

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

БЕРЕСТ ОЛЕГ БОРИСОВИЧ

УДК 681.518

**МЕТОДИ КЛАСИФІКАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ
КЕРУВАННЯ ВИРОЩУВАННЯМ МОНОКРИСТАЛІВ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Сумському державному університеті, Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Довбиш Анатолій Степанович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри комп'ютерних наук

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Удовенко Сергій Григорович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, професор кафедри електронних
обчислювальних машин

кандидат технічних наук, доцент,
Кардашук Володимир Сергійович,
Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк),
доцент кафедри комп'ютерної інженерії

Захист відбудеться «_____» _____ 2015 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, м. Харків, 61166, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, м. Харків, 61166, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « » 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. П. Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Існуючі системи керування складними технологічними процесами характеризуються невисокою функціональною ефективністю, оскільки вони працюють за довільних початкових умов, впливу неконтрольованих збурюючих факторів і нечітких даних, що обумовлює апріорну невизначеність. У значній мірі це стосується і автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП) вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву, для якої забезпечення якісних характеристик скінтілятора на рівні вимог європейських та світових стандартів ускладнюється нестационарністю керованого процесу, високою точністю керування температурним полем і багатопараметричністю. При цьому зберігається вплив на якість виробу людського фактору. За таких умов основним шляхом підвищення функціональної ефективності АСКТП, яка працює за умов апріорної невизначеності, є надання їй властивості адаптивності на основі використання ідей і методів машинного навчання і розпізнавання образів, основи яких закладено в працях Івахненка О. Г., Васильєва В. І., Павлова О. А., Скуріхіна В. І., Кузьміна І. В., Руденка О. Г., Бодянського Є. В., Шабанова-Кушнарєнка Ю. П., Люггера Джорджа Ф., Ципкіна Я. З. та інших вчених. При цьому недостатньо дослідженими все ще залишаються науково-методологічні питання підвищення точності й оперативності здатних навчатися АСКТП вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів для випадків складних конфігурацій розподілів реалізацій образів за умов їх нечіткої компактності у просторі ознак розпізнавання, що має місце у практиці.

Таким чином, дисертаційна робота, що присвячена створенню основ інформаційного аналізу і синтезу здатної навчатися АСКТП вирощування скінтіляційних монокристалів із розплаву, що функціонує за умов апріорної невизначеності, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерних наук Сумського державного університету згідно з планами держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України «Моделі та методи інформаційних технологій в промисловості та освіті» (ДР № 0109U006555), «Розроблення науково-методичних основ та інформаційних засобів проектування здатних самонавчатися адаптивних систем керування технологічними процесами» (ДР № 0109U001380) і договором про науково-технічне співробітництво між Сумським державним університетом і Інститутом скінтіляційних матеріалів НАН України (м. Харків) від 15.04.2011 р., в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета роботи і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні функціональної ефективності автоматизованої системи керування вирощуванням монокристалів шляхом надання їй властивості адаптивності та здатності класифікувати функціональний стан технологічного процесу на основі машинного навчання та розпізнавання образів.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку інтелектуальних автоматизованих систем керування технологічним процесом вирощування монокристалів;

- розробити інформаційно-екстремальні методи машинного навчання системи підтримки прийняття рішень (СППР) для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів із розплаву і побудувати вирішальні правила для довільних конфігурацій нечіткої компактності реалізацій образів;

- розробити комплекс категорійних моделей машинного навчання СППР для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів з оптимізацією просторово-часових параметрів функціонування для довільних конфігурацій нечіткої компактності реалізацій образів;

- розробити інформаційний критерій функціональної ефективності і на його основі дослідити функціональну ефективність здатної навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів із розплаву для двох- і трьохальтернативних рішень;

- розробити метод візуалізації даних для багатовимірного об'єкту керування;

- використати розроблені моделі СППР для розв'язання прикладних завдань в промисловості та в навчальному процесі.

Об'єктом дослідження є слабоформалізований процес автоматичної класифікації функціональних станів керованого технологічного процесу вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву за умов апіорної невизначеності, інформаційних і ресурсних обмежень.

Предметом дослідження є методи моделювання та класифікації функціонального стану технологічного процесу вирощування монокристалів, оцінка функціональної ефективності та оптимізація просторово-часових параметрів машинного навчання СППР, що функціонує за умов апіорної невизначеності та довільних конфігурацій нечіткої компактності реалізацій образів.

Методи дослідження концептуальних і теоретичних основ роботи базуються на евристичних методах системного аналізу для створення основ інформаційного синтезу здатної навчатися СППР; методах та характеристиках теорії інформації для оцінки функціональної ефективності СППР, що навчається; методах інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології) аналізу даних для побудови безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил та на об'єктно-орієнтованій методології проектування складних систем і програмного забезпечення.

Оцінка ефективності застосування розроблених методів здійснювалася на основі аналізу результатів комп'ютерного моделювання за експериментальними даними, отриманими у виробничих умовах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що поставлено та вирішено важливе науково-технічне завдання підвищення функціональної ефективності здатної навчатися АСКТП вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву, що функціонує за умов апіорної невизначеності. Конкретні нові наукові результати, одержані особисто здобувачем, полягають у наступному:

1 Вперше розроблено новий інформаційно-екстремальний метод аналізу і синтезу здатної навчатися СППР, у якому, на відміну від існуючих, запропоновано використання контейнерів циліндроїдної форми, що дозволило розширити системі керування її функціональні можливості у випадку складних конфігурацій нечіткої компактності реалізацій образів.

2 Удосконалено інформаційно-екстремальний метод оптимізації часових параметрів: періоду оброблення вхідних даних і моменту перенавчання системи, який, на відміну від існуючих, використовує запропонований модифікований критерій, що дозволило підвищити оперативність прийняття керуючих рішень.

3 Удосконалено метод візуалізації даних, представлених у бінарному вигляді, який шляхом використання спіральної системи координат дозволяє представити багатовимірний двійковий вектор-реалізацію образу у вигляді точки на площині.

4 Отримав подальший розвиток метод визначення функціональної ефективності здатної навчатися автоматизованої системи керування за рахунок використання трьохальтернативної системи оцінки класифікаційних рішень, що дозволило підвищити достовірність їх прийняття.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі узагальнення відомих результатів і застосування нових наукових положень, запропонованих у дисертації, формується сучасна науково-методологічна основа проектування здатних навчатися СППР для автоматизації розподілених у часі та просторі керованих нестационарних технологічних процесів, які відбуваються за умов апріорної невизначеності, нечітких даних і ресурсних обмежень.

Результати дисертації впроваджені у вигляді інформаційного та програмного забезпечення проектування інтелектуальних СППР при розв'язанні завдань керування розподіленими у часі та просторі технологічними процесами, що підтверджується актами впровадження при модернізації існуючої АСКТП в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України, м. Харків (акт впровадження від 22.01.2015 р.) і в навчальний процес Сумського державного університету, м. Суми при підготовці бакалаврів за спеціальністю 6.040302 – інформатика та 6.050201 – системна інженерія (акт впровадження від 20.12.2014 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати, які виносяться на захист, отримано здобувачем особисто, а саме: формування вхідного математичного опису, категорійні моделі, критерії оцінки функціональної ефективності та інформаційно-екстремальний метод машинного навчання здатної навчатися СППР для керування вирощуванням великогабаритних сцинтиляційних монокристалів із розплаву з використанням полімодальних циліндроїдних вирішальних правил на базі двох- і трьохальтернативних систем оцінок класифікаційних рішень, метод оптимізації кроку дискретизації вхідних даних; метод візуалізації багатовимірних даних, у тому числі в бінарному просторі, створення інфраструктури та апаратно-програмного інструментарію здатної навчатися СППР для керування вирощуванням великогабаритних сцинтиляційних монокристалів із розплаву.

У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1] – модифікований нормований критерій Кульбака; [2] – модифікована трьохальтернативна система оцінок рішень для СППР, що навчається; [3] – метод

навчання трьохальтернативної СППР; [4] – метод навчання СППР з циліндрідними контейнерами класів розпізнавання; [5] – функціональна схема та інформаційно-екстремальний метод розпізнавання голосових команд для керування рукою-маніпулятором; [6] – метод навчання інтелектуальної СППР для керування летючою пилою; [7] – метод оптимізації параметрів навчання інтелектуальної СППР для керування вирощуванням монокристалів; [8] – інформаційно-екстремальний метод розпізнавання лауерограм; [9] – метод візуалізації багатовимірних даних на площині; [10] – дослідження особливості поведінки модифікованого критерію Кульбака; [11] – метод побудови циліндрідних вирішальних правил на прикладі СППР для керування вирощуванням монокристалів; [12] – здатна навчатися СППР для керування вирощуванням монокристалів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи апробовано на п'яти міжнародних конференціях: міжнародна науково-практична конференція «Сучасні напрямки теоретичних та практичних досліджень» (м. Одеса, Україна, 2011), міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні системи та технології» (м. Суми, Україна, 2012), третя міжнародна науково-практичної конференції «Інтелектуальні системи в промисловості і освіті» (м. Суми, Україна, 2012), друга міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні системи та технології» (м. Суми, Україна, 2013), четверта міжнародна науково-практична конференція «Молоді вчені в рішенні актуальних проблем науки» (м. Владикавказ, Росія, 2013).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 12 наукових праць: 7 статей, з них 6 у наукових фахових виданнях України з технічних наук, 1 стаття у закордонному виданні; 5 публікацій у збірниках матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 180 сторінок, у тому числі: 61 рисунок і 16 таблиць по тексту, список використаних джерел з 191 найменувань на 22 сторінках і 2 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і завдання, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію й особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проаналізовано апаратний інструментарій існуючих АСКТП і показано, що застосування традиційних засобів автоматизації вирощування великоабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву не гарантує отримання високої якості функціональних матеріалів через вплив неконтрольованих збурюючих факторів, довільні початкові умови і нестационарність технологічного процесу. Як основну тенденцію підвищення функціональної ефективності АСКТП визначено надання їй властивості адаптивності шляхом використання ідей і методів машинного навчання та розпізнавання образів. Проведений аналіз керованого технологічного

процесу та методів інтелектуального контролю дозволив сформулювати основні завдання наукового дослідження, викладені у дисертаційній роботі.

У другому розділі проведено аналіз існуючого технологічного процесу вирощування великогабаритних лужно-галоїдних скінтіляційних монокристалів на установках типу «РОСТ» і за результатами аналізу методів класифікаційного керування обґрунтовано перспективність створення методів інформаційного аналізу і синтезу здатної навчатися АСКТП у рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології), що ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи у процесі її навчання.

Для стадії росту скінтілятору зі стабільним діаметром (рис. 1) здійснено формалізовану постановку завдання інформаційного синтезу здатної навчатися СППР для керування вирощуванням великогабаритних скінтіляційних монокристалів на установці типу «РОСТ».



Рисунок 1 – Розподіл часу тривалості ТП по стадіям росту монокристала

Для алфавіту класів розпізнавання $\{X_m^o | m = \overline{1, M}\}$, що характеризують M функціональних станів технологічного процесу, сформовано за архівними трендами вирощування монокристалів багатовимірну навчальну матрицю $\|y_{m,i}^{(j)}\|$ типу «об'єкт-властивість», в якій рядок визначає структурований вектор-реалізацію образу $\{y_{m,i}^{(j)} | i = \overline{1, N}\}$, де N – кількість ознак розпізнавання, а стовбець – випадкову навчальну вибірку $\{y_{m,i}^{(j)} | j = \overline{1, n}\}$, де n – обсяг вибірки. Крім того, визначено структурований вектор просторово-часових параметрів функціонування

$$g = \langle x_m, d_m, r_{m_1}, r_{m_2}, \delta_{K,i}, \rho_m, \tau_K, \tau_r \rangle, \quad (1)$$

координати якого впливають на функціональну ефективність навчання СППР.

У виразі (1) x_m – еталонний (усереднений) вектор-реалізація образу, вершина якого визначає геометричний центр контейнера класу X_m^o , який відновлюється в процесі машинного навчання в радіальному базисі простору ознак розпізнавання; d_m –

радіус гіперсферичного контейнера класу X_m^o ; r_{m_1} – поперечний радіус гіперциліндрічного контейнера класу X_m^o ; r_{m_2} – повздовжній радіус гіперциліндрічного контейнера класу X_m^o ; $\delta_{K,i}$ – поле контрольних допусків на i -ту ознаку розпізнавання; ρ_m – рівень селекції координат двійкового еталонного вектора-реалізації класу X_m^o ; τ_K – часовий інтервал формування корегуючих дій; t_r – часовий інтервал спостереження технологічного процесу, на якому параметри закону керування залишаються незмінними. При цьому головна задача інформаційно-екстремального машинного навчання СППР полягає в побудові в процесі оптимізації просторово-часових параметрів вектора (1) безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил шляхом ітераційного пошуку глобального максимуму усередненого за алфавітом $\{X_m^o\}$ інформаційного КФЕ навчання СППР в робочій (допустимій) області визначення його функції

$$\bar{E}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{\{k\}} E_m^{(k)}, \quad (2)$$

де $E_m^{(k)}$ – інформаційний КФЕ навчання СППР розпізнавати реалізації класу X_m^o , який обчислюється на k -й ітерації; $\{k\}$ – множина кроків ітерації.

При функціонуванні СППР безпосередньо в робочому режимі, необхідно прийняти рішення про належність вектора-реалізації, який характеризує поточний функціональний стан технологічного процесу, до відповідного класу розпізнавання.

У роботі запропоновано комплекс категорійних моделей, які регламентують роботу системи в режимах оптимізації параметрів функціонування (1). На рис. 2 показано категорійну модель інформаційно-екстремального навчання СППР з оптимізацією просторово-часових параметрів функціонування у вигляді узагальненого орієнтованого графа, в якому відображення множин здійснюється різними операторами, що позначають відповідні ребра.

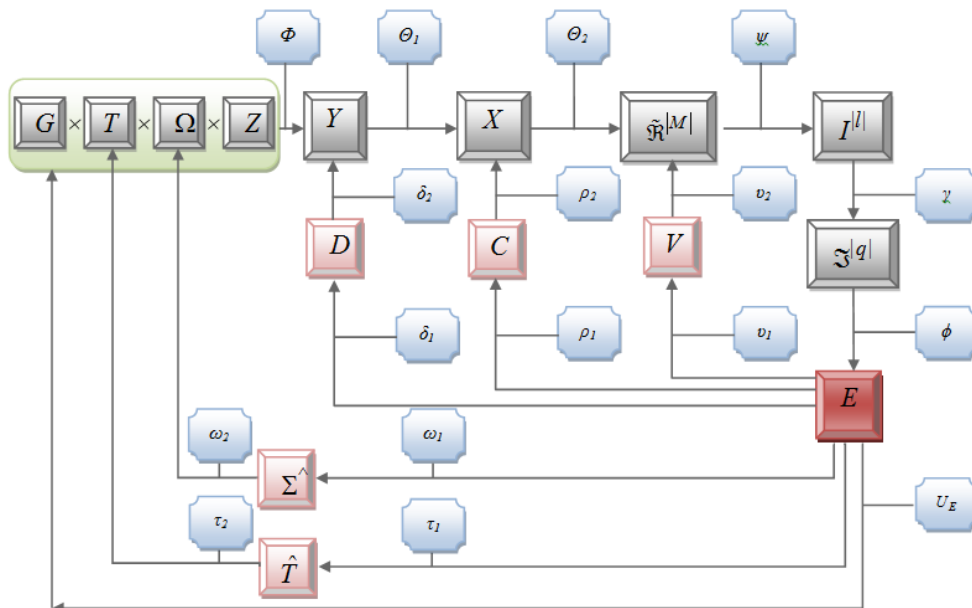


Рисунок 2 – Категорійна модель навчання СППР

Категорійна модель (рис. 2) містить оператор формування багатовимірної навчальної матриці типу «об'єкт-властивість»

$$\Phi: G \times T \times Z \times \Omega \rightarrow Y,$$

де G – простір факторів, які впливають на об'єкт керування; T – множина моментів зняття інформації; Ω – простір ознак розпізнавання; Z – простір можливих функціональних станів АСКТП; Y – вибірка множина, на основі якої формується вхідна навчальна матриця; X – бінарна навчальна матриця; $\mathfrak{R}^{|M|}$ – розбиття простору ознак на M класів розпізнавання; $I^{|l|}$ – множина l гіпотез; $\mathfrak{Z}^{|q|}$ – множина точнісних характеристик; E – терм-множина значень критерію функціональної ефективності (КФЕ). На рис. 2 показано контури оптимізації системи контрольних допусків (СКД) на ознаки розпізнавання, рівнів селекції координат двійкових еталонних векторів і геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання, які містять відповідно терм-множини D – СКД на ознаки і C – рівні селекції, та множину V вирішальних правил, що будуються в радіальному базисі простору ознак. Крім того, в моделі показано контури оптимізації часових параметрів функціонування: періодів з датчиків та перенавчання СППР, які містять відповідно терм-множини $T = \{\tau\}$, де τ – період формування керуючих дій, і $T_2 = \{t_H\}$, де t_H – період перенавчання СППР, обумовлений необхідністю зміни параметрів локальних регуляторів на інтервалі спостереження технологічного процесу. Оператор $U_E: E \rightarrow G \times T \times \Omega \times Z$ регламентує процес навчання.

На базі інформаційної міри Кульбака запропоновано КФЕ для трьохальтернативної системи оцінок рішень, який має вигляд

$$E^{(k)} = \frac{1}{8n_{\min}} [2(K_1^{(k)} + K_2^{(k)} + K_3^{(k)} - 3n_{\min}) \times \log_2 \frac{K_1^{(k)} + K_2^{(k)} + K_3^{(k)} + 10^{-r}}{3n_{\min} - K_1^{(k)} - K_2^{(k)} - K_3^{(k)} + 10^{-r}}], \quad (3)$$

де $K_1^{(k)}$ – кількість подій, які полягали у належності реалізацій, що розпізнаються, до класу X_1^o – «Норма», якщо вони дійсно належать цьому класу; $K_2^{(k)}$ – кількість подій, які полягали у належності реалізацій, що розпізнаються, до класу «Менше норми», якщо вони дійсно належать цьому класу; $K_3^{(k)}$ – кількість подій, які полягали у належності реалізацій, що розпізнаються, до класу «БІЛЬШЕ НОРМИ», якщо вони дійсно належать цьому класу; n_{\min} – мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки; 10^{-r} – доданок, який вводиться з метою усунення проблеми поділу на нуль ($1 < r \leq 3$).

Запропонований КФЕ (3) дозволяє оцінювати функціональну ефективність навчання СППР для полімодальних розподілів реалізацій класів розпізнавання у просторі ознак і є узагальненням відомого критерію оптимізації параметрів навчання для унімодального класифікатора з єдиним центром розсіювання реалізацій образів.

В роботі шляхом фізичного моделювання показано, що КФЕ (3)

характеризується більш високими достовірністю і оперативністю в порівнянні з двохальтернативним інформаційним критерієм за рахунок одночасної побудови вирішальних правил для розпізнавання трьох класів і відсутності в процесі його реалізації усереднення значень КФЕ.

В роботі синтезовано СППР з гіперциліндроїдними вирішальними правилами, які враховують витягнутий розподіл реалізацій класів розпізнавання в просторі ознак і дозволили одержати вдвічі меншу обчислювальну трудомісткість алгоритму навчання у порівнянні з відомим гіпереліпсоїдним класифікатором. На рис. 3 показано категорійну модель навчання СППР з оптимізацією геометричних параметрів гіперциліндроїдних контейнерів класів розпізнавання.

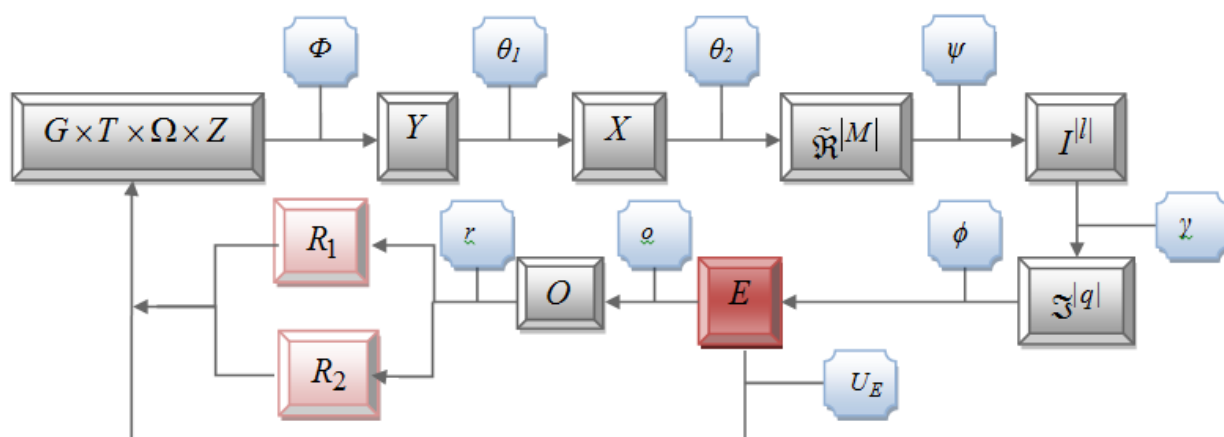


Рисунок 3 – Категорійна модель навчання СППР з гіперциліндроїдним класифікатором

В процесі навчання СППР із врахуванням особливостей бінарного простору за головну піввісь R_1 циліндра приймалася лінія, яка з'єднує будь-яку вершину вектора-реалізації з центром C циліндроїда (рис. 4). А оскільки у гіперциліндроїда існує дві півосі, то розглядалися пари таких точок. При цьому головна вісь залежно від просторового розташування цих векторів розглядалася як ламана лінія.

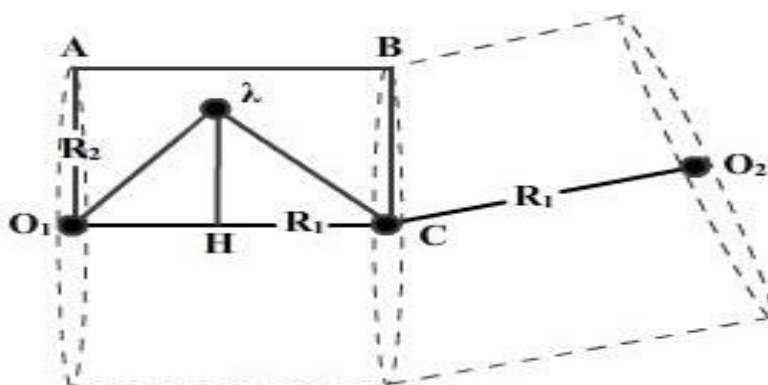


Рисунок 4 – Схема розташування вектора-реалізації відносно контейнера

Визначення на екзамени належності вектора-реалізації, що розпізнається, до відповідного гіперциліндроїдного контейнера здійснювалося за результатом оцінки потрапляння його вершини в межі прямокутника $ABCO_1$ в двовимірному просторі

(рис. 4). Оскільки довжини сторін прямокутника $ABCO_1$ відповідно дорівнюють головній піввісі R_1 циліндроїда і радіусу R_2 основи, а точки O_1 і O_2 є центрами основ гіперциліндра в бінарному просторі Хеммінга, то належність реалізації λ , наприклад, до контейнера класу X_m^o визначається за вирішальним правилом у вигляді умовної процедури

$$\begin{cases} \text{if } (\lambda H < BC) \&\&(HC < O_1C) \lambda \in X_m \\ \text{else } \lambda \notin X_m \end{cases} . \quad (4)$$

У виразі (4) кодова відстань λH визначається з прямокутного трикутника $\Delta H\lambda C$ (рис. 4):

$$\lambda H = \sqrt{\lambda C^2 - \left(\frac{O_1\lambda^2 - O_1C^2 - \lambda C^2}{2 \cdot O_1C}\right)^2}.$$

Таким чином, створено в рамках ІЕІ-технології основи інформаційного аналізу і синтезу здатної навчатися СППР для керування нестационарним технологічним процесом за умов апріорної невизначеності і довільної конфігурації розподілу векторів-реалізацій класів розпізнавання.

В третьому розділі розглядається оптимізація параметрів функціонування здатної навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування скінтіляційних монокристалів із розплаву та досліджується їх вплив на функціональну ефективність навчання системи. При цьому вхідну навчальну матрицю сформовано за архівними даними, одержаними при вирощуванні великогабаритних скінтіляторів діаметром 500 мм на установці типу «РОСТ».

За результатами фізичного моделювання показано, що машинне навчання СППР для керування технологічним процесом вирощування великогабаритних скінтіляторів за відомими інформаційно-екстремальними алгоритмами, в тому числі, з оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання і рівнів селекції двійкових координат еталонних векторів-реалізацій не дозволило побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила через високу ступінь перетину класів розпізнавання в просторі ознак розпізнавання і відмінність розподілу реалізацій образів від радіального.

Згідно з принципом відкладених рішень оптимізації інших параметрів навчання СППР досліджено вплив часових параметрів машинного навчання на функціональну ефективність машинного навчання СППР. При цьому алгоритм навчання СППР з оптимізацією кроку τ_K корекції технологічного процесу було згідно з моделлю (рис. 2) реалізовано у вигляді трьохциклічної ітераційної процедури пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ (3) навчання СППР в робочій області визначення його функції

$$\tau_K^* = \arg < \max_{G_\tau} \{ \max_{G_\delta} \{ \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{G_d} E_m \} \}, \quad (5)$$

де G_τ – область допустимих значень кроку корекції τ_K .

На рис. 5 показано процес оптимізації кроку корекції в часі за алгоритмом (5) на інтервалі спостереження, тривалістю 2 години. При цьому крок корекції за часом

змінювався від 10с до 30с з кроком ітерації $\Delta\tau_K = 2$ с, а кількість векторів-реалізацій в навчальних матрицях дорівнювала 60 для кожного класу розпізнавання.

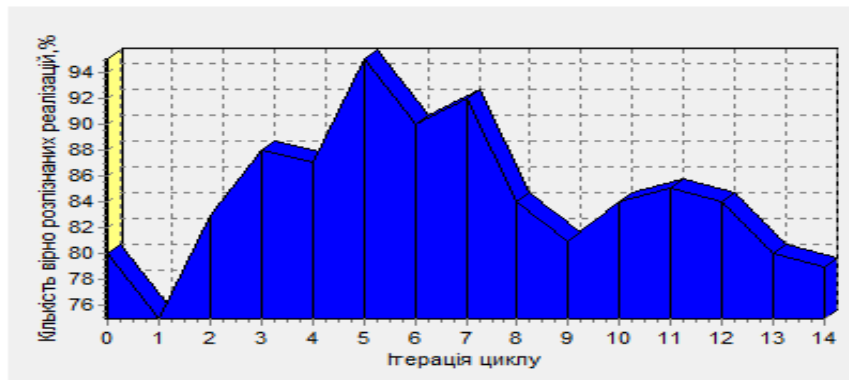


Рисунок 5 – Графік зміни правильно розпізнаних реалізацій в процесі оптимізації кроку корекції технологічного процесу

Аналіз рис. 5 показує, що оптимальний крок корекції досягається на шостій ітерації циклу, що відповідає $\tau_K^* = 20$ с. Тобто прийнятий на практиці період корекції $\tau = 15$ с є неоптимальним в інформаційному розумінні.

Оптимізація величини часового інтервалу спостереження за технологічним процесом здійснювалася при опитуванні датчиків з періодом $\tau = 5$ с і оптимальному кроці корекції $\tau_K^* = 20$ с за ітераційною процедурою

$$t_r^* = \arg \max_{G_{t_r}} \left\{ \max_{G_\delta} \left\{ \frac{1}{MR} \sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M \max_{G_d} E_m \right\} \right\}, \quad (6)$$

де G_{t_r} – область допустимих значень тривалості інтервалів спостереження за технологічним процесом.

На рис. 6 показано графік, одержаний в процесі навчання СППР за алгоритмом (6) з оптимізацією величини інтервалу спостереження технологічного процесу вирощування монокристала.

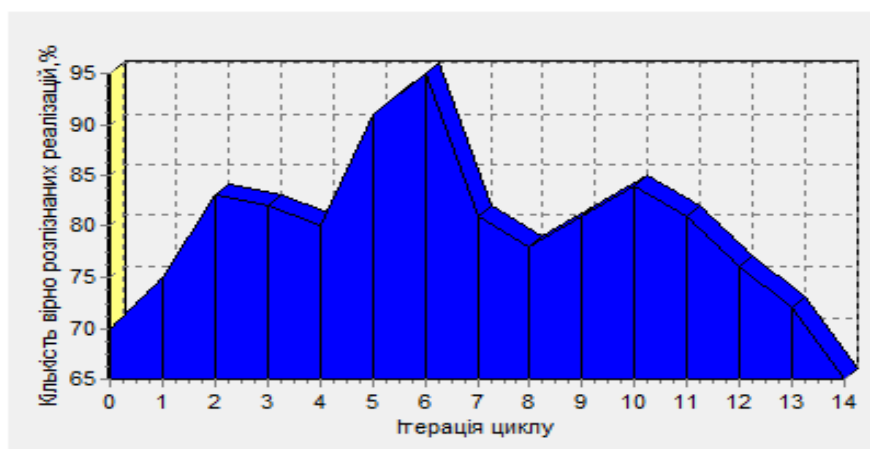


Рисунок 6 – Графік зміни правильно розпізнаних реалізацій в процесі оптимізації інтервалу спостереження

Аналіз рис. 6 показує, що оптимальна тривалість інтервалу спостереження досягається на сьомій ітерації циклу, що відповідає $t_r^* = 3$ години при кількості правильно розпізнаних реалізацій – 95%. Розширення часового інтервалу з двох годин, як це прийнято на практиці, до трьох годин пояснюється збільшенням кількості реалізацій у відсотках, які належать одному класу, який характеризує поточний стан керованого технологічного процесу.

Розроблено і програмно реалізовано алгоритм інформаційно-екстремального навчання СППР для керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів з гіперциліндроїдними вирішальними правилами. Фрагмент графіку зміни значень КФЕ (3) від кроку навчання показано на рис. 7. При цьому відновлення в просторі ознак гіперциліндроїдних контейнерів класів розпізнавання відбувалося безпосередньо після оптимізації геометричних параметрів гіперсферичних контейнерів.

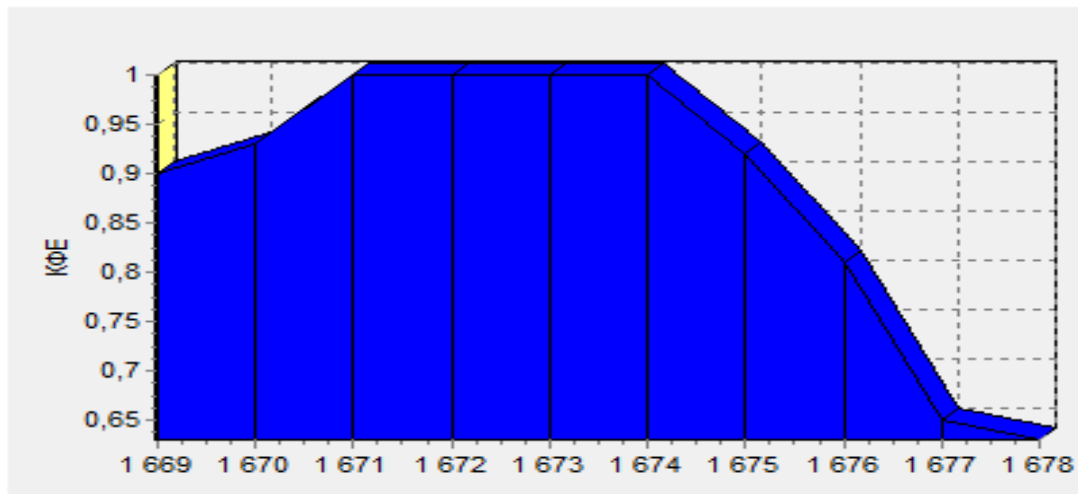


Рисунок 7 – Фрагмент графіка зміни КФЕ (3) в процесі відновлення гіперциліндроїдних контейнерів класів розпізнавання

Аналіз рис. 7 показує, що максимальне граничне значення критерію в робочій області досягнуто на 1671-му кроці навчання, тобто процес відновлення гіперциліндроїдних контейнерів в радіальному базисі простору ознак розпізнавання тривав 421 ітерацію, що складає 25% загального часу машинного навчання. і має вищу більш ніж в шість рази оперативність у порівнянні з гіпереліпсоїдним класифікатором. За результатами фізичного моделювання доведено, що перехід в процесі інформаційно-екстремального навчання СППР від гіперсферичного класифікатора до гіперциліндроїдного з використанням двохальтернативної системи оцінок рішень дозволив підвищити повну ймовірність правильного прийняття рішень класифікатора на 38,8%.

Значення оптимальних геометричних параметрів гіперциліндроїдних контейнерів класів розпізнавання наведені в табл. 1 при максимальному граничному усередненому значенні КФЕ $\bar{E}^* = 1,00$. В табл. 1 у відсотках показано збільшення максимумів КФЕ (3) у порівнянні з інформаційним критерієм, обчисленим за трьохальтернативною системою оцінок рішень.

Таблиця 1 – Результати корекції геометричних габаритів класів

	Клас 1	Клас 2	Клас 3
Збільшення значення КФЕ, %	92.3% \Rightarrow 100%	85.1% \Rightarrow 100%	90.8% \Rightarrow 100%
Оптимальний радіус гіперсферичного класифікатора, кодових одиниць	9	10	9
Оптимальна довжина піввісі R_1 , кодових одиниць	8	8	7
Оптимальна довжина радіуса основи R_2 , кодових одиниць	8	6	8
Усереднене значення КФЕ	1.0 (89.4% \Rightarrow 100%)		

Досліджено вплив на функціональну ефективність машинного навчання СППР обсягу навчальної вибірки з точки зору її репрезентативності та оперативності алгоритму навчання як для двохальтернативної, так і трьохальтернативної систем оцінок рішень. Показано, що чіткого тренду динаміки зміни КФЕ від кількості реалізацій в навчальних матрицях не спостерігається, оскільки на практиці існує апіорно нечітке розбиття класів розпізнавання, яке обумовлює їх перетин в просторі ознак.

Удосконалено метод візуалізації багатовимірних даних на основі багатовимірної системи координат Федосєєва, який дозволяє оператору-технологу швидше та точніше реагувати на відхилення процесу від норми.

Таким чином, у рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології шляхом побудови гіперциліндроїдних вирішальних правил вдалося досягнути граничний максимум КФЕ (3), що свідчить про побудову безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил, і при цьому підвищити оперативність навчання у порівнянні з побудовою гіпереліпсоїдних вирішальних правил.

У **четвертому розділі** розроблено функціональну структуру СППР та архітектуру її програмного забезпечення для керування технологічним процесом вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву на установці типу «РОСТ». Функціональна схема здатної навчатися СППР у складі АСКТП вирощування великогабаритних скінтіляторів показана на рис. 8, де зображено інформаційні потоки, основні агреговані функціональні вузли та відповідні робочі змінні системи. При цьому на рис. 8 виділено окремо функціональні вузли, які задіяні при функціонуванні СППР в режимах навчання та екзамену, і введено такі позначення: ОПР – особа, що приймає рішення; БКОІ – блок кінцевої обробки інформації; БПОІ – блок первинної обробки інформації, призначений для перетворення інформації про функціональний стан технологічного процесу до вигляду, зручного для подальшого оброблення ЕОМ; БФВР – блок формування векторів розпізнавання, призначений для формування двійкових векторів-реалізації образів відносно відповідної СКД $\{\delta_{K,i}\}$; БРА – блок розвідувального аналізу, призначений для оцінки статистичної сталості та однорідності навчальної вибірки; БФНМ – блок формування навчальних матриць.

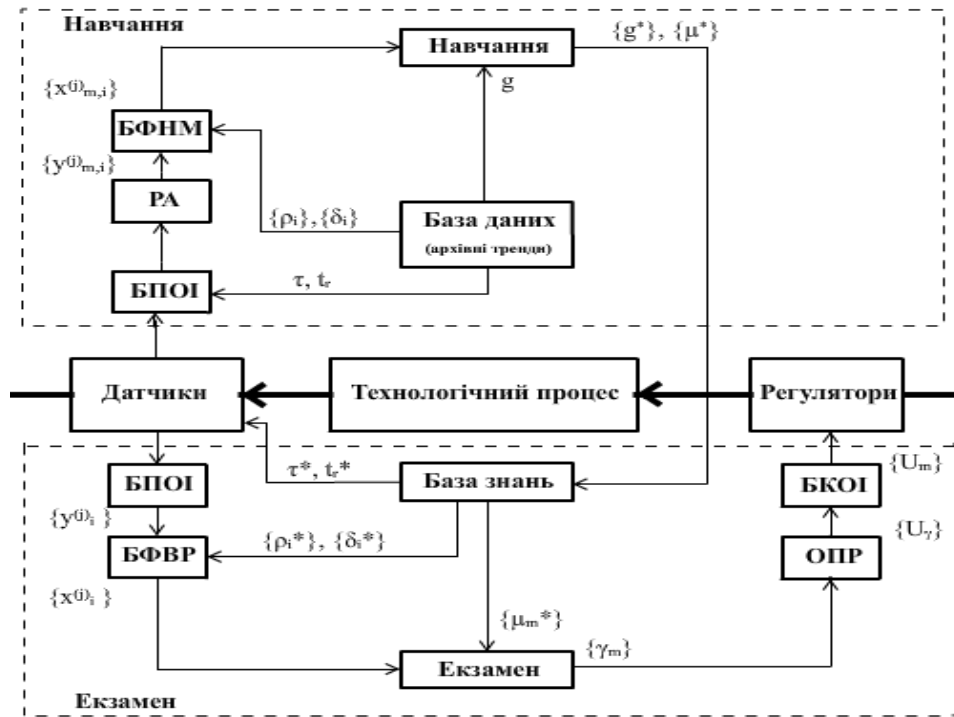


Рисунок 8 – Функціональна схема здатної навчатися СППР для вирощуванням сцинтиляційних монокристалів

На рис. 9 показано інтерфейс спеціального програмного забезпечення СППР, яка функціонує в режимі навчання.

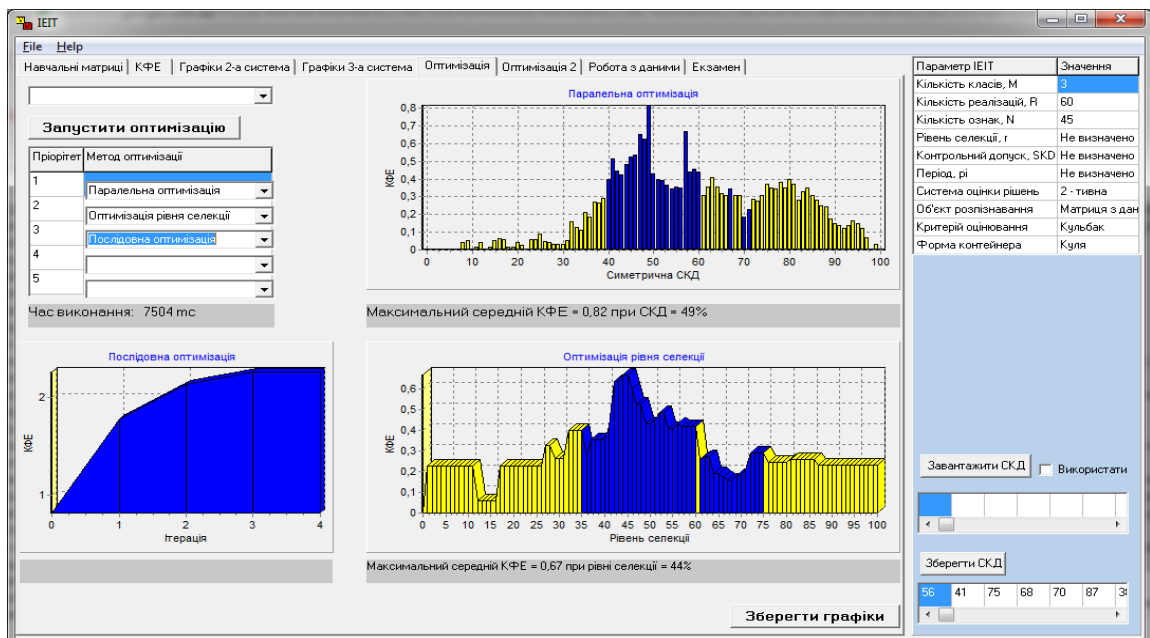


Рисунок 9 – Інтерфейс програмного забезпечення СППР в режимі навчання

На рис. 10 показано інтерфейс програми, яка реалізує алгоритм екзамену на стадії стабілізації діаметру монокристала.

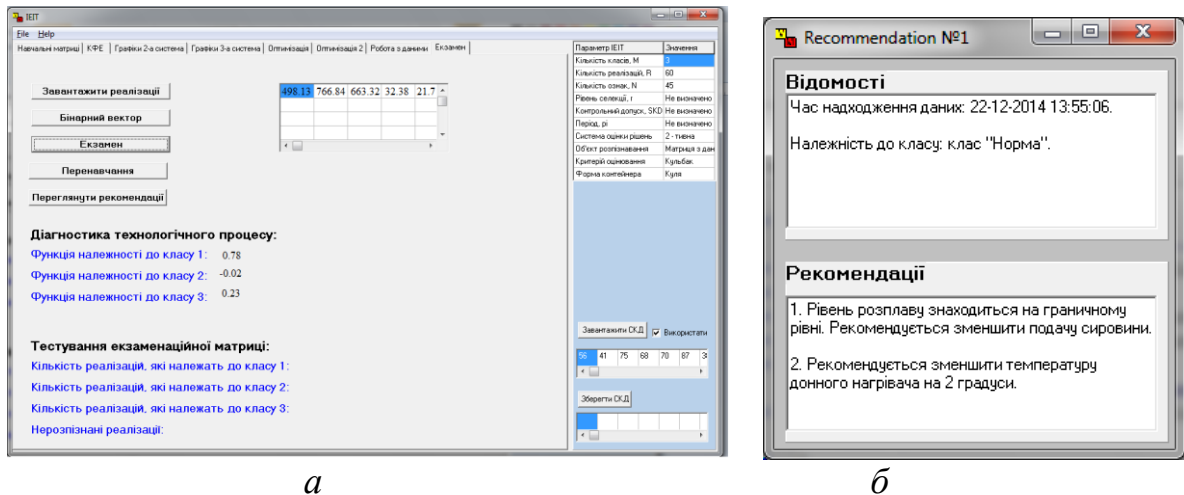


Рисунок 10 – Інтерфейс програмного забезпечення СППР в режимі екзамену: *а* – виведення результатів екзамену; *б* – форма рекомендації оператора

Оцінка якості вирощування монокристалу на стадії стабілізації його діаметру здійснювалася за наступною процедурою:

- 1) циліндрична частина готового монокристалу розбивається на 100 ділянок;
- 2) для кожної ділянки обчислювалося середньоквадратичне відхилення діаметру від норми за формулою

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^{100} \sqrt{(d_{n-}^i - d_e)^2 + (d_{n+}^i - d_e)^2}}{2 \times d_e} \times 100\% ,$$

де d_e – еталонний діаметр; d_{n-}^i – поточне значення діаметру для i -ї частини монокристалу справа відносно його осі; d_{n+}^i – поточне значення діаметру для i -ї частини монокристалу зліва відносно його осі.

На рис. 11 зображено діаграму зміни відносної похибки Δ для 20 монокристалів, вирощування яких було змодельоване за допомогою розробленого в Інституті сцинтиляційних монокристалів НАН України (м. Харків) інтерактивного тренажеру на базі створеної СППР.

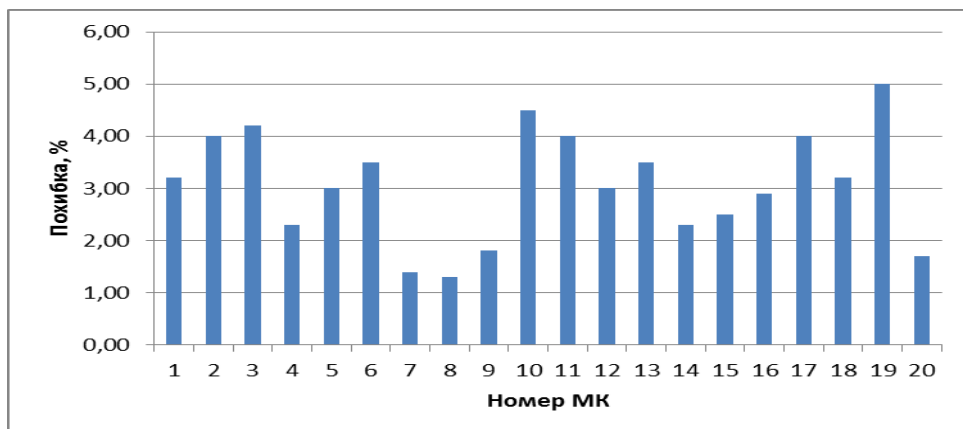


Рисунок 11 – Діаграма відхилень діаметрів монокристалів від норми

Аналіз рис. 11 показує, що в середньому відхилення діаметру від норми склало 3%, що покращує відомі показники (7-10%) для АСКТП без використання здатної навчатися СППР, тобто відносне відхилення від норми діаметру монокристалу зменшилося більше ніж в два рази.

Таким чином, здатна навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування великогабаритних сцинтиляційних монокристалів із розплаву дозволяє формувати в процесі навчання безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила, в реальному темпі часу оцінювати поточний функціональний стан технологічного процесу, рекомендувати оператору високостовірні керуючі рішення і здійснювати візуалізацію роботи програмного забезпечення.

В роботі для конфігурації контролерів і зв'язку з ПЗ «верхнього» рівня використовуються програмні продукти: HawkWin (розробки Amot Controls), VisiLogic (розробки Unitronics), PL7 / Unity Pro (розробки Schneider Electric), Simatic Step 7 (розробки Siemens), які задовольняють міжнародним стандартам MEK 1131-3 і DIN EN 6.1131-3 до інженерних мов програмування і включають в свій склад весь спектр інструментальних засобів для створення, налагодження та супроводження ПЗ програмно-логічних контролерів.

Для керування і та збору даних на другому рівні АСКТП використано програмне забезпечення SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) з вбудованим резервуванням, яке представлено перспективною SCADA-системою «Каскад» (фірми «Об'єднання-Південь», м Київ).

Таким чином, в четвертому розділі розроблено апаратно-програмний інструментарій проектування здатної навчатися СППР для керування вирощуванням великогабаритних сцинтиляційних монокристалів із розплаву на установці «РОСТ».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе науково-практичне завдання підвищення функціональної ефективності автоматизованої системи керування технологічним процесом вирощування великогабаритних лужно-галоїдних сцинтиляційних монокристалів із розплаву. Головні наукові та практичні результати роботи полягають у такому:

1 Проаналізовано сучасний стан розвитку інтелектуальних автоматизованих систем керування нестационарними технологічними процесами, що функціонують за умов апріорної невизначеності, і встановлено, що основною тенденцією їх подальшого розвитку є надання АСКТП властивості адаптивності шляхом машинного навчання і розпізнавання образів. При цьому обґрунтовано вибір методу досліджень у рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології, яка оснований на максимізації інформаційної спроможності системи керування, що навчається.

2 Розроблено новий інформаційно-екстремальний метод аналізу і синтезу здатної навчатися СППР на базі контейнерів циліндродної форми, який дозволяє надати системі керування властивість адаптивності при її функціонуванні за умов апріорної невизначеності та складних конфігурацій розподілу реалізацій образу в просторі ознак.

3 Розроблено комплекс категорійних моделей здатної навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування сцинтиляційних монокристалів із розплаву, на основі яких у процесі навчання побудовано безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила, які дозволяють побудувати чітке розбиття класів розпізнавання у тому числі і для нерадіальних конфігурацій нечітких розподілів вхідних реалізацій образів;

4 Удосконалено та досліджено метод оцінки функціональної ефективності навчання СППР на базі модифікованого інформаційного критерію Кульбака як функціонала від точнісних характеристик трьохальтернативної системи оцінок рішень, що дозволило збільшити кількість інформації про керований процес і цим підвищити достовірність керуючих рішень.

5 Удосконалено інформаційно-екстремальний метод машинного навчання з оптимізацією часових параметрів функціонування і досліджено вплив тривалості інтервалів спостереження керованого процесу та кроку дискретизації вхідних реалізацій образу на функціональну ефективність СППР для керування ТП вирощування сцинтиляційних монокристалів із розплаву на установці «РОСТ».

6 Удосконалено метод візуалізації багатовимірних даних, представлених в бінарному вигляді з урахуванням характеристик та особливостей об'єкту керування, який дозволяє зображувати поточний функціональний стан технологічного процесу у вигляді точки на площині зі спіралью розташованими осями координат.

7 Розроблено концептуальну модель проектування інтелектуальної СППР для керування вирощуванням монокристалів, побудованими на базі трьохальтернативної системи оцінок рішень, що приймаються. Запропонована модель дозволяє здійснювати інформаційний аналіз та синтез здатних навчатися СППР для керування нестаціонарними технологічними процесами.

8 Розроблено структуру і апаратно-програмний інструментарій проектування здатної навчатися СППР для керування технологічним процесом вирощування великогабаритних лужно-галоїдних сцинтиляційних монокристалів із розплаву. Програмне забезпечення функціонального модуля СППР реалізоване мовою C++ за об'єктно-орієнтованим принципом в середовищі розробника C++Builder 6 і має модульний тип організації, що забезпечує можливість реінжинірингу і верифікації.

9 За результатами фізичного моделювання доведено, що використання одержаних наукових результатів дозволяє побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила. При цьому оперативність алгоритму навчання СППР з оптимізацією гіперциліндроїдних контейнерів класів розпізнавання більш ніж в два рази перевершує оперативність побудови гіпереліпсоїдних вирішальних правил. Показано, що оптимізація періоду корекції підвищує функціональну ефективність навчання СППР на 6 % , а оптимізація інтервалу спостереження керованого процесу – на 10 % у порівнянні з параметрами існуючого технологічного режиму вирощування сцинтиляторів на установці «РОСТ».

10 Результати дисертації впроваджено у вигляді інформаційного і програмного забезпечення здатної навчатися СППР при розв'язанні завдань керування технологічним процесом вирощування великогабаритних лужно-галоїдних сцинтиляційних монокристалів із розплаву в Інституті сцинтиляційних

матеріалів в НТК «Інститут монокристалів» (м. Харків) і у навчальний процес Сумського державного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Довбиш А. С. Оцінка функціональної ефективності навчання автоматизованої системи керування технологічним процесом [Текст] / А. С. Довбиш, О. Б. Берест // Вісник СумДУ. Серія технічні науки. – 2012. – №2. – С. 39–47.
2. Берест О. Б. Порівняльний аналіз двох- і трьохальтернативної систем оцінок рішень в задачах машинного навчання [Текст] / О. Б. Берест, А. С. Довбиш // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: наук.-техн. журнал. – 2014.– №3(67).– С. 33-40.
3. Довбиш А. С. Трёхальтернативная обучающаяся система поддержки принятия решений для автоматизации технологического процесса [Текст] / А. С. Довбиш, О. Б. Берест // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика». – Томск: НТУ «ТГУ». – 2014. – № 4(29). – С. 31-40.
4. Кузьмін І. В. Інформаційно-екстремальна СППР з гіперциліндроїдними вирішальними правилами [Текст] / І. В. Кузьмін, О. Б. Берест // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №1(118). – С. 9-16.
5. Довбиш А. С. Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання керованого голосом маніпулятора [Текст] / А. С. Довбиш, О. Б. Берест, Р. С. Приходченко // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. – 2015. – №1(84). – С. 30–33.
6. Панич А. О. Оптимізація параметрів навчання інтелектуальної системи керування летючою пилою [Текст] / А. О. Панич, О. Б. Берест // научно-технический журнал «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики», Харьков. – випуск № 156. – 2011. – С. 34-41.
7. Довбиш А. С. Інформаційно-екстремальний алгоритм навчання системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів [Текст] / А. С. Довбиш, О. Б. Берест, Ю. С. Козьмін // Вісник «ХПІ». Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 30. – С.54-60.
8. Берест О. Б. Розпізнавання лауеграм при дефектоскопії монокристалів [Текст] / О. Б. Берест // Современные направления теоретических и прикладных исследований `2011: межд. научн.-практ. конф., 15-28 марта :тезы док. – Одесса, 2011. – С. 29-30.
9. Берест О. Б. Візуалізація багатовимірних реалізацій на площині при розпізнаванні образів [Текст] / О. Б. Берест // Інтелектуальні системи в промисловості і освіті: третя міжнар. наук.-практ. конф., 2-4 листоп.:тези доп. – Суми, 2011. – С. 16-17.
10. Берест О. Б. Дослідження функціональної ефективності системи прийняття рішень вирощування монокристалів із розплаву [Текст] / О. Б. Берест // Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні системи та технології» AIST-2012, 15-18 травня: тези доп. – Суми, 2012 – С. 188-189.

11. Берест О. Б. Методика побудови циліндроїдних вирішальних правил для СППР вирощування монокристалів [Текст] / О. Б. Берест // Сучасні інформаційні системи і технології: друга міжн. наук.-практ. конф., 21–24 травня: тези доп. – Суми, 2013. – С. 35-36.

12. Берест О. Б. Использование информационной меры Кульбака как критерия эффективности СППР технологического процесса выращивания монокристаллов [Текст] / О. Б. Берест // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: IV научн.-практ. конф., 16–18 июня: тезы док. – Владикавказ, 2013 – С. 67-69.

АНОТАЦІЯ

Берест О. Б. Методи класифікації функціонального стану технологічного процесу в автоматизованій системі керування вирощуванням монокристалів.– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2015.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню функціональної ефективності системи підтримки прийняття рішень (СППР) у складі АСКТП вирощування великогабаритних лужно-галоїдних скінтіляційних монокристалів із розплаву за умов апріорної невизначеності. Надання СППР властивості адаптивності досягається шляхом її машинного навчання у рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології аналізу даних, яка ґрунтується на максимізації інформаційної спроможності системи.

Розроблено новий інформаційно-екстремальний метод аналізу і синтезу здатної навчатися СППР на базі контейнерів циліндроїдної форми та запропонованого трьохальтернативного інформаційного критерію оптимізації параметрів функціонування, який дозволяє будувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила за умов складних конфігурацій розподілу реалізацій образу в просторі ознак. Удосконалено метод оптимізації часового інтервалу формування корегуючих дій та інтервалу спостереження нестационарного технологічного процесу, на якому параметри регуляторів залишаються незмінними. Крім того, удосконалено метод візуалізації багатовимірних даних, представлених в бінарному вигляді з урахуванням характеристик та особливостей об'єкту керування, який дозволяє зображувати поточний функціональний стан технологічного процесу у вигляді точки на площині зі спіральними розташованими осями координат.

Розроблено програмне забезпечення здатної навчатися СППР і розглянуто питання її фізичної реалізації у вигляді окремого модуля другого рівня АСКТП вирощуванням великогабаритних скінтіляційних монокристалів із розплаву на установці типу «РОСТ» та запропоновано метод візуалізації даних в процесі машинного навчання.

Ключові слова: класифікація, автоматизована система керування, система підтримки прийняття рішень, машинне навчання, оптимізація, інформаційний

критерій функціональної ефективності, технологічний процес, великогабаритний скінтіляційний монокристал.

АННОТАЦІЯ

Берест О. Б. Методи класифікації функціонального стану технологічного процесу в автоматизованій системі управління вирощуванням монокристалів. – Рукопись.

Дисертація на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2015.

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача повышения функциональной эффективности АСУТП выращивания крупногабаритных лужно-галоидных скінтіляційних монокристалів.

Проанализировано современное состояние развития АСУТП, функционирующих в условиях априорной неопределенности, и показано, что основной тенденцией наделяния их свойством адаптивности является использование идей и методов машинного обучения и распознавания образов.

Разработано новый информационно-экстремальный метод анализа и синтеза обучающейся СППР с гиперцилиндроидами контейнерами классов распознавания, позволяющий построить в процессе обучения безошибочные по обучающей матрице решающие правила для вытянутых в пространстве признаков распределений векторов-реализаций классов распознавания. При этом для оценки функциональной эффективности обучения СППР предложена модификация информационного критерия Кульбака, основанная на использовании трёхальтернативной системы оценок решений, что позволило повысить достоверность принимаемых решений в рабочем режиме функционирования системы по сравнению с двухальтернативной.

Усовершенствован информационно-экстремальный метод машинного обучения с оптимизацией временных параметров её функционирования и исследовано влияние длительности интервала наблюдения нестационарного управляемого процесса, на котором параметры регуляторов остаются постоянными, и интервала формирования управляющих воздействий на функциональную эффективность СППР для управления технологическим процессом выращивания скінтіляторів на установке типа «РОСТ».

Предложен комплекс категорийных моделей обучающейся СППР, на основе которых синтезированы информационно-экстремальные алгоритмы обучения СППР, позволившие осуществить дефазификацию априорно нечёткого разбиения пространства признаков на классы распознавания.

Усовершенствован метод визуализации многомерных данных в бинарном пространстве, позволяющий изображать текущее функциональное состояние управляемого технологического процесса в виде точки на плоскости со спирально размещёнными осями координат.

Разработано структуру и аппаратно-программный инструментальный проектирования обучающейся СППР для управления технологическим процессом выращивания великогабаритных щёлочно-галоидных скінтіляційних

монокристаллов с расплава. Программное обеспечение функционального модуля СППР реализовано на языке C++ по объектно-ориентированому принципу в среде разработчика C++Builder 6 и имеет модульный тип организации, обеспечивающий возможность реинжиниринга и верификации.

По результатам физического моделирования доказано, что предложенные методы информационного синтеза СППР позволяют строить безошибочные по обучающей матрице решающие правила. При этом оперативность обучения СППР с оптимизацией гиперцилиндроидных контейнеров классов распознавания более чем в два раза превосходит оперативность построения гиперэллипсоидных решающих правил при обеспечении практически одинаковой точности управляющих решений.

Ключевые слова: классификация, автоматизированная система управления, система поддержки принятия решений, машинное обучение, оптимизация, критерий функциональной эффективности, технологический процесс, крупно габаритный сцинтилляционный монокристалл.

ABSTRACT

Berest O. B. Methods of functional status classification in the automated process control system of crystal growth. – Manuscript.

Thesis for candidate degree in technical sciences on specialty 05.13.07 – the automation of control processes. – Kharkiv National University of Radio Electronics of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2015.

This thesis is devoted to the increasing of the functional efficiency of decision support system (DSS) of automatized control system of the growing large alkali halide scintillation single crystals from the melt under conditions of a priori uncertainty. Providing DSS with adaptability is reached by machine learning using extreme intellectual information technology of data analysis, which is based on maximizing the ability of information system.

A new information-extreme method of analysis and synthesis, which is based on cylindroid shapes of class recognition containers was developed. Also it is proposed to use three alternative information criterion of functionality optimization, which allows to generate unmistakable decision rules for conditions of complex configurations and distributions of realizations in feature space. Method of time interval formation of corrective action and observation interval optimization of unsteady process when regulators parameters remain unchanged was proposed. In addition, visualization method of multidimensional data presented in binary form is also improved. This allows to represent current functional status of the process as a point in the plane.

It was also developed necessary DSS software and it was considered physical implementation as a separate module to the second level of the automated control system of the growing large alkali halide scintillation single crystals from the melt. Method of data visualization under the machine learning is also was improved.

Keywords: classification, automatic control system, decision support system, machine learning, optimization, information criterion of functional efficiency, process, large scintillation crystals.

Підписано до друку 25.11.2015 р.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 1148.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб`єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007.