки та споживачів вторинної пари і забезпечення високих якісних кондицій продукції.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні науково-технічні задачі:

- проведення системного, заснованого на мережевих моделях, аналізу функціонування випарної установки в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу з використанням випереджувальних оцінок показників енергетичних потреб технологічних споживачів вторинної пари;

- розробка методів оцінки стану об'єкта керування з використанням нейромережевих методів кластеризації та класифікації;

- визначення випереджувальних оцінок потреб випарної установки цукрового заводу в грійній парі та інших ділянок виробництва у вторинній парі з ВУ на основі визначення нечітких тенденцій їх поведінки шляхом інтелектуального аналізу часових рядів технологічних змінних;

- розробка алгоритму багатокритеріального керування випарною установкою цукрового заводу на основі схеми компромісу за Парето в умовах невизначеності та ситуаційного змінювання пріоритетності критеріїв;

- розробка інтелектуальної системи багатокритеріального керування випарною установкою цукрового заводу з використанням нейромережевих прогнозних регуляторів.

Об'єктом дослідження є процес функціонування випарної установки в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу.

Предметом дослідження є алгоритми випереджувального енергоефективного керування, інтелектуальні методи та інформаційні технології для розробки підсистеми підтримки прийняття рішень.

Методи дослідження. 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, базові принципи ситуаційного підходу, багатокритеріальної оптимізації, імітаційного моделювання. Результати досліджень підтверджувались шляхом використання математичного моделювання та аналізу експериментальних даних.

Наукова новизна:

- вперше розроблена модель випарної установки цукрового заводу на основі темпоральних мереж Петрі з кольоровими фішками, що забезпечує випереджувальну оцінку потреб ВУ в грійній парі та технологічних споживачів у вторинній парі, а також відтворює особливості отримання цукрового сиропу;

- вперше здійснена постановка та розв'язана задача багатокритеріальної оптимізації роботи випарної установки цукрового заводу як компромісу за Парето між забезпеченням потреб споживачів в енергоресурсах та продуктивністю об'єкта керування із збереженням необхідних якісних кондицій сиропу;

- вперше розроблена інтелектуальна система керування теплотехнологічним комплексом цукрового заводу на базі методів випереджувального керування та багатокритеріальної оптимізації (патент України № 97574);

- набули подальшого розвитку методи оцінки та класифікації технологічних ситуацій шляхом використання та реалізації нейромережевих методів кластеризації та класифікації;

- набули подальшого розвитку методи прогнозування оцінки потреб ВУ та споживачів вторинної пари в енергоресурсах на базі визначення нечітких тенденцій їх поведінки шляхом інтелектуального аналізу експериментальних часових рядів технологічних змінних;

- удосконалено методи синтезу нейронних прогнозних регуляторів технологічних режимів випарної установки цукрового заводу.

Практичне значення та реалізація отриманих результатів. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень розроблено структуру, алгоритмічне та програмне забезпечення автоматизованої системи інтелектуального багатокритеріального випереджувального керування випарною установкою цукрового заводу з прогнозуванням потреб споживачів вторинної пари.

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

Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій та передані для впровадження на ПАТ «Червонський цукровик», що підтверджено відповідними довідками.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. В публікаціях у

співавторстві особистий внесок автора полягає в наступному: в [1] визначенні основних параметрів функціонування технологічного комплексу цукрового заводу; в [2] проведено аналіз існуючих структур інтелектуальних регуляторів та оцінка впливу зміни деяких чинників на концентрацію сиропу на виході з випарної установки; в [3] розроблено моделі розподілу вторинної пари випарної установки цукрового заводу на основі розширених мереж Петрі та семантичної мережі Ван-Хао; в [4] проведено аналіз отриманих рекурентних діаграм часових рядів технологічних змінних цукрового виробництва; в [5] розроблено алгоритм визначення стану випарної установки як об'єкта керування на основі нейромережевих методів кластеризації та класифікації; в [6] здійснено прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки з використанням методу нечітких елементарних тенденцій; в [7] розроблено структуру системи багатокритеріального керування ВУ; в [10] проведено аналіз методів підвищення ефективності функціонування ВУ на основі ентропійного підходу; в [13] розроблена інтелектуальна система керування ВУ з використанням нечіткої системи логічного висновку Мамдані; в [19] проведено аналіз методів енергоефективного керування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювались та доповідались на: Міжнародній науковій конференції «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості» (Київ, НУХТ, 2014); Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, НУХТ, 2014-2016); Міжнародній конференції з автоматичного керування «АВТОМАТИКА/AUTOMATICS – 2015» (Одеса, 2015); Наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті» (Київ, НУХТ, 2015-2017); ХХІІІ Міжнародній конференції з автоматичного управління «АВТОМАТИКА/AUTOMATICS – 2016» (Суми, 2016); ІІ Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2016); 8th Central European Congress on Food «CEFood congress» (Kyiv, Ukraine, 2016); ІV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (Київ, НУБіП України, 2016); Advances in Intelligent Systems and Computing (Warsaw, Poland, 2016).

Публікації. Основні результати роботи викладено у 19 друкованих працях, з яких 6 статей у фахових виданнях, 1 з них у закордонному, 2 входять до наукометричної бази Scopus, а також один патент України та 12 тез доповідей.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (186 найменувань) і додатків. Загальний обсяг становить 190 стор., з яких зміст викладено на 146 стор. тексту і включає 56 рисунків, 16 таблиць та 7 додатків.

Основні положення, що виносяться на захист: результати досліджень роботи випарної установки - складової теплотехнологічного комплексу цукрового заводу як складного об'єкта керування в умовах невизначеності;

моделі прогнозування поведінки випарної установки цукрового заводу та алгоритмів випереджувального керування ВУ; моделі знань, в яких визначені процедури прийняття рішень при керуванні ВУ; функціональна структура, алгоритмічне і програмне забезпечення інтелектуальної системи керування ВУ.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень. Визначена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ присвячений аналізу функціонування теплотехнологічного комплексу цукрового заводу (ЦЗ) як складної організаційно-технологічної системи, виявленню особливостей ВУ як об'єкта керування в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу, а також аналізу науково-технічних методів керування та систем автоматизації ВУ.

Встановлено, що в теплотехнологічному комплексі цукрового заводу, що розглядається як складна організаційно-технологічна система одночасно протікають складні процеси тепло- і масообміну, гідродинаміки та фізико-хімічного перетворення речовини, важливе місце займає випарна установка, призначення якої не лише у згущенні соку до сиропу, а також, у забезпеченні вторинною парою споживачів. З точки зору завдань керування ВУ має повний набір несприятливих якостей і характеристик: велика розмірність; розподіленість координат; істотна нелінійність і нестационарність, запізнювання; множина станів функціонування і виробничих ситуацій; неповнота і недостовірність інформації щодо збурень, координат стану і керувальних впливів; мінливість цілей, критеріїв керування, обмежень та ін.

Аналіз розробок в галузі автоматизації виробництва цукру показав, що створені передумови для розробки та реалізації сучасних систем автоматизованого керування випарною установкою. Серед інших слід відзначити роботи, в яких ВУ розглядається в складі теплотехнологічного комплексу ЦЗ та спрямовані на підвищення енергоефективності ЦЗ, таких вчених: Прядка, М. О., Філоненка В. М., Маслікова М. О., Василенка С. М., Штангесва К. О., Бойко В. О.. Вивченням та автоматизацією випарних установок займались Ладанюк А. П., Жученко А. І., Трегуб В. Г., Кон Л. Й., Таубман Є. І., Мамчур В. А., Ліберман І. Г., Корнієнко Л. І., Кишенько В. Д. та інші.

Аналіз автоматизованих систем керування випарною установкою цукрового заводу показав їх недостатню ефективність через низький рівень реалізації прикладних функцій керування, які не враховують особливостей функціонування ВУ як складного об'єкта в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу. Визначені основні напрямки розвитку автоматизованих систем керування випарною установкою цукрового заводу на основі застосування інтелектуальних методів. Сформульовані задачі дослідження.

У другому розділі проведено аналіз науково-технічних основ використання енергоефективного керування ВУ цукрового заводу.

В результаті аналізу показників процесу функціонування ВУ показано, що на кінцеву концентрацію розчину (сиропу) найбільше впливають такі параметри: витрата грійної пари на перший корпус ВУ; витрата та концентрація вмісту сухих речовин соку, що надходить на ВУ. Для умов згущення соку від 13 % до 60 % вмісту сухих речовин визначено, що зміна на ± 1 % витрати грійної пари, або витрати вхідного соку може викликати відхилення концентрації сиропу на $\pm 2,17$ %. В свою чергу, зміна на ± 1 % концентрації вхідного дифузійного соку може викликати зміну концентрації сиропу з ВУ на $\pm 4,6$ %.

Вибір критеріїв керування ВУ проведено з урахуванням того, що загальний прибуток виробництва дорівнює сумі економічної ефективності функціонування окремих ділянок виробництва, тобто визначається сумою втрат та витрат кожної підсистеми виробництва, кількістю виробленої продукції, цінами на сировину, кінцевий продукт, додаткові матеріали, паливо-енергетичні ресурси, отже оптимізація локальних критеріїв окремих технологічних процесів, зокрема випарної установки, призведе до максимізації прибутку та забезпечення належної якості продукції.

Економічність процесу функціонування ВУ визначається виразом:

$$E_3 = \int_{t_1}^{t_2} \left(G_{cup} \frac{CP_{cup} D_0}{100} \Pi_0 - \frac{G_c}{G_{cup}} \Pi_0 - \sum_{i=1}^5 Z_i - \Pi_{mp} \Pi_0 - \Pi_K \Delta \Pi_0 \sum_{j=1}^m Z_j \right) dt, \quad (1)$$

де: Π_{mp} , Π_K – відповідно втрати цукру від термічного розкладу та при наростанні кольоровості т/год.; $\sum_{i=1}^m Z_i$ – сумарні затрати на процес випарювання, грн./г од; $\sum_{j=1}^m Z_j$ – економічність інших ділянок виробництва, грн./г од; $\Delta \Pi_0$ – зміна ціни цукру, що визначається його кольоровістю, грн./т.

Аналіз методів енергоефективного керування ВУ показав, що серед конструктивних та теплотехнічних підходів, що забезпечують підвищення енергоефективності ВУ можна виділити: підвищення кратності випарювання (впровадження 6-ти та більше корпусних ВУ); більш повне використання теплоти вторинних енергоресурсів, таких як утфельна пара, теплота конденсатів; використання в складі ВУ плівкових випарних апаратів.

Порівняльна характеристика 6-ти та 4-ри корпусної ВУ з концентратором наведена в табл. 1:

Табл. 1. Порівняльна характеристика 6К ВУ та 4КК ВУ

Параметри	6К ВУ	4КК ВУ
Температура кипіння в 1 кор., °С	125-130	126
Температура кипіння в останньому кор., °С	85	68,4
Загальний температурний перепад на ВУ, °С	40-45	51,6

Проведено моделювання процесу функціонування ВУ на основі розширених мереж Петрі (РМП), що можуть бути задані наступним чином:

$$C = (P, D, T, I(T), O(T), D(T), \mu_0), \quad (2)$$

де P – множина вершин-позицій мережі (множина станів); D – множина вирішувальних вершин-позицій; T – множина вершин-переходів.

Табл.2. Елементи розширеної мережі Петрі

Елементи розширеної мережі Петрі	Графічне зображення елемента	Математичний запис
Вершина-генератор	\triangleright	p_1
Вершина-поглинач	\triangleleft	$p_s, \text{де } s = \overline{35, N}$
Стан (всього в мережі N)	\circ	$p_i, \text{де } i = \overline{2, N-14}$
Перехід (всього в мережі T)	\blacksquare	$t_j, \text{де } j = \overline{1, T}$
Вирішувальна вершина (всього в мережі R)	\square	$d_k, \text{де } k = \overline{1, R}$
Дуга	\rightarrow	(p_i, t_j) або (t_j, p_i) або (d_k, t_j) де $i = \overline{1, N}, j = \overline{1, T}, k = \overline{1, R}$

Кожен перехід визначений для технологічної операції і залишається збудженим протягом заданого модельного часу; $I(T)$, $O(T)$ – функції прямої і зворотної інцидентності мережі, що задають множину вхідних і вихідних дуг переходу; $D(T)$ – функція інцидентності для дуг, що пов'язують вирішувальні вершини-позиції і вершини-переходи; μ_0 – початкова розмітка мережі.

В табл. 2 наведені елементи розширеної мережі Петрі, на основі яких розроблено модель розподілу вторинної пари ВУ ЦЗ (рис. 1).

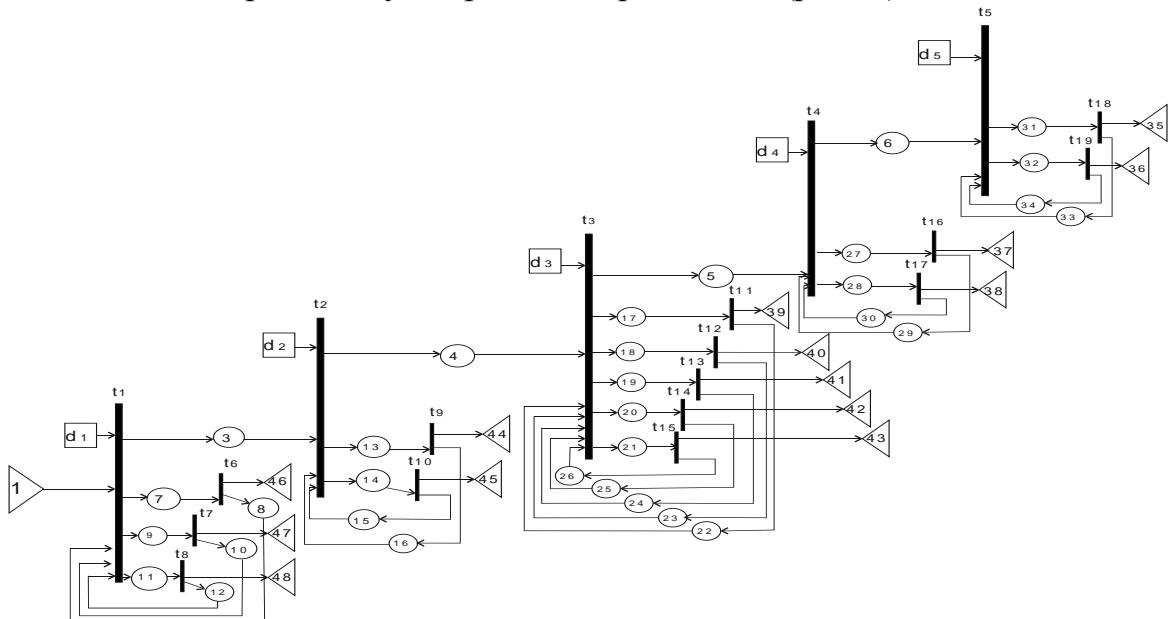


Рис. 1. РМП для процесу розподілу вторинної пари випарної установки цукрового заводу

Розроблена мережева модель функціонування ВУ в складі теплотехнологічного комплексу на основі розширених мереж Петрі дозволяє детально аналізувати процес розподілу вторинної пари з ВУ по споживачам.

Проведено аналіз виробничих ситуацій функціонування ВУ, виділено типові ситуації та набір чинників, що їх визначають. З метою аналізу стану системи на основі обмеженого набору ситуацій та генерування відповідних керувальних стратегій, що переводять систему з поточного стану в цільовий, використано нечітку ситуаційну мережу.

В третьому розділі розроблено інформаційну систему керування ВУ, зокрема, для реалізації методу випереджувального керування випарною установкою в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу вирішено проводити довгострокове та короткострокове прогнозування.

На етапі довгострокового прогнозу визначаємо ключові точки та час настання найближчої ключової точки, який використовуємо як горизонт короткострокового прогнозу. Найбільше пари з ВУ споживають вакуум-апарати (ВА) першого та другого продуктів, що працюють в періодичному режимі, тому довгостроковий прогноз проведено на основі аналізу даних їх пароспоживання. Для кожного ВА виділено такі періоди споживання пари: **1 період** (0-30 хв) – згущення та кристалоутворення (стрімке зростання паровідбору до максимальних 9 т/год); **2 період** (30-75 хв) – ріст 1 (спадання паровідбору до 4 т/год); **3 період** (75-125 хв) – ріст 2 (спадання до 3 т/год); **4 період** (125-205 хв) – ріст 3,4, відтік, утримання (поступове спадання до 1 т/год); **5 період** (35 хв) – пропарка ретурною парою (без використання вторинної пари ВУ).

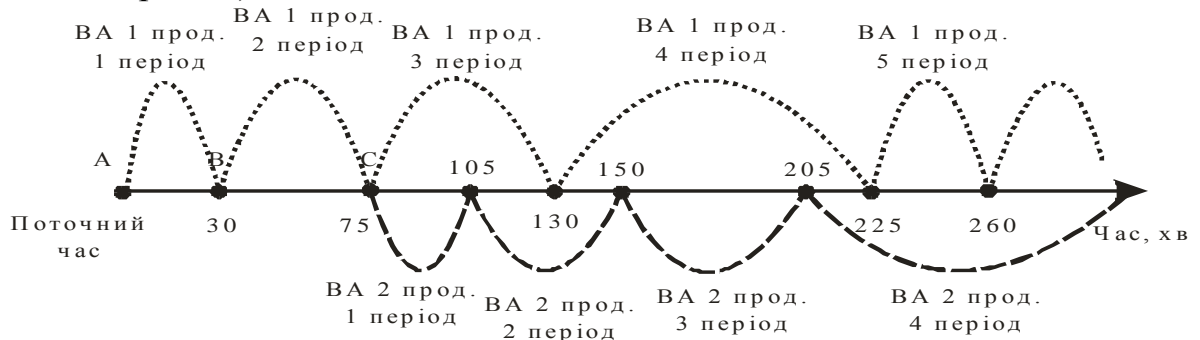


Рис. 2. Графік довгострокового прогнозу та його ключових точок

Після визначення горизонту короткострокового прогнозу визначаємо прогнозоване значення сумарного паровідбору з ВУ на основі прогнозованих значень динаміки споживання пари кожним зі споживачів.

Короткострокове прогнозування проведено для такого споживача як гарячий дефектатор на основі теорії нечітких елементарних тенденцій (НЕТ), в якій НЕТ τ , визначена на \tilde{Y}_Δ , є сукупність впорядкованих пар $\tau = \{\tilde{y}_\Delta, \mu_\tau(\tilde{y}_\Delta)\}$, де $\mu_\tau(\tilde{y}_\Delta)$ – ступінь приналежності \tilde{y}_Δ до НЕТ; $\tilde{y}_\Delta = \{\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_m\}$ – нечіткий часовий ряд лінгвістичної змінної $\tilde{Y}, T_y, U_y, G_y, M_y$; $\tilde{Y}_\Delta = \{\tilde{y}_\Delta\}$ – множина нечітких часових рядів однакової або змінної довжини; модель нечітких тенденцій (МНТ) з параметрами (n, p, m, l) визначають сукупністю компонент та рівнянь:

$$\tilde{y}_t^i = \text{Fuzzy}[y_t], \quad y_t^i = \text{deFuzzy}[\tilde{y}_t^i], \quad (3)$$

$$\tau_t^j = \text{Tend}[\tilde{y}_{t-m_j+1}, \dots, \tilde{y}_t], \quad \tilde{y}_t^i = \text{deTend}[\tau_t, \dots, \tau_{t+m-1}], \quad (4)$$

$$\tau_t = f(\tau_{t-1}, \dots, \tau_{t-l}), \quad i = 1..n, \quad j = 1..p, \quad m = \max(m_j), \quad (5)$$

З метою прогнозування динаміки споживання пари з ВУ для гарячого дефектатора використано шкалу Absolute&Comparative Linguistic (ACL-шкалу), математична модель якої має вигляд:

$$C = \{H, \Omega, \Psi\}, \quad (6)$$

де $H = \{X, \tilde{X}, V, A, \tilde{V}, \tilde{A}\}$ – множина об'єктів оцінювання;
 $\Omega = \{F_T, F_C, F_P, F_Er\}$ – множина операцій (функцій та предикатів),
 визначених на множині H : операції-функції $F_T = \{Fuzzy, deFuzzy, TTend, RTend\}$ для
 оцінки нечітких значень нечітких часових рядів (ЧР) та компонент НЕТ;
 $F_C = \{STend, GTend\}$ – операції-функції для розрахунку нових нечітких значень
 нечіткої тенденції; $F_P = \{P_p, P_n\}$ – операції-предикати для аналізу базових
 типів НЕТ; $F_Er = \{Er_{\tilde{V}}, Er_{\tilde{A}}, Er_{\nu}, Er_a, Er_{\tilde{x}}, Er_x\}$ – операції-функції для
 розрахунку похибок лінгвістичного та числового оцінювання; Ψ – множина
 параметрів шкали $\Psi = \{E, d, MF, nmin, nmax\}$, де E – тип ACL-шкали, d –
 допустимий рівень відхилення в даних, що оцінюють; MF – вид функції
 приналежності нечітких множин $\tilde{X}, \tilde{V}, \tilde{A}$; $nmin, nmax$ – мінімально та
 максимально допустимі значення шкали.

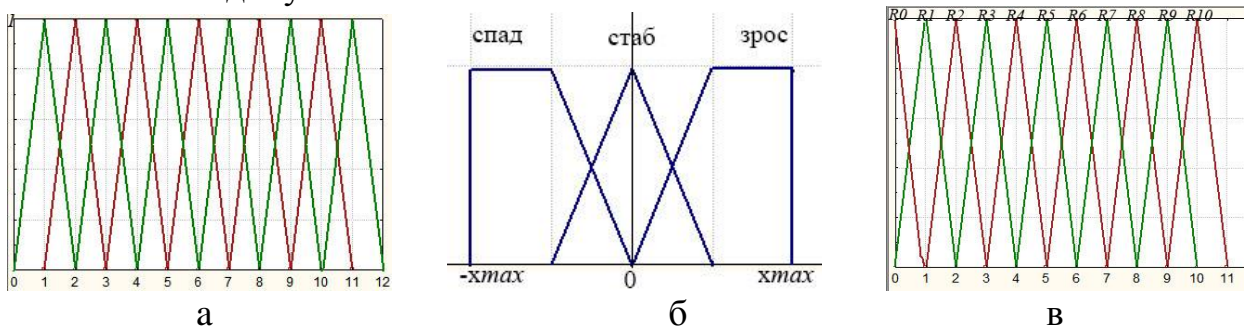


Рис. 3. ACL-шкала: а) базові нечіткі терми \tilde{x} ; б) нечіткі терми типів НЕТ \tilde{v} ; в) нечіткі терми інтенсивностей НЕТ \tilde{a}

Представлено результат прогнозування динаміки споживання пари з ВУ для гарячого дефекатора (рис. 4.), де синім кольором позначено графік вихідного часового ряду, а червоним – графік прогнозу методом НЕТ.

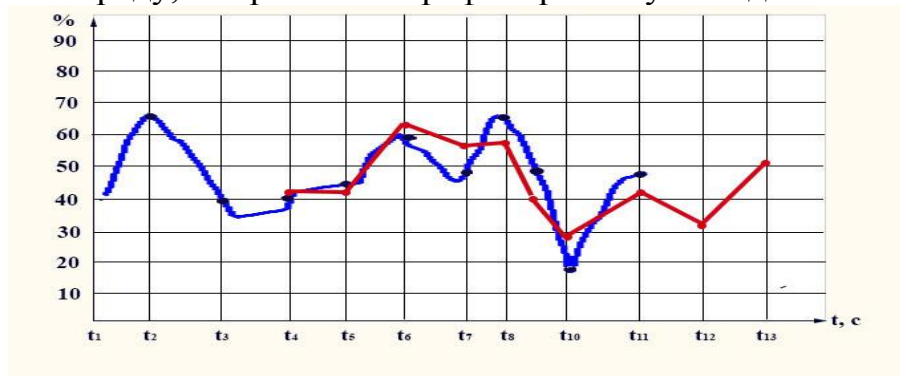


Рис.4. Результати прогнозування ЧР методом НЕТ

Для оцінити адекватності прогнозу перевірено модель за критерієм d_a , тобто перевірено чи всі значення абсолютних похибок не перевищують допустимий рівень $\varepsilon = 10$, що був заданий до побудови моделі:

$$d_a = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \Delta x_t, \quad \Delta x_t = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\varepsilon_t| > d, \\ 0, & \text{якщо } |\varepsilon_t| \leq d. \end{cases} \quad (7)$$

В результаті розрахунків робимо висновок, що модель адекватна за показником d_a , оскільки $d_a = 0$.

Розроблено алгоритм визначення стану випарної установки на основі інтелектуальних методів кластеризації та класифікації з використанням часових рядів технологічних змінних ВУ. Кластеризація за допомогою самоорганізаційних карт Кохонена (англ. Self-organizing map — SOM) проведена з метою визначення можливих варіантів станів об'єкта керування (проведена 10 разів при змінюванні параметрів налаштування навчання).

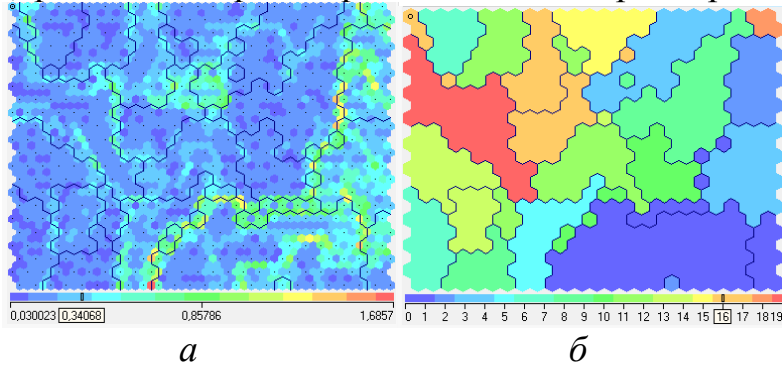


Рис. 5. Один з варіантів кластеризації: а – матриця відстаней; б – карта розбиття на кластери

Визначення найкращого варіанту кластеризації проведено за допомогою індексу силуету (Silhouette index):

$$S_{x_i} = \frac{b_{p_i} - a_{p_i}}{\max(a_{p_i}, b_{p_i})} \quad (8)$$

де a_{p_i} – середня відстань до елем. цього кластеру; b_{p_i} – відстань до елем. інших класт.

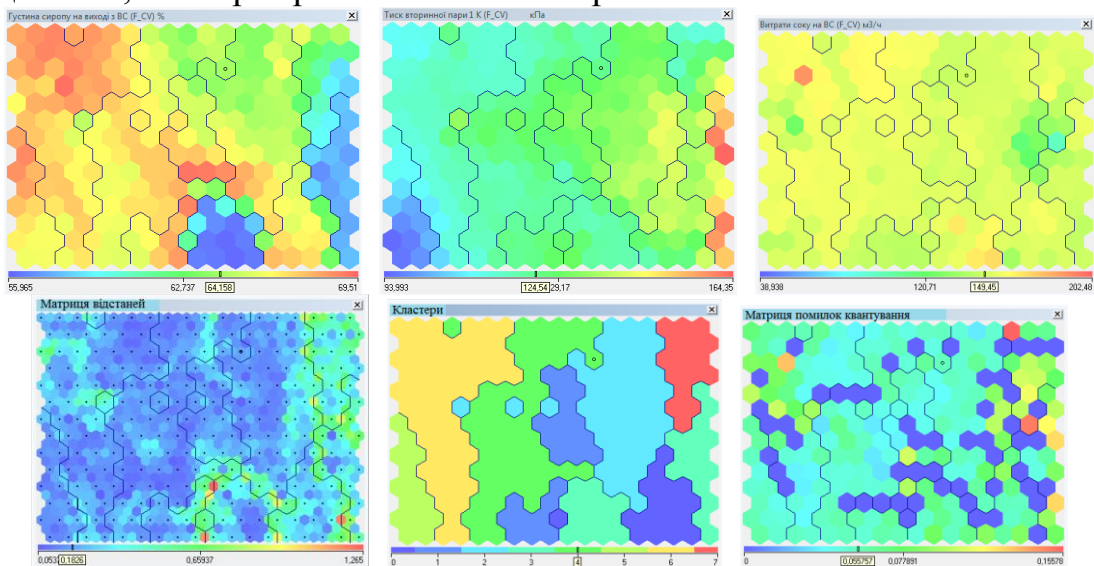


Рис.6. Кращий результат кластеризації за значенням індексу силуету. На основі кращого варіанту кластеризації проведено навчання нейронної мережі з метою нечіткої класифікації можливих станів об'єкта.

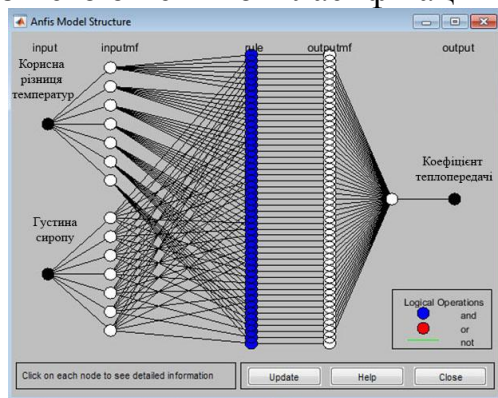


Рис. 7. Структура ANFIS-мережі для визначення коефіцієнта теплопередачі

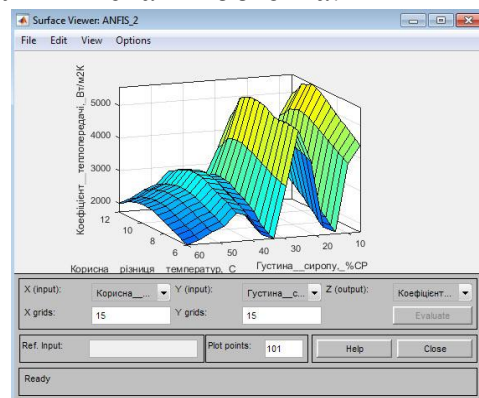


Рис. 8. Залежність коефіцієнта теплопередачі від корисної різниці температур та густини сиропу

В зв'язку з тим, що одним з факторів, що суттєво впливає на роботу випарної установки та її регулювання, є коефіцієнт теплопередачі, показана можливість його оцінки за умов відносно чистої поверхні нагріву на основі інформації про густину вхідного соку та про корисну різницю температур між грійною парою та розчином за допомогою адаптивної мережі нечіткого висновку Сугено – Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS), що реалізована у вигляді п'ятишарової нейронної мережі з прямим розповсюдженням сигналу, структура якої наведена на рис. 7.

В результаті навчання нейро-нечіткої мережі представленої структури, де були використані функції належності вхідних змінних дзвіноподібного типу, отримано поверхню відгуку (рис. 8), що відображає області визначень коефіцієнта теплопередачі за корисною різницею температур та густиною сиропу при умові відносно чистої поверхні нагріву.

При постановці задачі багатокритеріальної оптимізації керуємось критерієм економічної ефективності для ВУ (1), за яким для максимізації прибутку визначаємо наступні цілі оптимального керування ВУ: підвищення продуктивності випарної установки, зменшення витрат на процес випарювання та підвищення якості кінцевого продукту (сиропу). Ступінь досягнення кожної із наведених цілей характеризується критерієм оптимізації, який є вихідним контрольованим параметром, так для ВУ виділені такі часткові критерії:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} b_i \\ S_i \\ D_i \end{array} \right\}_i \quad \begin{array}{l} - \text{якість;} \\ - \text{продуктивність;} \\ - \text{витрати,} \end{array} \quad (9)$$

де F – адитивна загальна цільова функція; i – індекс, що відповідає номеру кластеру стану ВУ і змінюється в межах від 0 до S , де кількість можливих станів ВУ – 8.

З метою проведення багатокритеріальної оптимізації виділені такі критерії оптимальності (цілі) функціонування ВУ та змінні, що на них впливають:

- $b_{сир}(S_{сок}, b_{сок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k)$, де $b_{сир}$ – концентрація вмісту сухих речовин в сиропі на виході з ВУ, %; $S_{сок}, b_{сок}$ – витрата (м3/год.) та концентрація вмісту сухих речовин (%) соку, що надходить на ВУ; W – сумарна витрата вторинної пари з ВУ, м3/год.; P_k – розрідження в концентраторі, %; h_1, h_2, h_3, h_4, h_k – рівні в 1-4 корпусах ВУ та концентраторі, %;
- $S_{сир}(S_{сок}, b_{сок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k)$, де $S_{сир}$ – витрата сиропу на виході з ВУ, м3/год.;
- $D(S_{сок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k)$, де D – витрата ретурної пари на ВУ, м3/год.

В результаті моделювання якісного показника процесу випарювання на ВУ з використанням методу найменших квадратів отримали поліном наступного виду:

$$\begin{aligned}
b_{cup}(S_{cок}, b_{cок}, W, P_{к}, h_1, h_2, h_3, h_4, h_{к}) = & 1316 - 36,6498 \cdot S_{cок} + 50,89 \cdot b_{cок} + 0,1006 \cdot S_{cок}^2 - \\
& - 0,295 \cdot S_{cок} \cdot b_{cок} - 0,3447 \cdot b_{cок}^2 - 3,401 \cdot W + 0,004595 \cdot S_{cок} \cdot W + 0,01526 \cdot W^2 - \\
& - 2,147 \cdot P_{к} + 0,005908 \cdot S_{cок} \cdot P_{к} + 0,0258 \cdot P_{к}^2 + 0,761 \cdot h_1 - 0,02491 \cdot S_{cок} \cdot h_1 + 0,04078 \cdot h_1^2 + \\
& + 0,7022 \cdot h_2 + 0,0007571 \cdot S_{cок} \cdot h_2 - 0,006549 \cdot h_2^2 + 1,442 \cdot h_3 - 0,0184 \cdot S_{cок} \cdot h_3 + \\
& + 0,01479 \cdot h_3^2 - 5,047 \cdot h_4 + 0,02089 \cdot S_{cок} \cdot h_4 + 0,01946 \cdot h_4^2 - 0,7934 \cdot h_{к} + 0,004366 \cdot S_{cок} \cdot h_{к} + \\
& + 0,004411 \cdot h_{к}^2 - 0,191 \cdot b_{cок} \cdot W - 0,001083 \cdot b_{cок} \cdot P_{к} - 0,1768 \cdot b_{cок} \cdot h_1 - 0,3604 \cdot b_{cок} \cdot h_2 - \\
& - 0,5724 \cdot b_{cок} \cdot h_3 + 0,1982 \cdot b_{cок} \cdot h_4 - 0,09815 \cdot b_{cок} \cdot h_{к} - 0,01124 \cdot W \cdot P_{к} - 0,08036 \cdot W \cdot h_1 + \\
& + 0,0089 \cdot W \cdot h_2 + 0,04615 \cdot W \cdot h_3 - 0,002811 \cdot W \cdot h_4 + 0,02995 \cdot W \cdot h_{к} - 0,1168 \cdot P_{к} \cdot h_1 + \\
& + 0,1878 \cdot P_{к} \cdot h_2 + 0,03935 \cdot P_{к} \cdot h_3 - 0,04951 \cdot P_{к} \cdot h_4 - 0,1464 \cdot P_{к} \cdot h_{к} + 0,0542 \cdot h_1 \cdot h_2 - \\
& - 0,04168 \cdot h_1 \cdot h_3 - 0,05612 \cdot h_1 \cdot h_4 - 0,00014 \cdot h_1 \cdot h_{к} + 0,01688 \cdot h_2 \cdot h_3 - 0,01313 \cdot h_2 \cdot h_4 + \\
& + 0,04568 \cdot h_2 \cdot h_{к} + 0,01503 \cdot h_3 \cdot h_4 + 0,01209 \cdot h_3 \cdot h_{к} + 0,01455 \cdot h_4 \cdot h_{к}
\end{aligned} \quad (10)$$

Для продуктивності ВУ:

$$\begin{aligned}
S_{cup}(S_{cок}, b_{cок}, W, P_{к}, h_1, h_2, h_3, h_4, h_{к}) = & -52,6 + 3,957 \cdot S_{cок} - 38,77 \cdot b_{cок} - 0,02181 \cdot S_{cок}^2 + \\
& + 0,215 \cdot S_{cок} \cdot b_{cок} + 0,3738 \cdot b_{cок}^2 - 9,671 \cdot W + 0,000411 \cdot S_{cок} \cdot W - 0,00012 \cdot W^2 - \\
& - 5,802 \cdot P_{к} + 2,156 \cdot S_{cок} \cdot P_{к} - 0,7058 \cdot P_{к}^2 - 2,174 \cdot h_1 + 2,682 \cdot S_{cок} \cdot h_1 - 2,612 \cdot h_1^2 - \\
& - 4,072 \cdot h_2 + 1,425 \cdot S_{cок} \cdot h_2 + 0,8157 \cdot h_2^2 - 4,01 \cdot h_3 - 0,8537 \cdot S_{cок} \cdot h_3 + 0,8344 \cdot h_3^2 - \\
& - 9,98 \cdot h_4 - 6,902 \cdot S_{cок} \cdot h_4 - 9,828 \cdot h_4^2 - 5,946 \cdot h_{к} + 0,9932 \cdot S_{cок} \cdot h_{к} - 1,083 \cdot h_{к}^2 + \\
& + 2,282 \cdot b_{cок} \cdot W - 5,05 \cdot b_{cок} \cdot P_{к} + 1,984 \cdot b_{cок} \cdot h_1 - 0,2057 \cdot b_{cок} \cdot h_2 + 4,42 \cdot b_{cок} \cdot h_3 + \\
& + 1,793 \cdot b_{cок} \cdot h_4 + 3,065 \cdot b_{cок} \cdot h_{к} + 1,719 \cdot W \cdot P_{к} + 10,11 \cdot W \cdot h_1 - 1,51 \cdot W \cdot h_2 - 1,138 \cdot W \cdot h_3 + \\
& + 0,2426 \cdot W \cdot h_4 - 5,614 \cdot W \cdot h_{к} + 2,992 \cdot P_{к} \cdot h_1 - 5,559 \cdot P_{к} \cdot h_2 - 2,368 \cdot P_{к} \cdot h_3 - \\
& - 5,725 \cdot P_{к} \cdot h_4 - 17,19 \cdot P_{к} \cdot h_{к} - 6,894 \cdot h_1 \cdot h_2 + 4,107 \cdot h_1 \cdot h_3 - 1,326 \cdot h_1 \cdot h_4 - 2,388 \cdot h_1 \cdot h_{к} - \\
& - 3,64 \cdot h_2 \cdot h_3 + 6,542 \cdot h_2 \cdot h_4 - 11,07 \cdot h_2 \cdot h_{к} - 6,669 \cdot h_3 \cdot h_4 - 2,259 \cdot h_3 \cdot h_{к} + \\
& + 3,596 \cdot h_4 \cdot h_{к}
\end{aligned} \quad (11)$$

Для витрат:

$$\begin{aligned}
D(S_{cок}, W, P_{к}, h_1, h_2, h_3, h_4, h_{к}) = & -52,6 + 3,957 \cdot S_{cок} - 0,02181 \cdot S_{cок}^2 + 1,93 \cdot W + \\
& + 0,00353 \cdot S_{cок} \cdot W - 0,00015 \cdot W^2 + 1,16 \cdot P_{к} - 0,4312 \cdot S_{cок} \cdot P_{к} + 0,1412 \cdot P_{к}^2 + \\
& + 0,4348 \cdot h_1 - 0,5364 \cdot S_{cок} \cdot h_1 + 0,5224 \cdot h_1^2 + 0,8144 \cdot h_2 - 0,2851 \cdot S_{cок} \cdot h_2 - \\
& - 0,1631 \cdot h_2^2 + 0,8019 \cdot h_3 + 0,1707 \cdot S_{cок} \cdot h_3 - 0,1669 \cdot h_3^2 + 1,996 \cdot h_4 + 1,38 \cdot S_{cок} \cdot h_4 + \\
& + 1,966 \cdot h_4^2 + 1,189 \cdot h_{к} - 0,1986 \cdot S_{cок} \cdot h_{к} + 0,2165 \cdot h_{к}^2 + 0,00031 \cdot W \cdot P_{к} + \\
& + 0,000224 \cdot W \cdot h_1 + 0,000398 \cdot W \cdot h_2 - 0,00099 \cdot W \cdot h_3 + 0,00054 \cdot W \cdot h_4 + \\
& + 0,000998 \cdot W \cdot h_{к} - 5,198 \cdot P_{к} \cdot h_1 + 12,36 \cdot P_{к} \cdot h_2 + 0,8479 \cdot P_{к} \cdot h_3 - 3,981 \cdot P_{к} \cdot h_4 - \\
& - 14,51 \cdot P_{к} \cdot h_{к} - 1,396 \cdot h_1 \cdot h_2 - 0,9559 \cdot h_1 \cdot h_3 - 5,341 \cdot h_1 \cdot h_4 - 3,601 \cdot h_1 \cdot h_{к} + \\
& + 0,002854 \cdot h_2 \cdot h_3 + 1,298 \cdot h_2 \cdot h_4 + 1,669 \cdot h_2 \cdot h_{к} - 0,6494 \cdot h_3 \cdot h_4 + 0,3394 \cdot h_3 \cdot h_{к} + \\
& + 6,255 \cdot h_4 \cdot h_{к}
\end{aligned} \quad (12)$$

Табл.3. Критерії оцінки якості регресійних моделей

Розроблені моделі	Критерії			
	Q_e	S_e	R^2	F
Модель (10)	74,2	2,38	0,56	4,9
Модель (11)	79,9	2,47	0,53	4,7
Модель (12)	98,6	2,75	0,42	4,5

Проведено оцінку якості отриманих регресійних моделей (10), (11), (12), результати якої наведено в табл. 3.

Пріоритетність критеріїв експертно-визначені в кожному із можливих кластерів станів та розподілені наступним чином (табл. 4):

Табл. 4. Ранжування пріоритетностей критеріїв

№ клас-теру	Густина сиропу	Витрата сиропу	Пріоритет критерію якості	Пріоритет критерію продуктивн.	Пріоритет критерію витрати
0	«вище норми»	«менше норми»	<i>меньше (0,2)</i>	<i>большее (0,45)</i>	<i>среднее (0,35)</i>
1	«вище норми»	«в межах норм»	<i>меньше (0,2)</i>	<i>среднее (0,35)</i>	<i>большее (0,45)</i>
2	«в межах норми»	«вище норми»	<i>среднее (0,35)</i>	<i>меньше (0,2)</i>	<i>большее (0,45)</i>
3	«менше норми»	«вище норми»	<i>большее (0,45)</i>	<i>меньше (0,2)</i>	<i>среднее (0,35)</i>
4	«в межах норми»	«в межах норм»	<i>среднее (0,33)</i>	<i>среднее (0,33)</i>	<i>среднее (0,33)</i>
5	«менше норми»	«в межах норм»	<i>большее (0,45)</i>	<i>среднее (0,35)</i>	<i>меньше (0,2)</i>
6	«в межах норми»	«менше норми»	<i>среднее (0,35)</i>	<i>большее (0,45)</i>	<i>меньше (0,2)</i>
7	«менше норми»	«менше норми»	<i>большее (0,45)</i>	<i>среднее (0,35)</i>	<i>меньше (0,2)</i>

Для кожної цілі експерти виділили множину параметрів, які впливають на досягнення бажаних значень. Так якісний показник сиропу з ВУ(густина сиропу), продуктивність ВУ за сиропом (витрата сиропу) та витрати (витрата ретурної пари на ВУ) можна коригувати шляхом зміни в певних межах витрати соку на ВУ, розрідження в концентраторі та рівнів по корпусам.

Вирішувати задачу багатокритеріальної оптимізації необхідно з урахуванням обмежень параметрів:

$$20\% \leq h_1 \leq 40\%, \Rightarrow h_1 - 20 \geq 0, \quad h_1 - 40 \leq 0; \quad (13)$$

$$30\% \leq h_2 \leq 50\%, \Rightarrow h_2 - 30 \geq 0, \quad h_2 - 50 \leq 0; \quad (14)$$

$$35\% \leq h_3 \leq 55\%, \Rightarrow h_3 - 35 \geq 0, \quad h_3 - 55 \leq 0; \quad (15)$$

$$40\% \leq h_4 \leq 60\%, \Rightarrow h_4 - 40 \geq 0, \quad h_4 - 60 \leq 0; \quad (16)$$

$$50\% \leq h_k \leq 70\%, \Rightarrow h_k - 50 \geq 0, \quad h_k - 70 \leq 0; \quad (17)$$

$$b_{\text{сок}} \geq 0, \quad b_{\text{сок}} - 20 \leq 0, \quad (18)$$

$$P_k - 20 \geq 0, \quad S_{\text{сок}} \geq 0, \quad W \geq 0. \quad (19)$$

Вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації проведено методом наближення до цілей, що включає вирази для множини цілей $F(x_1, \dots, x_n) = F_1(x_1, \dots, x_n), F_2(x_1, \dots, x_n), \dots, F_m(x_1, \dots, x_n)$. Допускається, що цілі можуть бути недо- або передосягнені, що контролюється за допомогою вектора зважених коефіцієнтів $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}$ і може бути представлено як стандартна задача оптимізації наступним чином:

minimize γ , де $\gamma \in R$, при умові, що

$$F_i(\bar{x}) - \omega_i \gamma \leq F_i^*, \quad i = 1, \dots, m \quad (20)$$

Пошук оптимального значення керування випарною установкою проводиться шляхом мінімізації значення γ для такої системи нерівностей:

$$\begin{cases} b_{\text{сир}}(S_{\text{сок}}, b_{\text{сок}}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k) - K_b \gamma \geq b_0 \\ S_{\text{сир}}(S_{\text{сок}}, b_{\text{сок}}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k) - K_S \gamma \geq S_0 \\ D(S_{\text{сок}}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k) - K_D \gamma \leq D_0 \end{cases} \quad (21)$$

де b_0, S_0, D_0 – координати «зоряної» точки, тобто сподівання при пошуку оптимального значення; K_b, K_S, K_D – вагові коефіцієнти, які відповідають раніше визначеним пріоритетам критеріїв та визначають наскільки близько

повинно бути рішення до оптимального результату. Дана задача була вирішена методом MINMAX, а оптимальні значення параметрів $S_{cок}, b_{cок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k$ знайдені при

$$\gamma = \min \max \frac{F_i(S_{cок}, b_{cок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k) - F_{io}}{K_i}, \quad (22)$$

де $F_i(S_{cок}, b_{cок}, W, P_k, h_1, h_2, h_3, h_4, h_k)$ - значення цільової функції в поточний момент часу; F_{io} - очікуване значення цільової функції; K_i - ваговий коефіцієнт.

У четвертому розділі розроблено автоматизовану систему випереджувального багатокритеріального керування випарною установкою цукрового заводу.

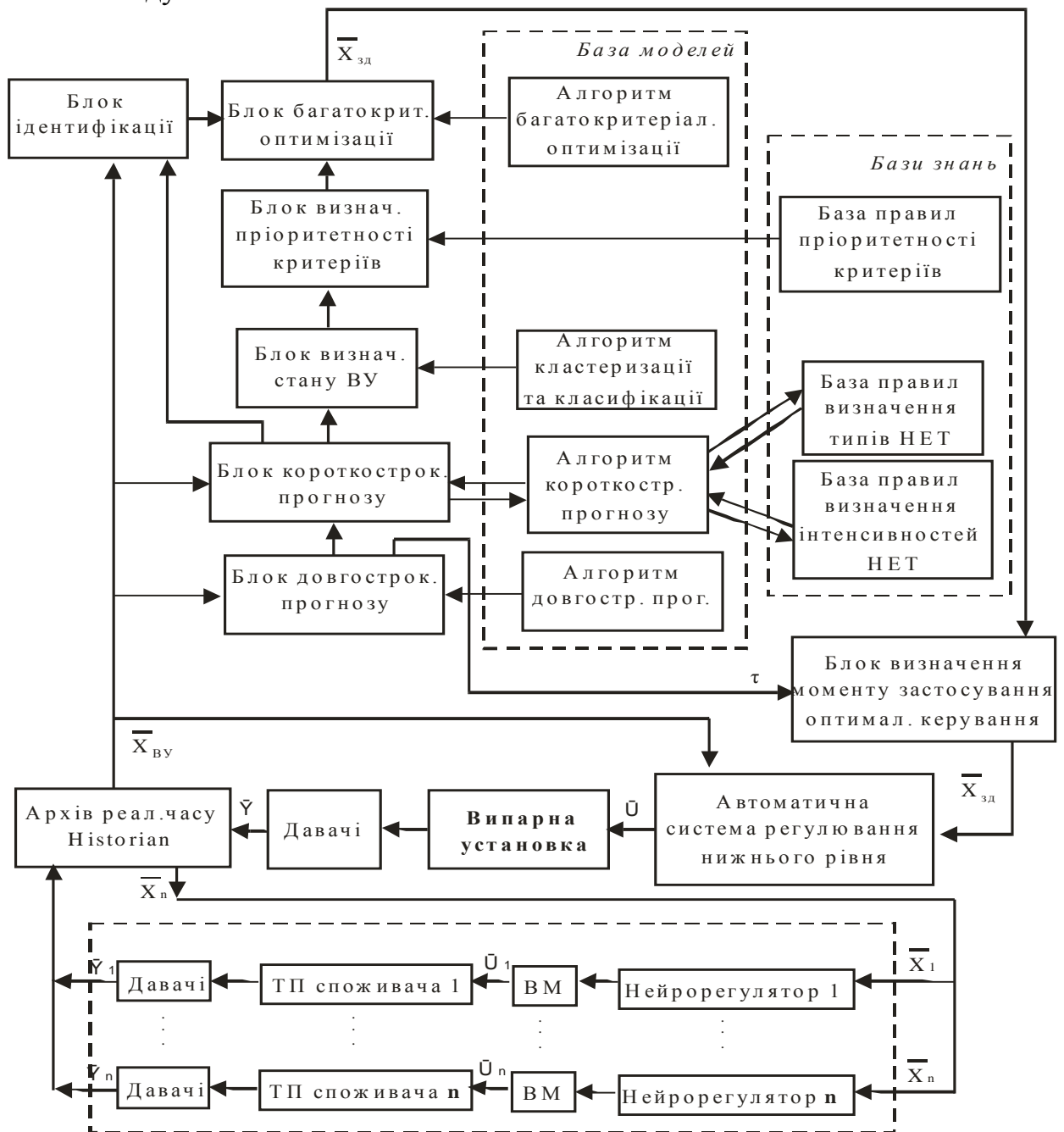


Рис. 9. Структура системи випереджувального багатокритеріального керування випарною установкою

Наведено структуру автоматизованої системи (рис. 9), в якій сигнали про технологічні змінні \bar{Y} випарної установки надходять від датчиків в архів реального часу Proficy Historian, в якому здійснюється видалення аномальних вимірювань, відновлення пропусків в даних та їх фільтрація. Сформований вектор стану $\bar{X}_{ВУ}$ подається на автоматичну систему регулювання нижнього рівня, яка на основі закладених в ній алгоритмів регулювання через виконавчі механізми реалізує керувальні дії \bar{U} на ВУ. В блоці довгострокового прогнозу визначаються час настання найближчої ключової точки τ , який і є горизонтом короткострокового прогнозу, який проводиться на основі часових рядів ВУ з використанням методів прогнозування НЕТ. Далі у відповідних блоках проводиться параметрична ідентифікація та визначення прогнозованого стану ВУ, що є основою для визначення пріоритетності критеріїв якості, продуктивності та витрати для проведення багатокритеріальної оптимізації.

Оптимальні значення керувальних впливів надходять на блок автоматичної системи регулювання нижнього рівня у визначений момент часу, який відповідає горизонту короткострокового прогнозу. Також в системі передбачено встановлення нейронних прогнозних регуляторів на локальному рівні для регулювання температури при проходженні технологічних процесів споживачів вторинної пари ВУ (загальна кількість споживачів n).

Автоматизована система випереджувального багатокритеріального керування інтегрована в інформаційну вертикаль технологічного комплексу цукрового заводу (рис. 10).

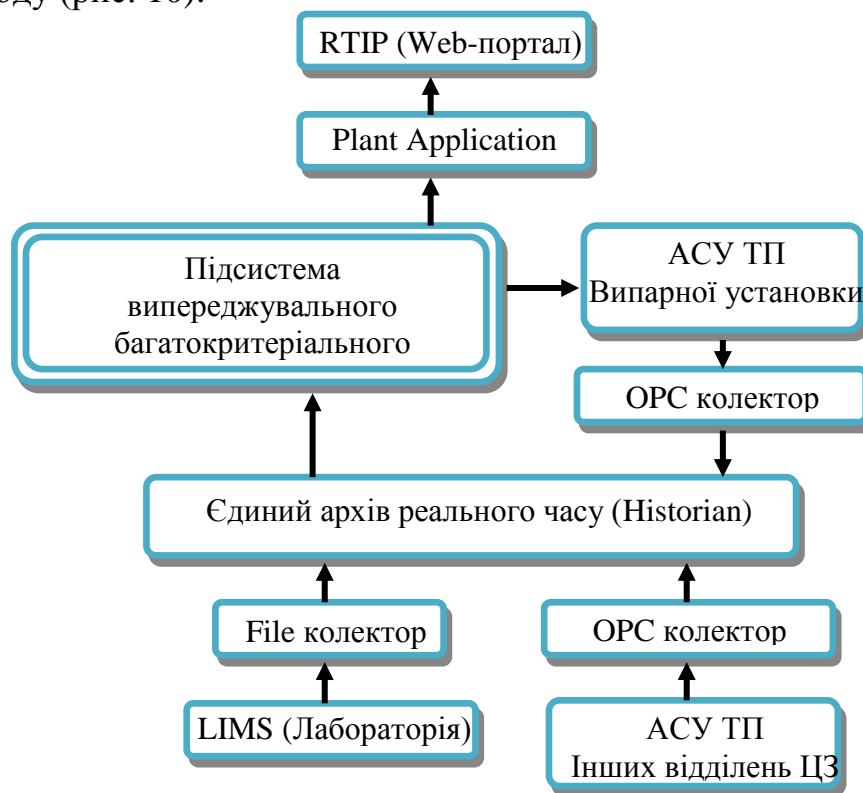


Рис. 10. Інтеграція підсистеми випереджувального багатокритеріального керування ВУ в інформаційну вертикаль цукрового заводу
Дані з нижнього рівня АСК ТП, а саме від АСК ТП випарної установки та АСК ТП інших відділень технологічного комплексу надходять через ОПС –

колектори в архів реального часу Proficy Historian, який здійснює видалення аномальних вимірювань, відновлення пропусків в даних та фільтрацію даних. Також в архів реального часу надходять дані з лабораторій через File – колектор від програмного продукту Laboratory Information Management System (LIMS), що забезпечує управління лабораторними потоками робіт та документів, а також оптимізує збір та аналіз лабораторних даних.

Для відображення динаміки функціонування розробленої системи та варіантів способів досягнення цілей створено модель процесу функціонування автоматизованої системи випереджувального багатокритеріального керування ВУ на основі розширеної темпоральної мережі Петрі (РТМП)(рис. 11.).

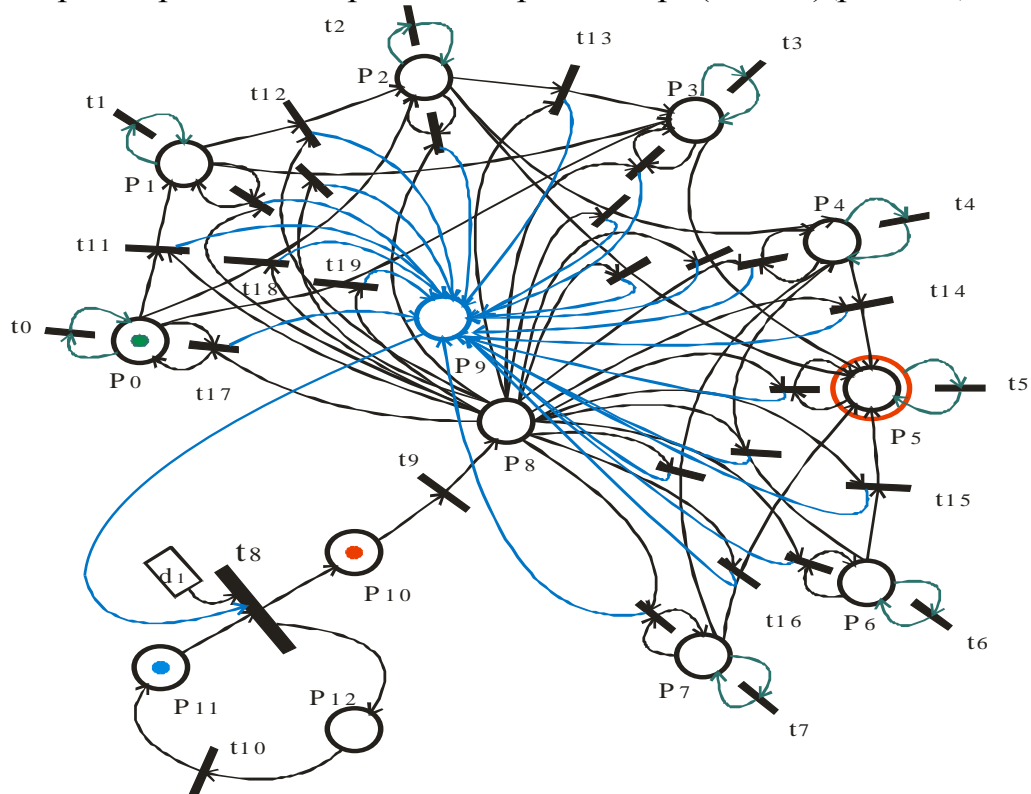


Рис. 11. Модель процесу функціонування автоматизованої системи випереджувального багатокритеріального керування ВУ на основі РТМП

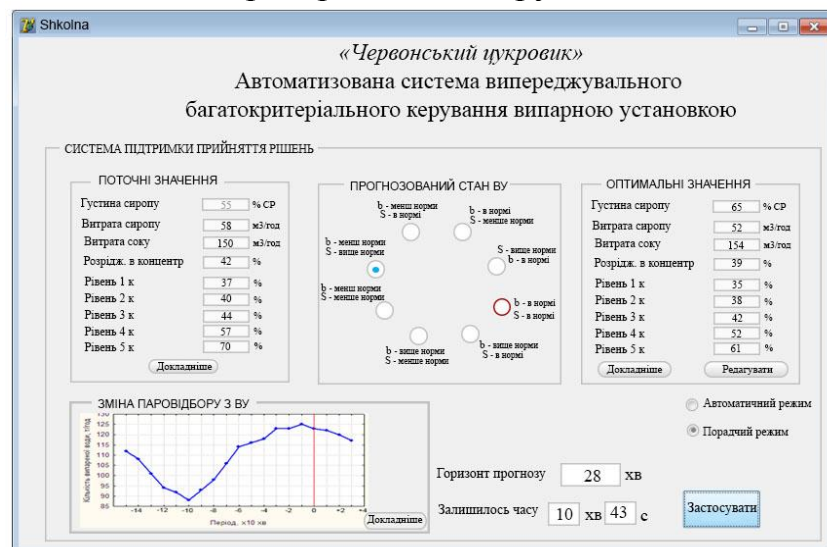


Рис. 12. Головне вікно розробленої системи

Інтерфейс роботи оператора з автоматизованою системою випереджувального багатокритеріального управління випарною установкою розроблено на основі середовища розробки додатків Delphi. Головне вікно розробленої програми представлено на рис. 12.

При розробці нейромережевої системи керування нижнього рівня з використанням прогнозної моделі використано нейромережеву модель типу ANNARX (Artificial Neural Network – based Auto Regressive eXogenous signal) такої структури: двошарова мережа з тангенціальними функціями активації в прихованому шарі та одним лінійним нейроном у вихідному шарі.

На першому етапі синтезу розроблено адекватну прогнозну модель об'єкта керування. В якості структури моделі обрано штучну нейронну мережу з регресором:

$$\varphi(t) = [y(t-1), \dots, y(t-2), u(t-1), \dots, u(t-2)]^T; \quad (23)$$

прогнозною моделлю:

$$y'(t | \theta) = y'(t | t-1, \theta) = g(\varphi(t), \theta); \quad (24)$$

кількістю входів штучної нейронної мережі: 2;

кількістю виходів штучної нейронної мережі: 1;

кількістю нейронів в прихованому шарі: 2.

На другому етапі синтезу на кожній ітерації визначається сигнал керування шляхом мінімізації критерію, що у векторній формі описується наступною залежністю:

$$J(\theta, U(t), t) = [R(t) - Y'(t)]^T [R(t) - Y'(t)] + \rho \tilde{U}^T(t) \tilde{U}(t) = E^T(t) E(t) + \rho \tilde{U}^T(t) \tilde{U}(t), \quad (25)$$

де

$$R(t) = [r(t + N_1) \dots r(t + N_2)]^T, Y'(t) = [y'(t + N_1 | t) \dots y'(t + N_2 | t)]^T, \quad (26)$$

$$E(t) = [e(t + N_1 | t) \dots e(t + N_2 | t)]^T, \tilde{U}(t) = [\Delta u(t) \dots \Delta u(t + N_u - 1)]^T,$$

$$e(t + k | t) = r(t + k) - y'(t + k | t), \text{ для } k = \overline{N_1, N_2}. \quad (27)$$

$$\Delta u(t + i - 1) = u(t + i) - u(t + i - 1) \text{ та } \Delta u(t + i) = 0, \quad N_u \leq i \leq N_2 - d, \quad (28)$$

При визначенні мінімуму критерію (23) для нелінійного прогнозного керування використано ітеративні методи:

$$U_{k+1} = U_k + \eta_k d_k, \quad (29)$$

де U_k – вектор керуючих сигналів на k -й ітерації; η_k – крок алгоритму; d_k – напрямок пошуку.

В результаті моделювання визначені оптимальні параметри регулятора: горизонт прогнозу $N_2 = 2$; горизонт курування $N_u = 2$; коефіцієнт штрафу на керування $\rho = 0,001$.

Перевагами нейромережевого керування на основі прогнозних моделей є: його ефективність для систем з часовою затримкою; можливість керування нестійкими, номінально-фазовими системами; можливість налаштування параметрів алгоритму в залежності від динамічних властивостей об'єкта.

В той же час необхідно враховувати складність розрахунків; складність вибору критерію зупинки для ітеративного методу; можливість для критерію оптимізації мати більше одного локальних мінімумів.

За допомогою комп'ютерного моделювання проаналізовано процес стабілізації основних технологічних змінних ВУ з урахуванням її особливостей, зокрема запізнення за каналом керування, для чого оцінювалась ефективність застосування регуляторів Сміта.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі запропоновано новий підхід до удосконалення систем автоматизованого керування випарною установкою цукрового заводу, який полягає в організації енергоефективних алгоритмів інтелектуального багатокритеріального керування на основі випереджувальних оцінок потреб в енергоресурсах власне випарної установки та споживачів вторинної пари і забезпечує досягнення високих якісних кондицій продукції.

1. На основі проведеного системного аналізу, експертного опитування виявлені особливості поведінки випарної установки в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу, що проявляються в процесі функціонування ВУ як об'єкта керування, та сформульовані стратегії оперативної ефективної реалізації випереджувального енергоефективного керування.

2. Вперше розроблена модель випарної установки цукрового заводу на основі розширених мереж Петрі, що забезпечує випереджувальну оцінку потреб у вторинній парі технологічних споживачів, а також відтворює особливості виробництва цукрового сиропу.

3. Вперше здійснена постановка та розв'язана задача багатокритеріальної оптимізації роботи випарної установки цукрового заводу як компромісу за Парето між забезпеченням потреб споживачів в енергоресурсах та продуктивністю об'єкта керування із збереженням необхідних якісних кондицій сиропу.

4. Вперше розроблена інтелектуальна система випереджувального керування випарною установкою цукрового заводу на базі методів багатокритеріальної оптимізації (патент України № 97574).

5. Набули подальшого розвитку методи оцінки та класифікації технологічних ситуацій шляхом використання та реалізації нейромережевих підходів кластеризації та класифікації для отримання відповідних керувальних дій.

6. Набули подальшого розвитку методи прогнозування оцінки потреб споживачів в енергоресурсах на базі визначення нечітких тенденцій їх поведінки шляхом інтелектуального аналізу часових рядів технологічних змінних.

7. Удосконалено методи синтезу нейронних прогнозних регуляторів технологічних режимів ВУ цукрового заводу для можливості підвищення ефективності функціонування споживачів вторинної пари з випарної установки.

8. Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри автоматизації та інтелектуальних систем керування Національного університету харчових технологій та передані для впровадження на ПАТ «Червонський цукровик», що підтверджено відповідними довідками.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Идентификация процесса функционирования технологического комплекса / А. П. Ладанюк, Р. О. Бойко, Я. В. Смитюх, Е. В. Школьная // Современный научный вестник : научно-теоретический и практический журнал. – 2014. – № 19 (215). – С. 143-149.
2. Ладанюк, А. П. Управління випарною установкою в умовах невизначеності: інтелектуалізація прикладних функцій / А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, О. В. Школьна // Наукові праці НУХТ – 2015. – № 6.– С. 7-14.
3. Школьна, О. В. Мережеві моделі в задачах автоматизованого керування випарною станцією цукрового заводу / О. В. Школьна, А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько // Харчова промисловість : науковий журнал. – 2016. – № 19. – С. 119-124.
4. Non-linear recurrent analysis of the behavior of a complex technological object / V. D. Kyshenko, A. P. Ladanyuk, M. A. Sych, O. V. Shkolna // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 4, № 2(82). – P. 59-65.
5. Development of the Algorithm of Determining the State of Evaporation Station Using Neural Networks / A. P. Ladanyuk, V. D. Kyshenko, O. V. Shkolna, M. A. Sych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5, № 2(83). – P. 54-62.
6. Школьна, О. В. Прогнозування динаміки споживання вторинної пари з випарної установки / О. В. Школьна, В. Д. Кишенько, А. П. Ладанюк // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2016. – № 50. – С. 127-132.
7. Патент на корисну модель 97574 UA, МПК C13B 25/06 (2011.01) Система багатокритеріального управління випарною установкою / Школьна О. В., Кишенько В. Д., Ладанюк А. П. ; заявник Національний університет харчових технологій — № u 2014 09804 ; заявл. 05.09.2014 ; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6, 2015 р.
8. Школьна, О. В. Системно-кваліметричний аналіз випарної станції як об'єкта управління / О. В. Школьна // Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості : матеріали Міжнародної наукової конференції, 13-17 жовтня 2014 р. – К.: НУХТ, 2014. – С. 262.
9. Школьна, О. В. Можливості підвищення ефективності управління випарною установкою цукрового заводу / О. В. Школьна // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, 27 лист. 2014 р.– К. : НУХТ, 2014. – С. 114.
10. Ладанюк А. П. Управління випарною станцією цукрового заводу в складі теплоенергетичного комплексу / А. П. Ладанюк, О. В. Школьна //

Автоматика – 2015 : матеріали XXII Міжнародної конференції з автоматичного управління Одеса, 10-11 вересня 2015 р. - Одеса, 2015. - Секція 2. Управління та ідентифікація в умовах невизначеності. – С. 97-98.

11. Школьна, О. В. Формалізація процесу функціонування випарної установки в складі теплоенергетичного комплексу / О. В. Школьна // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами : матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції, 25 листопада 2015 р. – К. : НУХТ, 2015. – С. 103-104.

12. Школьна, О. В. Сучасні методи управління випарною установкою / О. В. Школьна // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : 81 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 23 – 24 квітня 2015 р. – К.: НУХТ, 2015. – Ч. 2. – С. 312.

13. Школьна, О. В. Використання алгоритму побудови нечіткої системи логічного висновку Мамдані при автоматизації випарної установки / О. В. Школьна, А. П. Ладанюк // Автоматика – 2016 : матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління, 22-23 вересня 2016 р. - Суми, 2016. - Секція 5. Управління та ідентифікація в умовах невизначеності. – С. 175.

14. Школьна, О. В. Використання нейронних мереж для визначення стану випарної установки цукрового заводу / О. В. Школьна // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем : матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 1-3 листопада 2016 р. – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2016. – С. 235-236.

15. Школьна, О. В. Аналіз випарної установки цукрового заводу на основі розширеної мережі Петрі / О. В. Школьна // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті : матеріали 82 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квітня 2016 р. – К.: НУХТ, 2016. – Ч. 2. – С. 300.

16. Shkolna, O. V. Intelligent control system of evaporation system / O. V. Shkolna // CEFood congress : 8th Central European Congress on Food, 23–26 May 2016 : Book of abstracts. - Kyiv, Ukraine, 2016. - P. 196.

17. Школьна, О. В. Використання аналізу часових рядів при керуванні випарною установкою цукрового заводу / О. В. Школьна // Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами : матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, 23 листопада 2016 р. – К. : НУХТ, 2016. – С. 153.

18. Школьна, О. В. Моделювання процесу випарювання в 1 корпусі ВУ на основі розфарбованих мереж Петрі / О. В. Школьна // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК : IV Міжнародна науково-практична конференція, 21-22 листопада 2016 р., Київ. – К. : НУБіП України, 2016. – С.170-171.

19. Ladanyuk, A. Automation of Evaporation Plants Using Energy-Saving Technologies / A. Ladanyuk, O. Shkolna, V. Kyshenko // Advances in Intelligent

АНОТАЦІЯ

Школьна О. В. Автоматизована система випереджувального багатокритеріального управління випарною установкою цукрового заводу.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2017.

Дисертація присвячена питанням підвищення ефективності функціонування випарної установки в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу. В результаті проведення системного аналізу, експертного опитування та мережевого моделювання процесу функціонування випарної установки цукрового заводу виявлені особливості поведінки, що проявляються в процесі функціонування об'єкта керування та сформульовані задачі оперативної ефективної реалізації стратегій енергоефективного керування. Розроблена модель випарної установки цукрового заводу на основі розширених мереж Петрі, що забезпечує випереджувальну оцінку потреб у вторинній парі технологічних споживачів, а також відтворює особливості виробництва цукрового сиропу. Здійснена постановка та розв'язана задача багатокритеріальної оптимізації роботи випарної установки цукрового заводу як компромісу за Парето між забезпеченням потреб споживачів в енергоресурсах та продуктивністю об'єкта керування із збереженням необхідних якісних кондицій сиропу. Розроблена інтелектуальна система керування випарною установкою в складі теплотехнологічного комплексу цукрового заводу на базі методів випереджувального керування та багатокритеріальної оптимізації. Набули подальшого розвитку методи оцінки та класифікації технологічних ситуацій шляхом використання та реалізації нейромережевих методів кластеризації та класифікації, а також методи прогнозування оцінки потреб споживачів в енергоресурсах на базі визначення нечітких тенденцій їх поведінки шляхом інтелектуального аналізу часових рядів технологічних змінних. Удосконалено методи синтезу нейронних прогнозних регуляторів технологічних режимів споживачів вторинної пари випарної установки цукрового заводу, для можливості підвищення ефективності їх функціонування.

Ключові слова: випарна установка, випереджувальне керування, прогнозування, багатокритеріальна оптимізація, інтелектуальна система керування, енергоефективне керування.

АННОТАЦИЯ

Школьная Е. В. Автоматизированная система упреждающего многокритериального управления выпарной установкой сахарного завода.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация процессов управления. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2017.

Диссертация посвящена вопросам повышения эффективности функционирования выпарной установки в составе теплотехнологического комплекса сахарного завода. В результате проведения системного анализа, экспертного опроса и сетевого моделирования процесса функционирования выпарной установки сахарного завода выявлены особенности ее поведения, которые проявляются в процессе функционирования выпарной установки как объекта управления и сформулированы задачи оперативной эффективной реализации стратегий энергоэффективного управления. Разработана модель выпарной установки сахарного завода на основе расширенных сетей Петри, что обеспечивает упреждающую оценку потребностей во вторичном паре технологических потребителей, а также воспроизводит особенности производства сахарного сиропа. Осуществлена постановка и решена задача многокритериальной оптимизации работы выпарной установки сахарного завода как компромисса по Парето между обеспечением потребителей в энергоресурсах и производительностью объекта управления с сохранением необходимых качественных кондиций сиропа. Разработана интеллектуальная система управления выпарной установкой как части теплотехнологического комплекса сахарного завода на базе методов упреждающего управления и многокритериальной оптимизации. Получили дальнейшее развитие методы оценки и классификации технологических ситуаций путем использования и реализации нейросетевых методов кластеризации и классификации, а также методы прогнозирования оценки потребностей потребителей в энергоресурсах на базе определения нечетких элементарных тенденций их поведения путем интеллектуального анализа временных рядов технологических переменных. Усовершенствованы методы синтеза нейронных прогнозных регуляторов технологических режимов потребителей вторичного пара выпарной установки сахарного завода, для возможности повышения эффективности их функционирования.

Ключевые слова: испарительная установка, опережающее управление, прогнозирование, многокритериальная оптимизация, интеллектуальная система управления, энергоэффективное управление.

SUMMARY

Shkolna O.V. Automated system of predictive multi-criteria control of evaporation system at the sugar refinery.

Thesis for a candidate degree in specialty 05.13.07 - automation of management processes. - National University of Food Technologies, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to improving the efficiency of the evaporation station as a part of thermal technological complex at the sugar refinery.

As a result of system analysis, expert interviews and modeling the functioning of evaporation station at the sugar refinery identified behaviors. It occur during the operation of the facility control and operational tasks formulated effective strategies resource saving control. The evaporation station model based on fuzzy temporal Petri nets with colored chips, which provides proactive assessment of needs in the secondary pair technology consumers and reproduces features of sugar syrup. Staged and resolved the problem of multi-objective optimization of the evaporation station at the sugar refinery as a compromise between ensuring Pareto consumer needs for energy and facility management productivity while maintaining the necessary quality of conditions syrup. The algorithm of determining the state of evaporation station as a control object based on intelligent methods of clustering and classification was developed. The applied method of clustering based on the Kohonen self-organizing maps allowed defining a set of possible states of the object on the basis on information hidden in time series of technological parameters of evaporation stations. The application of the method of fuzzy classification allowed determining the state of evaporation station in the current moment based on the values of current parameters of evaporation station and the obtained set of possible states of an object. The developed algorithm of determining the state of evaporation station as a control object is expedient to use in automated control systems with the purpose of operational determining the state of control object in order to make timely decisions on optimal control of evaporation station. Methods for the synthesis of neural predictive regulators are improved to control evaporation system as a part of technological complex and a part of heat and power complex

Keywords: evaporation system, predictive control, forecasting, multi-criteria optimization, intelligent control, energy saving control.