

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ШЕВЧЕНКО ІГОР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 004.896:658.562.3

МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
МОНІТОРИНГУ І ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИРОЩУВАННЯ
МОНОКРИСТАЛІВ НАПІВПРОВІДНИКІВ

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Левикін Віктор Макарович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, завідувач кафедри
інформаційних управляючих систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Федорович Олег Євгенович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М. Є. Жуковського «Харківський
авіаційний інститут»,
завідувач кафедри інформаційних
управляючих систем

доктор технічних наук, професор
Антощук Світлана Григорівна,
Одеський національний політехнічний
університет, завідувача кафедрою
інформаційних систем

доктор технічних наук, професор
Каргін Анатолій Олексійович,
Донецький національний університет,
м. Вінниця, завідувач кафедри
комп'ютерних технологій

Захист відбудеться "10" грудня 2015 р. о 14-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: пр. Леніна, 14, м. Харків, 61166.

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

Автореферат розісланий «5» листопада 2015 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

І.П.Плісс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток інтелектуальних технологій вилучення та обробки інформації досяг рівня, який дозволяє значно підвищити інформативність систем моніторингу та достовірність оцінки параметрів фізичних процесів, які відбуваються під час вирощування монокристалів напівпровідників. Процес вирощування монокристалів є представником класу складних виробничих процесів (СВП), які не є статистично стабільними, і, окрім того, у яких неможливо прямими методами вимірювати параметри, що безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту, собівартість якого є достатньо великою. Тому важливим питанням є створення інформаційних технологій супроводу для процесів виготовлення монокристалів, а також інших виробничих процесів, в яких використовуються складні фізичні явища та їх поєднання.

Проблема управління якістю в СВП пов'язана насамперед з недостатнім інформаційним забезпеченням основних етапів виробництва, таких як технологічна підготовка виробництва і складний процес виготовлення продукту. Розв'язання цієї проблеми можливо за допомогою спеціалізованих інформаційно-аналітичних систем управління якістю виробничих процесів. Необхідну інформацію можна отримати шляхом обробки оперативних і ретроспективних даних, використовуючи знання про вплив параметрів процесу на якість продукту.

Однак на цей час відсутній єдиний системний підхід до розробки інформаційних технологій моніторингу і діагностики СВП. Це можна пояснити такими причинами:

- принципова неможливість єдиного, формального опису різних видів виробничих процесів, їх станів і фізичних явищ через застосування різного математичного апарату;
- відсутність теоретичного обґрунтування складу інформаційних технологій, здатних забезпечити ефективне розв'язання задач моніторингу СВП.

Системний аналіз існуючих інформаційних технологій супроводу процесу виготовлення монокристалів дозволив сформулювати такі основні проблеми, що призводять до зниження якості кінцевого продукту:

- відсутні методи і засоби отримання необхідної інформації про поточний стан процесу вирощування, яка визначає якість кінцевого продукту. Це може призвести (і призводить) до прийняття помилкових або несвоєчасних рішень;
- відсутні єдина база даних і знань про всі етапи виробничого процесу, що обмежує можливості прийняття адекватних оперативних рішень для уникнення браку продукту. Знання експертів не використовуються для розпізнавання ситуації та корекції режиму процесу вирощування;
- умови отримання продукту істотно залежать від незначних змін в конструкції технологічного обладнання. Відсутні інформаційні засоби підтримки процесів оперативної оптимізації конструктивних параметрів технологічної оснастки на стадії технологічної підготовки виробництва.

З іншого боку, слід підкреслити, що з фізико-технологічних питань виробництва монокристалів є великий обсяг досліджень, результати яких необхідно використовувати при створенні інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування (ІАС УЯПВ). Великий внесок у розв'язання проблем отримання об'ємних монокристалів арсеніду галію і кремнію та створення теоретичних основ забезпечення

якості їх вирощування внесли наукові школи, засновані В.С. Лейбовичем, В.А. Татарченко, Г.А. Сатункіним, А.П. Оксаничем. Питанням розробки методів моделювання, контролю та управління присвячені роботи М.П. Бусленко, Ю.І. Неймарка, О.А. Павлова, Р.М. Юсупова, Б.В. Соколова, О.В. Смирнова.

Питанням застосування методів обчислювального інтелекту в задачах контролю технологічних процесів присвячені роботи Д.О. Поспелова, Л.А. Заде, Т. Такагі, М. Сугено, Р.А. Алієва, Є.В. Бодянського, О.І. Михалева, Л.С. Ямпольського. Однак в цих роботах немає у явному вигляді постановки та вирішення проблеми інформаційної підтримки та супроводу виробничого процесу з метою поліпшення якості продукту. Ця проблема постає саме для складних виробничих процесів.

Таким чином існує протиріччя складності (велика кількість параметрів, складна динаміка тощо) технологічних процесів та неможливості за допомогою існуючих моделей, методів і інформаційних технологій забезпечити необхідну якість продукції, що призводить до необхідності розробки засобів інформаційної підтримки управління якістю процесу, яка забезпечує якість кінцевого продукту.

Отже, створення наукових основ інформаційної підтримки процесу вирощування монокристалів і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки з метою підвищення якості продукції шляхом розробки та реалізації відповідних методів, моделей та інформаційних технологій є актуальною науково-прикладною проблемою.

Для розв'язання цієї проблеми необхідно проводити міждисциплінарні дослідження, що охоплюють, з одного боку, фізичні процеси і явища, на яких базується даний ТП, методи моделювання цих процесів, а з іншого боку – теоретичні та прикладні аспекти побудови інформаційних технологій для розв'язання функціональних задач аналізу, розпізнавання та підтримки прийняття оперативних рішень з корекції режиму процесу вирощування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася автором на кафедрі інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної НДР № 265 «Методи та моделі самоорганізації інфраструктури інтелектуального інформаційного середовища, що базується на використанні принципів хмарних обчислень» (№ ДР 0112U000207), а також спільно з Кременчуцьким національним університетом імені Михайла Остроградського (КрНУ), відповідно до цільової науково-практичної теми Міністерства промислової політики – «Дослідження впливу процесів тепломасопереносу на електрофізичні та структурні властивості монокристалічного кремнію і арсеніду галію в процесі їх вирощування» (№ ДР 0106U000056).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми створення теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу вирощування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки для забезпечення підвищення якості продукції.

Основні завдання дисертаційної роботи, які визначені поставленою метою:

- провести аналіз проблем управління якістю та моніторингу складних виробничих процесів і, зокрема, процесу вирощування монокристалів напівпровідників;
- розробити модель інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу

виращування монокристалів і метод побудови інформаційної технології моніторингу і діагностики складного виробничого процесу;

- розробити методи, моделі й інформаційну технологію моніторингу температурних полів у процесі виращування монокристалів;
- розробити методи, моделі й інформаційну технологію підтримки задачі оптимізації теплових умов охолодження злитків в ростовій установці на стадії технологічної підготовки виробництва;
- розробити методи, моделі й інформаційну технологію підтримки прийняття оперативних рішень в ході процесу виращування монокристалів, а також інтегровану інформаційну технологію управління якістю процесу виращування монокристалів;
- розробити комплекс програмних засобів для реалізації інформаційної технології управління якістю процесу виращування монокристалів у вигляді підсистем ІАС УЯПВ.
- впровадити результати досліджень в процес управління якістю виробництва монокристалів напівпровідників.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційної підтримки виробництва монокристалів напівпровідників.

Предмет дослідження – моделі, методи та інформаційні технології, що забезпечують моніторинг та оптимізацію процесу виращування монокристалів напівпровідників.

Методи досліджень. Дисертаційне дослідження базується на системному аналізі результатів сучасних теоретичних і прикладних розробок вітчизняних і зарубіжних учених у галузі інформаційних технологій обробки вимірювальної інформації та технологічних процесів виробництва монокристалів. Для розв'язання поставлених завдань використані методи системного аналізу і загальної теорії систем – при побудові моделі ІАС УЯПВ; методи статистичного аналізу – при виборі моделей діагностики процесу виращування; методи теорії нейронних мереж – при розробці моделей непрямих вимірювань параметрів температурних полів; методи адаптивного випадкового пошуку та еволюційних алгоритмів – при оптимізації геометричних параметрів теплових вузлів і моделей розпізнавання; методи теорії нечітких множин, теорії прийняття рішень і методи кластерного аналізу – при розробці моделей розпізнавання ситуацій; теоретико-множинний підхід – при розробці архітектури інформаційних систем.

Наукова новизна отриманих результатів. Основний науковий результат дисертації полягає у створенні теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу виращування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки для забезпечення підвищення якості продукції.

У рамках виконаних досліджень отримано такі наукові результати:

1. Уперше запропоновано:

1.1. Теоретико-множинну модель інформаційно-аналітичної системи керування якістю процесу виращування монокристалів, яка, на відміну від відомих, містить у своєму складі модель якості продукту, модель якості виробничого процесу, функціональну підсистему оптимізації параметрів оснастки на стадії технологічної підготовки виробництва, функціональну підсистему моніторингу процесу виращування, функціональну підсистему підтримки прийняття оперативних рішень щодо корекції режиму виращування, відображення множини параметрів якості процесу на множини параметрів якості про-

дукту і відображення впливу множини рішень функціональних задач на якість виробничого процесу, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до підвищення якості виробничого процесу та кінцевого продукту.

1.2. Метод настроювання параметрів нечіткого клітинного автомата, що моделює процес вирощування монокристалу, який оснований на пошуку оптимальних значень вагових коефіцієнтів у зваженій t-конормі Лукасевича, що дозволяє адекватно відобразити динаміку складного процесу вирощування монокристалів і реалізувати необхідну обробку даних для моніторингу цього процесу.

2. Удосконалено:

2.1. Метод побудови прикладної інформаційної технології підтримки прийняття рішень з діагностики та корекції складного виробничого процесу, шляхом формування комплексу моделей моніторингу, заснованих на розкритті фізичного уявлення процесу, що дозволяє здійснити контроль важливих параметрів, які недоступні для прямих вимірювань і тим самим підвищити ефективність керування якістю кінцевого продукту.

2.2. Метод розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва, шляхом створення моделі оптимізації зі складним критерієм і використання еволюційної процедури оптимізаційних розрахунків, що дозволяє здійснити інформаційну підтримку процесу технологічної підготовки виробництва і підвищити якість кінцевого продукту.

2.3. Нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля розплаву, яка, на відміну від відомих, ураховує конвективні теплові потоки, швидкість витягування, стадію процесу витягування, що дозволяє підвищити точність результатів непрямих вимірювань параметрів температурного поля і є підґрунтям інформаційної технології отримання ключових даних для оцінки якості монокристалів напівпровідників що виготовляються.

2.4. Метод моделювання процесу кристалізації шляхом застосування нечіткого клітинного автомату на етапі відтворення форми монокристалу, що дозволяє спростити обчислювальний процес моделювання порівняно з відомими методами, отримувати уточнені значення коефіцієнта теплопровідності в проблемній зоні фронту кристалізації для використання в інформаційній технології моніторингу процесу вирощування монокристалів.

3. Набули подальшого розвитку:

3.1. Модель підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень для корекції процесу вирощування монокристалів шляхом уведення бази математичних моделей для непрямого моніторингу та аналізу температурних полів розплаву та злитка, а також інтерфейсів для зв'язку із АСУТП вирощування монокристалів і з підсистемою техніко-економічного планування АСУ підприємства, що дозволяє приймати оперативні рішення в ході процесу вирощування з урахуванням як фізичних, так і економічних показників.

3.2. Нечітка модель розпізнавання ситуацій у процесі вирощування монокристалів, шляхом оцінки ступеню критичності ситуації, і в якій для настроювання використовуються індивідуальні коефіцієнти значущості елементарних посилок кожного правила, що дозволяє спростити процес навчання та донавчання моделі при появі нових проблемних ситуацій.

3.3. Модель пошуку рішень для оператора у вигляді рекомендацій, шляхом введення нечіткого представлення ситуацій, яке враховує тренди параметрів процесу вирощування, що дозволяє гнучко реагувати на виникнення проблемних ситуацій та приймати адекватні рішення щодо корекції процесу вирощування монокристалів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені методи, моделі та інформаційні технології покладено в основу розробленої в Харківському національному університеті радіоелектроніки інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування монокристалів напівпровідників, до складу якої у вигляді функціональних підсистем увійшли: підсистема «Моніторинг», що реалізує візуалізацію температурних полів розплаву і злитка в процесі вирощування та інформаційну підтримку дій оператора ростової установки; підсистема «Порадник», що реалізує діагностику несприятливих ситуацій у процесі вирощування монокристалів і підтримку прийняття оперативних рішень щодо корекції режиму вирощування; підсистема «Екран», що реалізує підтримку розв'язання задачі оптимізації розмірів і положення теплового екрана ростової установки в процесі технічної підготовки виробництва арсеніду галію.

Упровадження цих підсистем на ПП «Галар» (м. Світловодськ) дозволило отримати річний економічний ефект 85,4 тис. грн. (акт впровадження від 10.12.2013).

Джерела економічної ефективності впроваджених розробок:

- зменшення витрат електроенергії, матеріальних ресурсів, трудовитрат і втрат прибутку на одиницю готової продукції за рахунок зниження кількості нештатних ситуацій і відповідного зниження частки бракованої продукції у виробництві злитків арсеніду галію завдяки використанню підсистем «Моніторинг», «Порадник» і «Екран».
- зменшення витрат на технічну підготовку виробництва злитків арсеніду галію за рахунок виключення експериментальних робіт на ростових установках при підборі розмірів і положення теплового екрана завдяки використанню підсистеми «Екран».

Моделі та алгоритми моніторингу теплових режимів печей нормалізації реалізовані в програмному модулі, який упроваджено на Кременчуцькому сталеливарному заводі (ПАТ КСЗ), що дозволило стабілізувати якість залізничного лиття (акт впровадження від 01.08.2014).

Наукові та науково-методичні розробки дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі, а саме лекціях і лабораторних роботах з дисциплін «Інтелектуальні технології в інформаційних системах» і «Мультиагентні системи та технології підтримки прийняття рішень» (акт впровадження від 03.04.2014).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати отримані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1] – концептуальні основи інформаційно-аналітичної системи керування якістю процесу вирощування монокристалів, нейромережева модель для непрямого моніторингу температурного поля розплаву, метод моделювання процесу кристалізації за допомогою нечіткого клітинного автомата, метод і модель оптимізації геометричних параметрів теплових екранів; [4] – теоретико-множинна модель інформаційно-аналітичної системи керування якістю процесу вирощування монокристалів; [5] – модель системи підтримки прийняття оперативних рішень та модель прийняття рішень; [6] – метод побудови інформаційної технології діагностики стану складного виробничого процесу; [7] – математична

модель інформаційної технології; [8] – нейромережева модель розрахунку температурного поля розплаву; [9] – структура нейромережевої моделі розрахунку температурного поля злитка; [10] – метод моделювання процесу кристалізації та метод навчання нечіткого автомата; [11] – структура регресійної моделі для розрахунку температури фонового нагрівача; [12] – інформаційна технологія моніторингу температурних полів; [13] – математична модель, яка зв'язує геометричні параметри теплового вузла та теплові потоки випромінювання; [14] – чисельно-аналітична модель розв'язання задачі теплообміну; [15] – структура багаторівневих оцінок якості виробничих процесів; [16] – метод кластеризації, який дозволяє отримати кластери довільної форми; [17] – метод кластеризації, оснований на паралельному генетичному алгоритмі; [18] – ієрархічна база знань системи діагностики та нечітка модель розпізнавання ситуацій; [19] – прототипи програмних модулів для розрахунку температурних полів; [20] – модель взаємодії інтелектуального агента і середовища; [21] – метод синтезу структури нейронної мережі для розв'язання задач діагностики, оснований на використанні апріорної експертної інформації та неітеративному отриманні значень вагових коефіцієнтів у шарі попередньої обробки даних; [22] – метод вилучення знань з нейронної мережі за допомогою нечіткого інтерпретатора та процедури верифікації правил; [23] – структура бази нечітких знань, яка забезпечує можливість одночасної настройки бази правил і параметрів функцій належності нечітких множин, що скорочує час навчання; [24] – нейромережева модель для прогнозування; [25] – сформовано комплекс методів аналізу зображень дислокацій; [26] – математична модель та метод оптимізації конфігурації теплового екрана ростової установки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на таких конференціях і форумах: III Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні системи та технології» ІСТ-2014, (15–21 вересня 2014 р., Харків); Всеукраїнській науково-практичній конференції «ІТ-Перспектива» (4–5 квітня 2014 р., Кременчук); III Міжнародній науково-практичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (20–23 травня 2014 р., Кременчук); X Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання та організаційно-правові основи міжнародного співробітництва у сфері високих технологій» (25 червня 2014 р., Київ); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток наукових досліджень 2013» (25–27 листопада 2013 р., Полтава); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (8–10 листопада 2013 р., Кременчук); II Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні системи та технології» ІСТ-2013, (16–22 вересня 2013 р., Харків); II Міжнародній науково-практичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (22–24 травня 2013 р., Кременчук); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (13–16 березня 2013 р. Запоріжжя); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (2–4 листопада 2012 р., Кременчук); «Інформаційні системи і технології» – Міжнародна науково-технічна конференція, присвяченій 75-річчю В. В. Свиридова – ІСТ-2012 (22–29 вересня 2012 р., Харків); III Міжнародній науково-

практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» (14–16 березня 2012 р., Запоріжжя); V Українській науковій конференції з фізики напівпровідників (9–15 жовтня 2011 р., Ужгород); X Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (4–6 листопада 2011 р., Кременчук); I Міжнародній науково-практичній конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотovoltaїка» (5–7 травня 2011 р., Кременчук); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (19–21 травня 2010 р., Кременчук); III Міжнародній науковій конференції «Функціональна компонентна база мікро-, опто- і наноелектроніки» (28 вересня – 2 жовтня 2010 р., Харків – Кацевелі); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Інформаційні технології в економічних та технічних системах» ІТЕТС-2009 (15–16 квітня 2010 р., Кременчук); I Міжнародній конференції «Електронна компонентна база. Стан та перспективи розвитку» в рамках 3-го Міжнародного радіоелектронного форуму «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» МРФ-2008 (30 вересня – 3 жовтня 2008 р., Харків).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 49 наукових праць, у тому числі: 1 монографія, 25 статей у фахових виданнях України з технічних наук, (12 статей опубліковані у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз) і 23 публікації – у матеріалах наукових конференцій і форумів.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. повний обсяг роботи складає 325 сторінок, що містять 44 таблиці, 65 рисунків (з них 14 таблиць та 15 рисунків на 29 окремих сторінках), 236 найменувань списку використаних джерел на 25 сторінках і два додатки на 19 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими темами, представлено відомості про апробацію результатів і публікацію матеріалів дисертації.

У першому розділі виконано аналіз проблем розробки інформаційно-аналітичних систем моніторингу та оптимізації складних виробничих процесів і, зокрема, процесу вирощування монокристалів. Складні виробничі процеси мають певну загальну специфіку, а саме:

1. Проблема нестабільності. Під час технологічного процесу змінюється вплив параметрів на його перебіг. Наприклад, у міру росту монокристала кардинально змінюються теплові поля всередині установки, конвекційні потоки всередині розплаву і т. ін.

2. Відсутність масштабної інваріантності. Умови отримання продукту істотно залежать від незначних змін у конструкції обладнання.

3. Управління СВП багато в чому спирається на особистий досвід операторів і часто здійснюється ними на інтуїтивному рівні. Як правило, з втратою досвідчених працівників на технологічній лінії різко знижується якість і зростає відносна кількість бракованої продукції.

У цій ситуації проблема підвищення ефективності управління якістю монокристалічних злитків може бути трансформована у проблему створення та впровадження інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування, основною функцією якої є інформаційна підтримка основних етапів виробництва монокристалів.

На підставі аналізу стану науково-методичного апарату розробки інформаційно-аналітичних систем моніторингу та корекції СВП і, зокрема, процесу вирощування монокристалів напівпровідників, аналізу існуючих методів і моделей підтримки прийняття рішень сформульована науково-прикладна проблема створення теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу вирощування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки і група задач, розв'язання яких усуває цю проблему.

У другому розділі розроблено концептуальні засади побудови інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування. Загальна схема взаємодії підсистем ІАС УЯПВ з виробничим процесом і кінцевими користувачами показана на рис. 1.

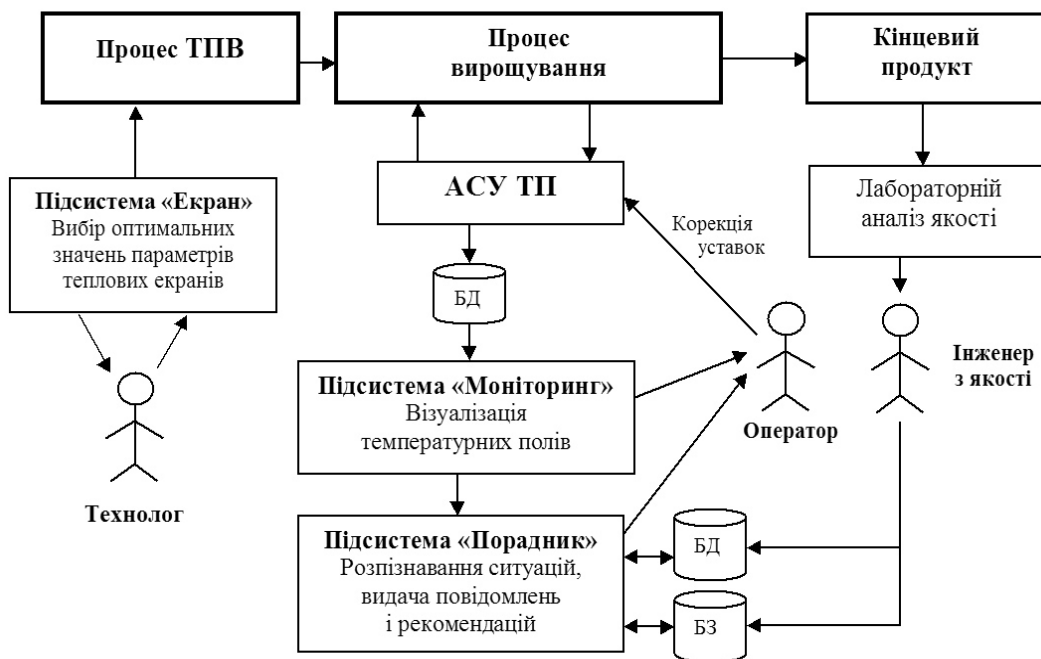


Рисунок 1 – Загальна схема взаємодії підсистем ІАС з виробничим процесом і кінцевими користувачами

На стадії технологічної підготовки виробництва підсистема «Екран» забезпечує підтримку процесу оптимізації умов охолодження злитка в ростовій камері шляхом розрахунку оптимальних розмірів і положення теплового екрана, що оточує вирощену частину злитка.

У процесі вирощування підсистема «Моніторинг» здійснює інформаційну підтримку процесу моніторингу параметрів температурних полів у розплаві та злитку шляхом візуалізації температурних полів для оператора, який отримує додаткову інформацію про стан процесу. Підсистема «Порадник» (СППР) забезпечує розпізнавання ситуацій і підтримку прийняття оперативних рішень щодо корекції теплового режиму вирощування, мінімізуючи ймовірність виникнення нештатних ситуацій і появи браку. За результатами лабораторного аналізу якості продукту поповнюється база даних і база знань ІАС.

Формалізуємо задачу управління якістю СВП. Структуру задачі пояснює рис. 2, на якому: М – виробничий процес; CS – система управління технологічним процесом

(АСУ ТП); QPMS – інформаційна система управління якістю виробничого процесу.

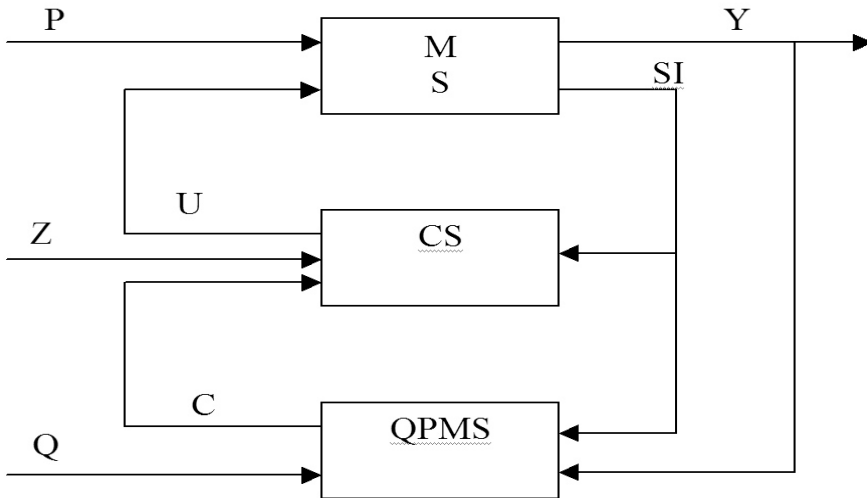


Рисунок 2 – Структура задачі управління якістю складного виробничого процесу

Введені такі позначення:
 $T = \{t_l, l = \overline{1, L}\}$ – множина дискретних моментів часу виробничого процесу;

$$U = \{u_i(t) | u_i(t) \in D^{U_i}, i = \overline{1, I}\},$$

$t \in T$ – множина керуючих впливів на виробничий процес; $D^U = \{D^{U_i}, i = \overline{1, I}\}$, – області допустимих значень керуючих впливів;

$P = \{p_j(t) | p_j(t) \in D^{P_j}, j = \overline{1, J}\}, t \in T$ – множина параметрів, що збурюють (некерованих входів); $D^P = \{D^{P_j}, j = \overline{1, J}\}$ – області допустимих значень

збурень; $S = \{S_t: S_t = f(S_{t-1}, U, P), U \in D^U, P \in D^P, t \in T\}$ – множина станів виробничого процесу; $SI = \{SI_t: SI_t = \varphi(S_t), t \in T\}$ – множина параметрів, що характеризують стан виробничого процесу; $Y = \{y_m(t), m = \overline{1, M}\}, t \in T, y_m(t) = \eta_m(t, S_t), t \in T, m = \overline{1, M}$ – множина результуючих цільових виходів виробничого процесу; $Z = \{z_n(t), n = \overline{1, N}\}, t \in T$ – множина параметрів, що задаються для визначення номінального режиму протікання виробничого процесу; $C = \{c_k(t) | c_k(t) \in D^{C_k}, k = \overline{1, K}\}, t \in T$ – множина коригувальних впливів на систему управління технологічним процесом з метою покращення якості процесу; $D^C = \{D^{C_k}, k = \overline{1, K}\}$, область допустимих значень коригувальних впливів; $Q = \{q_g, g = \overline{1, G}\}$ – множина цілей управління якістю виробничого процесу, що залежать від бізнес-правил підприємства і характеру продукції.

Взаємодію системи управління технологічним процесом і системи управління якістю виробничого процесу можна зобразити рядом відображень:

$\eta: S \times U \times P \rightarrow Y$ – відображення множини станів технологічного процесу, множини керуючих впливів U , множини збурень P у множину виходів процесу Y ;

$\mu: P \times U \times T \rightarrow S$ – відображення множини збурень P , множини керуючих впливів U , множини інтервалів часу T у множину станів S ;

$\psi: Z \times SI \times C \rightarrow U$ – відображення множини параметрів що задаються Z , множини параметрів стану виробничого процесу SI і множини коригувальних впливів C у множину керуючих впливів U ;

$\varphi: Q \times Y \times SI \rightarrow C$ – відображення множини цілей управління якістю Q , множини цільових параметрів виробничого процесу Y і множини параметрів стану процесу SI в множину коригувальних впливів C на систему управління процесом, які здійснює система управління якістю виробничого процесу QPMS.

У процесі вирощування монокристалів можуть виникати незворотні нештатні ситуації, що призводять до зниження якості монокристалів і випуску бракованої продукції. Нештатним ситуаціям передують так звані критичні ситуації. Розпізнавання та усунення критичних ситуацій запобігає виникненню нештатних ситуацій. Уважаючи,

що на якість виробничого процесу впливає ймовірність P_E пропуску критичних і нештатних ситуацій, що ведуть до виникнення браку продукції, запишемо критерій оптимальності управління якістю виробничого процесу у вигляді:

$$P_E = \sum_{k=1}^K P_k [1 - P_{kd}(s(t))P_{ke}(u(t), c(t))] \rightarrow \min, \quad (1)$$

де P_k – ймовірність виникнення k -ї критичної ситуації; P_{kd} – ймовірність своєчасного виявлення даної ситуації; P_{ke} – ймовірність своєчасного усунення даної ситуації.

До системи обмежень цієї задачі входять: а) обмеження на параметри стану і керування: $s(t) \in D^S$, $t \in T$; $u_i(t) \in D^{U_i}$, $i = \overline{1, I}$, $t \in T$; $c_k(t) \in D^{C_k}$, $k = \overline{1, K}$, $t \in T$; б) обмеження часу реакції на виникнення критичних ситуацій: $T_D + T_R \leq T_{ID}$, де T_D – час виявлення критичної ситуації, T_R час реакції, T_{ID} – час незворотного погіршення ситуації; в) співвідношення між показниками якості продукції, параметрами технологічного процесу, керуючими і коригуючими впливами: $Q(t) = F(t, u(t), s(t), y(t), c(t))$, $t \in T$; для процесу вирощування монокристалів ці обмеження формуються у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описують процеси тепломасопереносу, рівнянь задачі Стефана, що описують процес кристалізації, диференціальних рівнянь, що замикають контури управління і стабілізації АСУ ТП, а також продукції бази знань з розпізнавання ситуацій і корекції теплових режимів.

Для забезпечення синтезу всіх необхідних функціональних компонентів уперше запропоновано теоретико-множинну модель інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування монокристалів. У загальному вигляді модель ІАС УЯПВ можна представити як кортеж: $M_{IAC} = \langle F, OK_{IAC}, R \rangle$, де F – функціональні підсистеми ІАС, OK_{IAC} – комплекси що забезпечують; R – відношення, що зв'язують елементи ІАС в єдину структуру. Щодо розглянутої проблеми створення ІАС УЯПВ детально зміст моделі:

$$M_{IAC} = \langle F(SM, SAD, SO), IK, MQ_P, MQ_M, MM, AK, PK, TK, OpK, R_1, R_2, R_3 \rangle, \quad (2)$$

де SM – підсистема моніторингу температурних параметрів процесу вирощування в реальному часі; SAD – підсистема підтримки прийняття оперативних рішень щодо зміни режиму процесу вирощування; SO – підсистема оптимізації теплових умов охолодження злитка в ростовій установці; IK – інформаційний комплекс – бази даних значущих технологічних параметрів і база знань про ситуації, що виникають у процесі вирощування; $MQ_P = \langle Q_P, LQ_P \rangle$ – модель якості продукту, де Q_P – множина показників якості за технічними умовами на продукт; LQ_P – множина допустимих значень показників якості; $MQ_M = \langle Q_M, LQ_M \rangle$ – модель якості процесу, де Q_M – множина значущих показників процесу; LQ_M – множина допустимих значень показників процесу; MM – комплекс математичних моделей, які застосовуються для розв'язання задач управління якістю процесу вирощування; AK – комплекс алгоритмів розв'язання задач моніторингу і коригування процесу вирощування, згідно з локальними критеріями якості різних аспектів виробничого процесу і глобальним критерієм якості, а також прогнозу якості монокристала; PK – комплекс інструментальних програмних засобів, що реалізують функціональні задачі ІАС УЯПВ; TK – комплекс засобів вимірювання та контролю інформативно-значущих параметрів процесу вирощування; OpK – організаційний комплекс, тобто організаційні принципи та документи, що регламентують контроль виробничого процесу і рівень якості продукції. $R1 \subseteq Q_M \times Q_P$ – відображення

множини параметрів якості процесу на множини параметрів якості продукту; $R2 \subseteq MM \times F$ – розподіл моделей за підсистемами; $R3 \subseteq F \times Q_M$ – відношення впливу функціональних підсистем на якість виробничого процесу. Для кожної підсистеми ІАС УЯПВ визначені комплекси функціональних задач.

Зокрема визначено концепцію моніторингу температурних полів у процесі вирощування монокристалів. Підсистема моніторингу повинна забезпечувати виконання функцій непрямого вимірювання параметрів температурного поля в підкристальній області та в злитку і виведення результатів вимірювань та обчислень на монітор у табличному вигляді, а також інформаційну підтримку функціонування підсистеми «Порадник» з метою корекції режиму процесу вирощування та усунення критичних ситуацій.

З урахуванням цих вимог набула подальшого розвитку модель підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень для корекції процесу вирощування монокристалів, яка має такий вигляд:

$$SAD = \langle MS, KB, MB, DB, SS, RR, SM, AB, ISP, IS, DU \rangle, \quad (3)$$

де MS – модель пошуку рішень; KB – база знань; MB – база моделей для розв’язання функціональних задач моніторингу та аналізу температурних полів розплаву та злитка; DB – база даних; SM – програмний монітор; SS – множина ознак ситуації; $RR \subseteq Q_M \times SS$ – відображення множини показників, що характеризують стан процесу, на множини ознак ситуації; AB – база алгоритмів; ISP – інтерфейс з АСУ ТП; IS – інтерфейс з підсистемою ТЕП АСУ підприємства; DU – блок діалогу з ОПР.

Набула подальшого розвитку модель пошуку рішень (генерації рекомендацій) для оператора, яка призначена для розв’язання задачі корекції ходу процесу вирощування. Модель формально визначимо набором:

$$MS = \langle FR, A_S, S, P, A_P, F_m \rangle, \quad (4)$$

де FR – представлення проблемної ситуації і тенденцій зміни ознак ситуацій мовою висловлювань нечіткої логіки; A_S – множина алгоритмів вибору продукцій та їх інтерпретації при виборі рішення; S – множина зумовлених рішень щодо корекції процесу вирощування; P – множина продукцій; A_P – алгоритм поповнення множини P у процесі функціонування СППР; F_m – правила модифікації моделі DM (розширення алфавіту, модифікації множини P).

Модель бази знань KB має такий вигляд:

$$KB = \langle WNM, RT, AT \rangle, \quad (5)$$

де WNM – вагові коефіцієнти нейронної мережі системи моніторингу, що необхідні для розрахунку температур у розплаві; RT – таблиця правил для інтерпретації даних системи моніторингу та визначення ризику порушення оптимальних умов вирощування з точки зору вибраних критеріїв; AT – таблиця правил видачі рекомендацій.

База моделей MB містить: набір моделей для розв’язання функціональних завдань моніторингу та аналізу температурних полів розплаву і злитка, визначення температури фонових нагрівачів і моделювання процесу кристалізації, моделі перетворення значень первинних параметрів процесу на значення ознак, моделі розпізнавання ситуації та визначення ступеня критичності ситуації.

База даних DB містить: вихідні дані для теплових розрахунків; масиви значень температури в заданих точках розплаву і злитка; масиви осьових і радіальних градієнтів температури в підкристальній області та в злитку; історія рекомендацій для майстра-технолога, виданих протягом процесу.

Системний монітор SM – основний програмний модуль підсистеми SAD , який здійснює координацію процесів аналізу ситуації і генерації рекомендацій.

База алгоритмів представлена набором:

$$AB = \langle AK, AГП, AO, AD, AГВП, AФИ, ABC \rangle, \quad (6)$$

де AK – алгоритми кластеризації простору ознак ситуацій; $AГП$ – алгоритми генерації прикладів; AO – алгоритми навчання нейронних мереж; AD – алгоритми діагностики стану процесу вирощування; $AГВП$ – алгоритми модифікації правил для формування повідомлень і рекомендацій; $AФИ$ – алгоритми формування історії моніторингу температурних полів та історії генерації рекомендацій; ABP – алгоритми формування рекомендацій оператору.

Інтерфейс з АСУ ТП – ISP описується моделлю:

$$ISP = \langle XM, XS \rangle, \quad (7)$$

де XM – множина входів підсистеми, що відображають дані моніторингу температурних полів у процесі вирощування; XS – множина входів підсистеми, що відображають дані, одержувані від існуючої АСУ ТП. Множина XM визначається набором:

$$XM = \{T_L, T_S, FF, GR, GZ\}, \quad (8)$$

де T_L – масив розподілу температур у розплаві; T_S – масив розподілу температур в кристалі; FF – напрям прогину фронту кристалізації; GR – масив температурних градієнтів по радіусу злитка; GZ – масив температурних градієнтів по осі злитка. Множина входів XS визначається вектором:

$$XS = \{T_{OH}, T_{ФН}, V_{Ш}, m_C, L_M, DD_C, L_C\}, \quad (9)$$

де T_{OH} – температура основного нагрівача; $T_{ФН}$ – температура фонового нагрівача; $V_{Ш}$ – швидкість переміщення штока тигля; m_C – поточна маса злитка; L_M – рівень розплаву у тиглі; DD_C – поточне відхилення діаметра злитка; L_C – поточна довжина злитка.

Інтерфейс з підсистемою ТЕП АСУ підприємства – IS описується набором:

$$IS = \langle XE, MR \rangle, \quad (10)$$

де XE – множина входів підсистеми, що відображають техніко-економічні показники процесу вирощування; MR – множина запитів СППР, на отримання поточних значень економічних показників.

Блок діалогу с ОПР – DU – можна подати у вигляді:

$$DU = \langle L(RD, SR(D_S, D_P)), MS, A, P_A \rangle, \quad (11)$$

де L – мова діалогу; RD – правила формування повідомлень; SR – множина стандартних повідомлень; D_S – множина висновків, що визначають поточний стан процесу вирощування; D_P – множина рекомендацій щодо корекції температурного режиму вирощування; MS – стандартне повідомлення, що має вигляд:

$$MS = \langle TM, T, R, PM,) \rangle, \quad (12)$$

де TM – час повідомлення, співвіднесений до часу процесу вирощування; T – ключова тема повідомлення; R – посилання на попереднє повідомлення PM ; A – відповідь користувача; P_A – процедура видачі порад.

Як методичну основу синтезу ІАС удосконалено метод побудови прикладної інформаційної технології підтримки прийняття рішень з діагностики та корекції стану складного виробничого процесу. Метод включає такі етапи:

Етап 1. Формування моделі складу ІТ.

Розробляючи інформаційну технологію, необхідно визначити її статичну частину – структуру даних (DS) і комплекс математичних методів і моделей (CMM), а також опи-

сати динамічну складову інформаційної технології – інформаційні процеси (*IP*) та їх взаємодію між собою (*IPI*). Виходячи із цього, інформаційна технологія повинна зображуватися набором:

$$IT = \langle DS, CMM, IP, IPI \rangle. \quad (13)$$

Кожен інформаційний процес подається блоком, що має інформаційні входи, керуючі входи, виходи і використовувані ресурси. Як ресурси виступають методи, моделі та дані/знання, які залучаються в міру необхідності для реалізації процесу.

Етап 2. Формування складу та структури системи діагностики (СППР). Склад системи діагностики представлено виразом (3) та відповідними поясненнями. Структура системи визначається блок-схемою, яку наведено в дисертації.

Етап 3. Формування складу бази даних і бази знань. Структуру даних *DS* визначає інформаційний комплекс – база даних значущих технологічних параметрів і база знань з розпізнавання ситуацій, що виникають в ході технологічного процесу. База даних повинна містити дані наступних таких: вихідні дані за фізичними параметрами об'єкта моніторингу; первинні дані, отримані від фізичних датчиків у ході технологічного процесу; вторинні дані – результати непрямих вимірювань; значення ознак ситуацій; масиви параметрів функцій приналежності та інші параметри систем нечіткого логічного виведення. База знань містить: вирішальні правила розпізнавання ситуацій; масиви параметрів нейронних мереж, якщо такі використовуються для розпізнавання ситуацій або моделювання процесів; формулювання рекомендацій щодо корекції ТП у разі виникнення такої необхідності; метаправила корекції вмісту бази знань.

Етап 4. Формування складу комплексу математичних методів і моделей.

Комплекс математичних методів і моделей *CMM* повинен містити: модель проблемної ситуації в предметній області (*MPS*); модель структури СППР як концептуальну основу побудови інформаційної технології; модель якості кінцевого продукту у вигляді сукупності показників, що характеризують фізичні властивості продукту (*MQ*), оскільки саме множина показників якості продукту проектується на множину показників якості процесу виготовлення; набір математичних методів і моделей для розрахунку значень параметрів процесу, які неможливо виміряти прямими методами (*MIM*); набір методів і моделей для розв'язання задач моніторингу технологічного процесу, включаючи розпізнавання ситуації (*MM*); моделі пошуку рішень для корекції ходу технологічного процесу (*MSS*) при виникненні несприятливих ситуацій; моделі перетворення первинних даних на значення ознак ситуації (*MTPD*);

Етап 5. Формування комплексу інформаційних процесів. Комплекс інформаційних процесів зобразимо набором:

$$IP = \langle IPC, IPDPP, IPM, IPDC, IPDS, IPDR, IPRM, IPFH \rangle \quad (14)$$

де *IPC* – інформаційний процес координації; *IPDPP* – інформаційні процеси попередньої обробки даних; *IPM* – інформаційні процеси непрямих вимірювань і моніторингу параметрів технологічного процесу; *IPDC* – інформаційні процеси перетворення даних на ознаки ситуацій; *IPDS* – інформаційні процеси діагностики ситуацій; *IPDR* – інформаційні процеси вироблення рекомендацій оператору; *IPRM* – інформаційні процеси модифікації правил розпізнавання; *IPFH* – інформаційні процеси формування історії моніторингу. На рис. 3. наведено загальну схему інформаційної технології діагностики складного виробничого процесу.

У третьому розділі розроблені методи, моделі та інформаційна технологія моні-

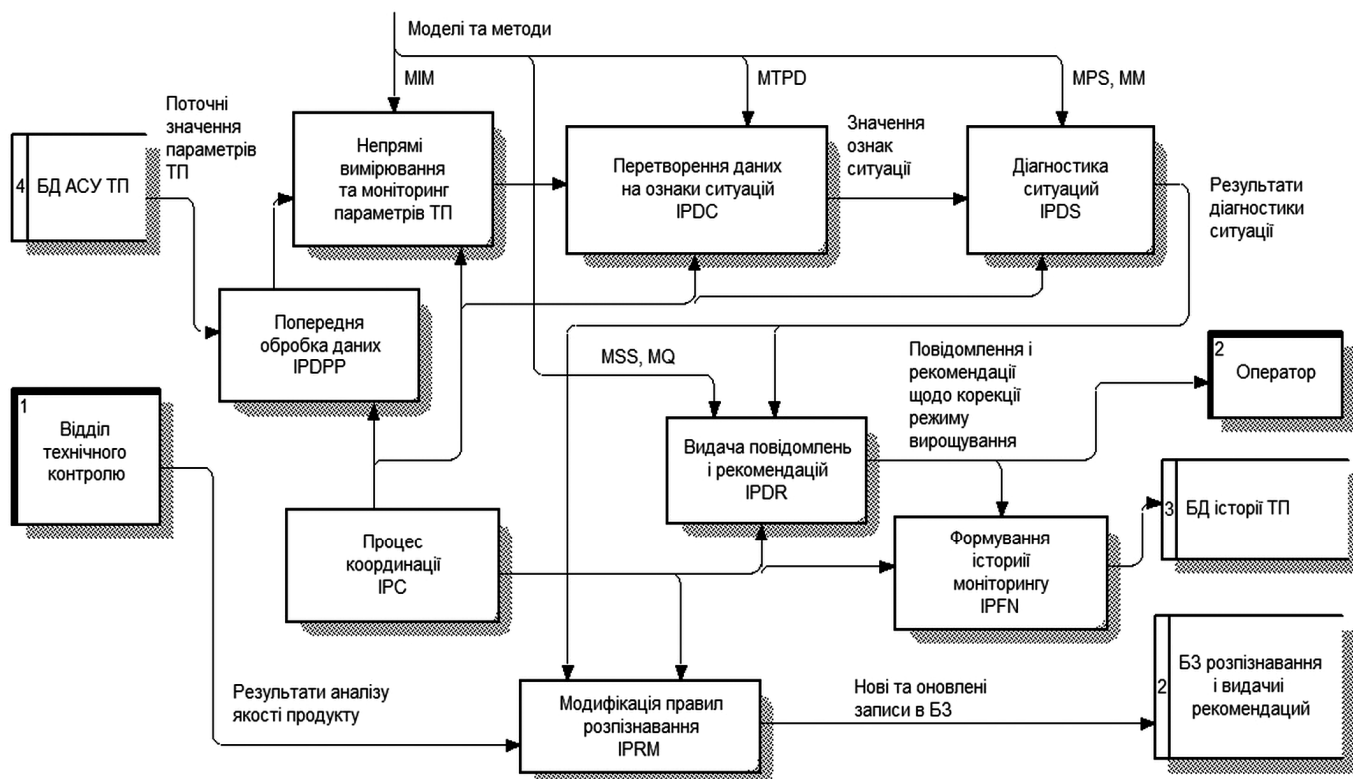


Рисунок 3 – Загальна схема інформаційної технології діагностики складного виробничого процесу

торингу температурних полів у процесі вирощування монокристалів. Особливістю задачі моніторингу температурних полів у розплаві та злитку є недоступність цих зон для прямих багатоточкових вимірювань і необхідність циклічних розрахунків у реальному часі протікання процесу вирощування. Для розв'язання поставленого завдання розроблено комплекс моделей, призначених для здійснення непрямих вимірювань параметрів температурних полів. До комплексу зазначених моделей входять: удосконалена нейромережева модель для непрямого моніторингу температурного поля в розплаві; модель розрахунку температури фонових нагрівачів; нечіткий клітинний автомат, що моделює процес кристалізації та використовується як імітаційна модель процесу вирощування для уточнення значень коефіцієнта теплопровідності в зоні фронту кристалізації в період налагодження системи моніторингу. Уточнені дані про коефіцієнт теплопровідності зберігаються у базі даних для інформаційної підтримки процесу моніторингу.

Розглянемо удосконалену нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля. Згідно з проведеними попередніми дослідженнями, до чинників, що впливають на температурне поле в розплаві, належать: рівень розплаву в тиглі, швидкість витягування, швидкість обертання кристала, швидкість обертання тигля, а також відношення радіуса до довжини вирощуваного злитка. Розрахунок методом скінчених різниць на 2D сітці не може врахувати пульсації температури в розплаві, викликаних обертанням тигля і затравки, тому як розрахункову модель використовуємо удосконалену нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля в розплаві, яка, на відміну від відомих, ураховує конвективні теплові потоки, швидкість витягування, стадію процесу витягування. Розрахункова сітка мережі відображає зону інтересу в підкристалній області. Вузлові точки сітки є входами і ви-

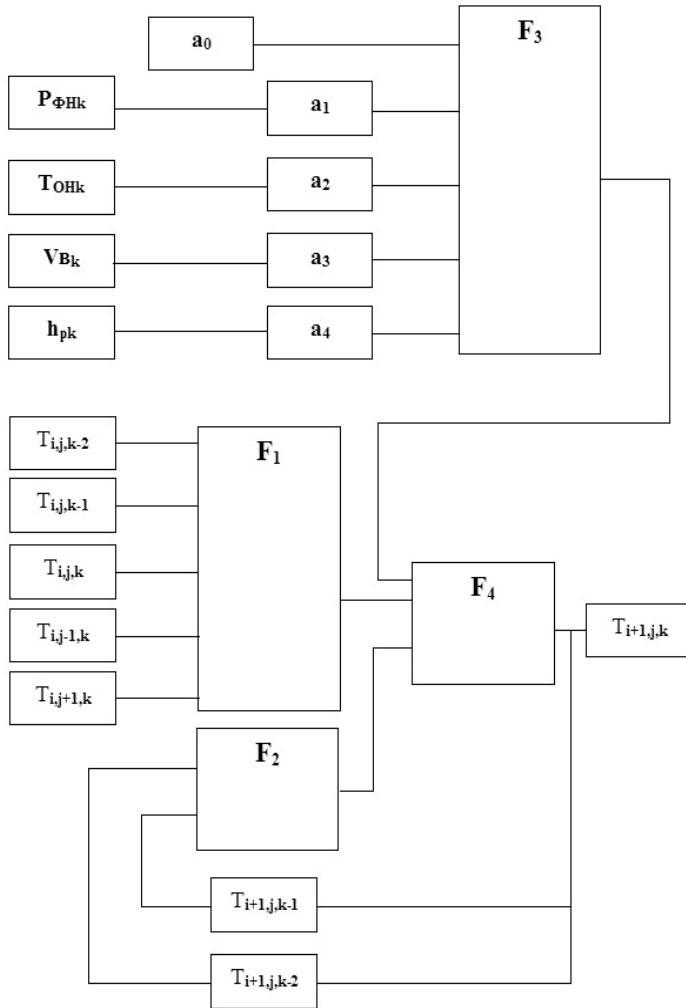


Рисунок 4 – Структура одного блока нейронної мережі

області розплаву. Входами модуля є температура основного нагрівача $T_{ОНк}$, споживана потужність фонового нагрівача $P_{ФН}$, швидкість витягування $V_{Бк}$ і відносний рівень розплаву в тиглі $h_{рк}$, що впливає на характер гідродинаміки розплаву. Четвертий модуль F_4 підсумовує виходи перших трьох модулів і обчислює значення температури в точці $T_{i+1,j,k}$. З урахуванням уведених позначень нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля в розплаві зобразимо таким чином:

$$M_{NN} = \langle F_1, F_2, F_3, F_4 \rangle, \quad (15)$$

де

$$F_1 = f_1(T_{i,k}, T_{i,k-1}, T_{i,k-2}); \quad (16)$$

$$F_2 = f_2(T_{i+1,k-1}, T_{i+1,k-2}); \quad (17)$$

$$F_3 = f_3(T_{іік}, P_{Оік}, V_{аk}, h_{δk}); \quad (18)$$

$$F_4 = f_4(F_1, F_2, F_3). \quad (19)$$

Для отримання цілісної картини розподілу температур у розплаві кілька вищеписаних блоків «розташовані» в осьовому і радіальному напрямках. Кількість «шарів» мережі в осьовому напрямку обмежено таким чином, щоб конфігурацію мережі не потрібно було змінювати при зниженні рівня розплаву до 20 %. При менших рівнях розплаву в тиглі моніторинг температурного поля не є актуальним.

ходами окремих блоків нейронної мережі.

Структура одного блока мережі показано на рис. 4. Блок складається із чотирьох модулів. Для першого і другого модулів i – індекс за радіусом (індексація йде від периферії до центру осі симетрії), j – індекс по осі z (індексація йде знизу вгору), k – індекс за часом. Перший модуль F_1 підсумовує поточний і два попередні значення температури розплаву шару j радіуса i і поточні значення з нижнього прилеглого шару $j-1$ і з верхнього прилеглого шару $j+1$ того ж радіуса. Другий модуль F_2 підсумовує два попередні значення температури шару j радіуса $i+1$, здійснюючи рекурентну частину обчислень. Таким чином, перші два модулі здійснюють часову і просторову ув'язку розрахованих значень температури. Третій модуль F_3 реалізований у вигляді регресійного рівняння та обчислює температуру фонового нагрівача, яка багато в чому визначає параметри температурного поля в підкристалній

Розрахунок параметрів температурного поля здійснюється в підсистемі «Моніторинг» із застосуванням моделі (15)–(19) і включає такі етапи:

1. Обчислення граничних умов на межі розрахункової сітки.

2. Обчислення значень температури в контрольних точках розплаву за допомогою запропонованої нейромережевої моделі та збереження результатів розрахунку, як «точок з відомою температурою» в розрахунковій сітці поряд з температурою в контрольній точці розплаву, отриманої за допомогою вимірювання термопарою.

3. Обчислення значень температури розплаву в проміжних вузлах розрахункової сітки методом скінчених різниць з використанням значень температур у контрольних точках, отриманих на попередньому кроці та збереження результатів у базі даних підсистеми моніторингу.

Для розрахунку температури фонового нагрівача (ФН), яка багато в чому визначає температурні градієнти в зоні кристалізації, розроблено регресійну модель, що має такий вигляд (використовуються натуральні значення чинників):

$$Y = 765,14 + 0,1436 * X1 + 0,0512 * X2 + 48,913 * X3 - 0,0799 * X4, \quad (20)$$

де $X1$ – споживана потужність ФН; $X2$ – температура основного нагрівача; $X3$ – швидкість витягування; $X4$ – поточний рівень розплаву.

У період налагодження підсистеми моніторингу температурних полів для імітаційного моделювання процесу кристалізації використовувався удосконалений метод моделювання процесу кристалізації, у якому, на відміну від існуючих методів, застосований нечіткий навчений клітинний автомат. Це дало можливість багаторазово відтворювати етапи процесу вирощування в умовах комп'ютерного експерименту при різних температурних режимах. Нижче наводиться опис етапів методу моделювання процесу кристалізації.

Етап 1. Встановлення механізмів впливу різних чинників на процес росту кристалу. Аналіз логічних зв'язків між чинниками, що впливають на процес росту монокристала, показав, що в разі витягування кристала з постійною швидкістю при постійній величині площі поперечного перерізу тигля достатньо вимірювати та керувати величиною діаметра злитка шляхом відповідних змін температури системи кристал-розплав.

Етап 2. Аналіз теплового балансу в області фронту кристалізації. Загальне рівняння теплового балансу з урахуванням осьової симетрії злитка і розплаву записується у вигляді $Q_L + Q_q = Q_s + Q_p$, де Q_L – тепловий потік, що надходить від розплаву і нагрівача; Q_q – тепловий потік, обумовлений прихованою теплотою плавлення; Q_s – кондуктивний тепловий потік від фронту кристалізації в злиток; Q_p – тепловий потік від фронту кристалізації за рахунок випромінювання з його поверхні. У моделі кристалізації тепловий баланс ураховується при розрахунку температурного поля.

Етап 3. Аналіз умов росту кристала на межі розподілу фаз. Межу розподілу фаз вважають розмитою. У рамках розглянутої макромоделі збільшення частки твердої фази слід співвіднести з одним параметром – швидкістю кристалізації, яка, у свою чергу, залежить від величини переохолодження.

Етап 4. Формулювання правил взаємного впливу комірок клітинного автомата. Під станом комірки розуміють ступінь переходу з рідкої фази у тверду. Через осьову симетричність об'єкта моделювання для локалізації комірок і визначення значень ко-

ординатних функцій вибрано циліндричну систему координат, у якій параметрами моделі є радіус монокристала R_k , дискретний відлік радіальної координати r_i з кроком Δr , крок зміни кута $\Delta \alpha$ і дискретний відлік z_j за координатою z з кроком Δz . Граничні умови задають у вигляді функції, що залежить від дискретного відліку кільцевої ділянки Δr . На кожному кроці Δr можливо задавати швидкість обертання розплаву і за необхідності врахування впливу домішок змінювати їх концентрацію.

Схему автомата показано на рис. 5. Вхідний алфавіт автомата включає:

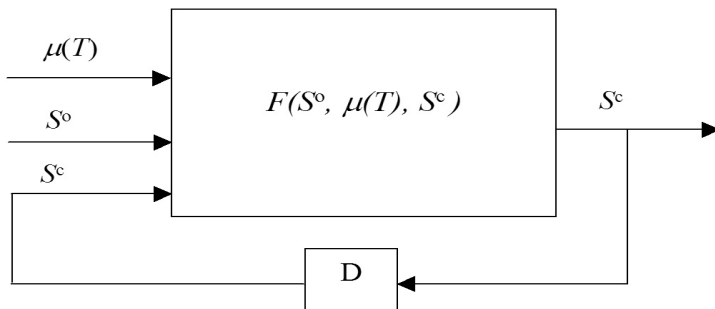


Рисунок 5 – Схема нечіткого автомата технологічного процесу – T_{max} і T_{min} . Нечітка змінна «Переохолодження» має функцію належності:

$$\mu(T) = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{\text{яч}}^H > T_{\text{пл}}^H \\ 1 - \frac{0.5 \cdot T_{\text{яч}}^H}{T_{\text{пл}}^H} & \text{if } T_{\text{яч}}^H \leq T_{\text{пл}}^H \end{cases}; \quad (21)$$

б) власний стан (ступінь кристалізації) комірки S_c . Нечітка змінна «Стан» має лінійну функцію приналежності, що зростає від 0 до 1.

в) інтегральна оцінка стану сусідніх комірок S_o , що обчислюється як середнє значення їх власних станів. Сусідніми вважаються: комірка, розташована зверху (попередній шар) і чотири комірки, що примикають до розглянутої у своєму шарі. Елемент D здійснює затримку на один такт розрахунку, тобто є пам'яттю автомата.

На підставі сказаного вище модель процесу кристалізації можна зобразити як четвертку вигляду:

$$A = \{X, S, S_0, F\}, \quad (22)$$

де X – скінчена множина входів; S – нескінченна множина станів; S_0 – початковий стан; $F = \varphi(S, X)$ – функція переходів.

Для опису переходів з кожного стану в усі інші стани використовується t-конорма Лукасевича, модифікована за рахунок уведення вагових коефіцієнтів:

$$F(S_o, \mu(T), S_c) = \min(a_1 S^o + a_2 \mu(T) + a_3 S^c, 1), \quad (23)$$

де коефіцієнти a_1, a_2, a_3 є параметрами настройки для врахування неоднорідності властивостей комірок.

Етап 5. Розробка алгоритму роботи автомата. Моделювання процесу кристалізації починається від шару, що примикає до фронту кристалізації (ФК), і триває пошарово від злитка в розплав. Для розрахунку нових станів одного шару використовується «дзеркальний» масив. При розрахунку першого шару вважається, що розташований над ним шар повністю затвердів, тобто стани осередків верхнього (нульового) шару дорівнюють 1.

Етап 6. Установлення фізичних розмірів комірок автомата. В експериментах висота шару становила 0,5 мм; розмір уздовж радіуса – 1 мм; кутовий розмір – 3,6°. Та-

ким чином, кожен шар при 3D-моделюванні може містити до 10^5 комірок при заданому діаметрі злитка до 200 мм. Кількість шарів коливалася від 10 до 35.

Етап 7. Налаштування автомата. Використовується уперше запропонований метод налаштування параметрів нечіткого клітинного автомата, оснований на пошуку оптимальних значень вагових коефіцієнтів у зваженій t-нормі Лукасевича.

Етап 7.1. Генерується навчальна вибірка. Приклади для вибірки формуються таким чином. Для кожного шару заданий радіус у мм. Значення радіуса відображає форму ФК, отриману за числовим розрахунком і заданим значенням переохолодження ΔT . З кожного шару випадковим чином відбирається по K_α значень кутових координат α . Для кожної кутової координати автомат розраховує M значень станів осередків уздовж радіуса. Таким чином, у кожному прикладі автомат здійснює M обчислень стану та ефективний радіус R_{ki} , в межах якого стан затвердіння $S_{ki}^c \geq Q_{\max}$.

Етап 7.2. Формується вектор параметрів, що налаштовуються, який містить три вагові коефіцієнти a_1, a_2, a_3 за числом входів автомата. Під час навчання значення коефіцієнтів варіюються в межах $0,1 \dots 1,0$.

Етап 7.3. Формується критерій оптимальної налаштування. Таким критерієм слугує функція повної помилки автомата на всіх прикладах навчальної вибірки:

$$E = \frac{1}{N_o} \sum_{k=1}^{N_z^o} \sum_{i=1}^{N_R^o} (R_k^o - R_{ki})^2, \quad (24)$$

де N_z^o – задане число шарів; N_R^o – задане число прикладів у шарі; R_k^o – заданий радіус шару; N_o – загальне число прикладів у навчальній вибірці.

Етап 7.4. Для навчання використовується адаптивний алгоритм випадкового пошуку, що містить такі кроки: генерація популяції; ранжування особин за критерієм (24); виділення та уточнення координат лідерів.

Описані вище методи та моделі є складовими інформаційної технології моніторингу температурних полів системи «кристал розплав» (рис. 6).

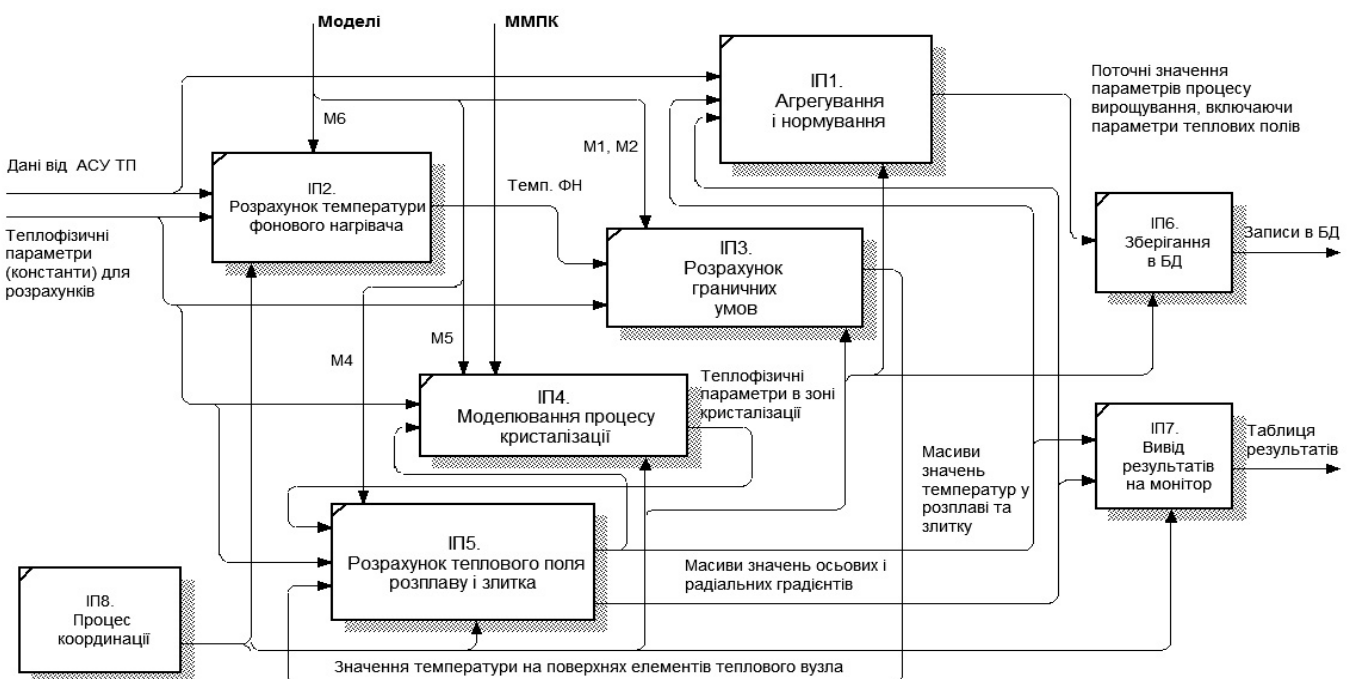


Рисунок 6 – Загальна схема інформаційної технології моніторингу температурного поля системи кристал-розплав у процесі вирощування монокристалів

На схемі рис. 6 – М1 – модель апроксимації розподілу температури на стінці тигля; М2 – модель апроксимації розподілу температури на поверхні герметизатора; М3 – модель розрахунку температури в злитку; М4 – нейромережева модель, що обчислює температуру в розплаві; М5 – модель процесу кристалізації; М6 – модель розрахунку температури фонового нагрівача; ММПК – метод моделювання процесу кристалізації.

У четвертому розділі розроблено методи, моделі та інформаційну технологію підтримки задачі оптимізації теплових умов охолодження злитка в ростовій установці шляхом вибору значень геометричних параметрів теплових екранів. Реалізація цієї інформаційної технології в рамках підсистеми «Екран» прискорює технологічну підготовку виробництва і виключає необхідність проведення фізичних експериментів. До інформаційної технології входять: математична модель зв'язку між геометричними параметрами елементів теплового вузла і тепловими потоками випромінювання, модель розрахунку температурних полів розплаву і злитка, математична модель задачі оптимізації параметрів теплового екрана, удосконалений метод розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана, а також ряд інформаційних процесів, що реалізують алгоритми розрахунку та оптимізації.

Математична модель задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана повинна враховувати фізичні особливості впливу температурних градієнтів на виникнення деформацій і напружень в сформованій частини монокристала. Тому цільова функція F^* враховує ступінь нерівномірності температурного градієнта GZ уздовж осі злитка і величину радіального градієнта температури GR у злитку на рівні поверхні герметизатора:

$$F(R_{\bar{a}}, L_{\bar{a}}, H_{\bar{a}}) = \left[\alpha(i) \sum_{i=1}^N (GZ_i - GZ_0)^2 + \beta(i) \sum_{j=1}^M (GR_j - GR_0)^2 \right] \rightarrow \min, \quad (25)$$

де N – кількість дискретних циліндричних областей злитка вздовж осі z , R_e – радіус екрана, L_e – висота екрана, H_e – висота екрана над рівнем герметизатора; GR_0 – порогове значення градієнта, перевищення якого призводить до неприпустимого ризику збільшення щільності дислокацій у злитку. Вагові коефіцієнти $\alpha(i)$ і $\beta(i)$ визначають зону злитка, в якій відбувається оптимізація і змінюються таким чином:

$$\alpha(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 \leq i < 2 \\ 0,5 & \text{if } i = 2 \\ 0,2 & \text{if } i > 2 \end{cases}, \quad \beta(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in [0, 2] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (26)$$

Обмеженнями в моделі оптимізації слугують граничні умови щодо температури, які задають на робочих поверхнях тигля, на поверхні розплаву і закон розподілу температури по поверхні екрана уздовж осі z з урахуванням зміни радіуса екрана:

$$T_p = T_p(r); \quad T_\tau = T_\tau(h); \quad T_e = T_e(z, r_e).$$

Таким чином, задачі оптимізації розмірів і положення екрана можна поставити таким чином: знайти оптимальні геометричні параметри екрана L_e , R_e , H_e при заданих значеннях R_z , R_τ , заданих граничних умовах та мінімізації цільової функції (25).

Удосконалений метод розв'язання задачі оптимізації базується на використанні моделі, що наведена вище, і використовує еволюційну процедуру пошуку. Як вихідні дані використовуються значення радіуса злитка і тигля. Оптимізуються закон зміни радіуса екрана $R_e = k \cdot z + c$, висота екрана L_e , висота розташування екрана над розпла-

вом H_e . Задаються допустимі діапазони зміни параметрів $R_{e\min}$, $R_{e\max}$, L_e і H_e . Задають також поточну висоту злитка Z_t . Метод реалізується у вигляді таких етапів:

Етап 1. Для числового розв'язку задачі розрахунку теплового поля в злитку задають граничні умови (розподіл температури на стінці тигля, розподіл температури по поверхні екрана, розподіл температури по поверхні розплаву, температуру навколишнього середовища).

Етап 2. За допомогою еволюційного алгоритму генерується популяція допустимих рішень у вигляді четвірок $(k_e, c_e, L_{ek}, H_{ek})$, $k=1\dots P$, де P – число членів популяції.

Етап 3. Кожна четвірка $(k_e, c_e, L_{ek}, H_{ek})$ використовується в моделі конфігурації теплового вузла для обчислення градієнтів температури по осі та по радіусу злитка.

Етап 4. Для кожної четвірки $(k_e, c_e, L_{ek}, H_{ek})$ обчислюють значення критерію (25).

Етап 5. За допомогою еволюційних процедур, які включають мутацію, ранжування особин, уточнення координат лідерів і зміну складу популяції, відбирається найкращий розв'язок за критерієм (25). Алгоритм має такі параметри настроювання: P – кількість членів популяції; η – кількість претендентів до еліти і кількість особин, які випадково додаються до еліти; A – коефіцієнт зменшення меж для уточненого пошуку екстремуму; M – кількість пробних точок у вузьких межах уточненого пошуку.

Розроблені моделі та метод оптимізації конфігурації та положення теплового екрана включені до інформаційної технології, схему якої зображено на рис. 7. На схемі рис. 7 – М1 – модель оптимізації геометричних параметрів теплового екрана; М0 – метод оптимізації геометричних параметрів теплового екрана; М2 – математична модель зв'язку між геометричними параметрами елементів теплового вузла і тепловими потоками випромінювання; М3 – модель апроксимації розподілу температури на стінці тигля; М4 – модель апроксимації розподілу температури на поверхні герметизатора; М5 – модель апроксимації розподілу температури в зоні кристалізації; М6 – модель розрахунку теплових умов.

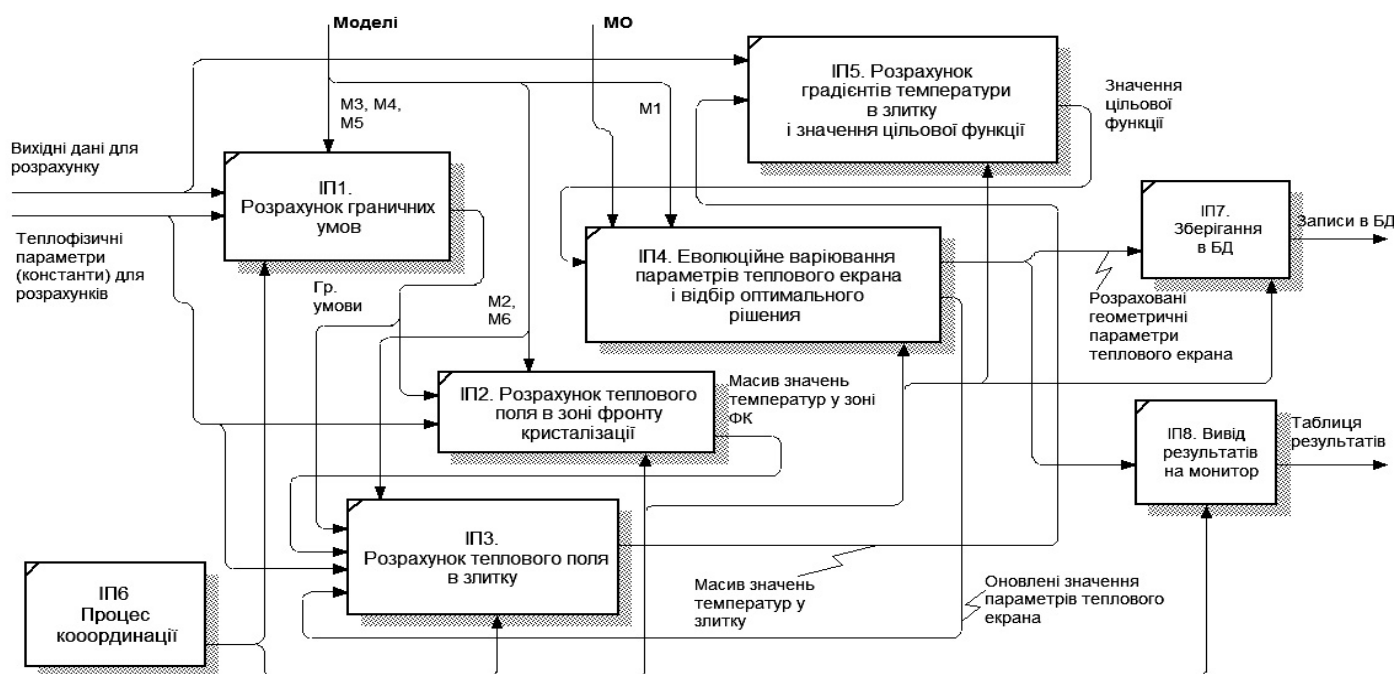


Рисунок 7 – Загальна схема інформаційної технології оптимізації умов охолодження злитка

Розроблена інформаційна технологія дозволяє на стадії технологічної підготовки виробництва оптимізувати умови охолодження злитка довільного типорозміру.

У п'ятому розділі розроблені моделі, алгоритми та інформаційна технологія підтримки прийняття оперативних рішень та управління якістю процесу вирощування.

Запропоновано методику побудови комплексу моделей та алгоритмів діагностування ситуацій і видачі рекомендацій щодо корекції режиму технологічного процесу, яка включає в себе такі етапи: 1. Структурування оперативної інформації та складання словника ситуацій. 2. Відбір (угруповання) інформативних параметрів для кожної ситуації. 3. Формування словника ознак. 4. Розробка моделей і процедур, що перетворюють первинні параметри процесу на ознаки ситуацій. 5. Формулювання вербальних правил розпізнавання ситуацій щодо груп ознак. Кластеризація ознак. 6. Розробка моделі розпізнавання і баз знань для діагностики та видачі рекомендацій. 7. Розробка алгоритмів розпізнавання та алгоритмів корекції баз знань.

В основу структурування оперативної інформації покладено аналіз і класифікацію ситуацій (якісних оцінок стану процесу, які ґрунтуються на аналізі технологічних режимів). Виділимо два основні режими протікання технологічного процесу:

1. Нормальний режим (штатна ситуація), коли процес відбувається в рамках технологічних уставок і змінні стану знаходяться в інтервалі $[(X_i)_0; (X_i)_{\text{КР}}]$, де $(X_i)_0$ – уставки, $(X_i)_{\text{КР}}$ – критичні значення змінних, при яких можливе виникнення критичного режиму.

2. Критичний режим (критична ситуація), коли необхідно вжити негайних заходів щодо недопущення переходу до нештатної ситуації; змінні стану знаходяться в інтервалі $[(X_i)_{\text{КР}}; (X_i)_{\text{НС}}]$, де $(X_i)_{\text{НС}}$ – значення змінних, при яких практично неминуче виникнення нештатних ситуацій.

Експертний аналіз дозволив виявити вісім ситуацій, серед яких штатна ситуація, три позаштатні та чотири критичні. Для кожної ситуації були відібрані параметри процесу, які прямо або непрямо впливають на її виникнення. Кожен параметр, виділений на етапі якісного аналізу, розглядався експертами із застосуванням методу парних порівнянь на предмет його значущості щодо діагностики ситуацій.

Сформовано словник ознак ситуацій і розроблено моделі та процедури перетворення значень параметрів процесу на значення ознак ситуацій. Для діагностики ситуацій важливі не поточні значення деяких параметрів, а тенденції їх зміни як ознаки переходу до іншого режиму або ситуації. Як приклад наведемо ознаку «Відхилення поточного значення діаметра злитка». Для відстеження тенденції зміни діаметра вибрано лінійну модель ковзного середнього на попередніх часових інтервалах виміру:

$$X1 = (\Delta D[t-2] + \Delta D[t-1] + \Delta D[t])/3, \quad (27)$$

де $\Delta D[t-2]$, $\Delta D[t-1]$, $\Delta D[t]$ – обчислені значення відхилення на часових точках $t-2$, $t-1$ і t відповідно. У лінгвістичній інтерпретації ознаки використовуються терми: «мале», «середнє», «велике». Для обчислення значення ознаки «Нерівномірність осьового градієнта у злитку на рівнях від 1 до 12 см» необхідні такі операції:

1. Обчислюють середній градієнт по довжині злитка (1 ... 12 см) G_{z0} .

2. Максимальне значення осьового градієнта співвідноситься із середнім значенням і обчислюють значення нерівномірності:

$$U = \left(1 - \frac{G_{z0}}{G_{z \max}}\right) . \quad (28)$$

Отримана величина інтерпретується в термах: «нормальна», «висока».

Для розпізнавання кожної ситуації сформовані вербальні правила. Приклад правила: ЯКЩО <Радіальний градієнт на рівні +1 = «підвищений»> АБО <Осьовий градієнт у злитку = «великий»> АБО <Нерівномірність осьового градієнта у злитку = «висока»> ТО <Зростає ймовірність збільшення щільності дислокацій (критична ситуація)> .

У процесі розвідувального аналізу даних проведено, зокрема, одновимірну класифікацію, яка дозволила виявити в просторі ознак області, характерні для різних ситуацій. Уточнення меж кластерів виконувалось шляхом експертних оцінок. Аналіз наявних у розпорядженні розробників даних, показав: коефіцієнт варіації вибірок становить 34 ... 39%; між деякими ознаками є кореляція; вибірки містять «аномальні» значення, які з великою частотою збігаються зі зривами процесу вирощування; є значні пропуски даних, які неможливо відновити традиційними методами.

Ураховуючи дані обставини, можна зробити висновок, що для побудови відповідної моделі розпізнавання та прогнозування ситуацій має сенс використання модульних, ієрархічних нечітких або гібридних нейро-нечітких моделей. Оскільки в розглянутому випадку експертна інформація обмежена знанням розмитих діапазонів робочих параметрів процесу, як основу вибрана нечітка модель класифікації, яка добре зарекомендувала себе у розв'язанні задач розпізнавання за відсутності властивості сепарабельності у кластерів. Кластеризація ознак і попереднє формулювання правил забезпечують логічну прозорість моделі.

На першому етапі розробки вдосконаленої нечіткої моделі розпізнавання ситуацій побудовано функції приналежності для лінгвістичних змінних – ознак ситуацій, а також базу знань. У процесі кластеризації було виявлено, що щільності різних кластерів однієї й тієї ж ознаки різні. Іншими словами, різна інформативність ознак щодо кожного правила. З урахуванням того, що базові підмножини (кластери) вже сформовані експертами, у моделі розпізнавання введені вагові коефіцієнти w^{ji} для кожного елементарного посилення в кожному правилі. Значення коефіцієнтів обмежені діапазоном [0,5 ... 1]. При цьому одиничне значення еквівалентно стовідсотковій значущості посилення. Якщо кількість ознак ситуацій n , а число ситуацій m , то, з урахуванням введення коефіцієнтів w^{ji} , база нечітких знань в загальному вигляді може бути зображена у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1 – Структура бази нечітких знань з діагностики ситуацій

№, п/п	Вхідні змінні та коефіцієнти індивідуальної настройки елементарних посилок								Вихідна змінна
	x_1		x_2		... x_i ...		x_n		
1 ₁	A_1^{11}	w_1^{11}	A_2^{11}	w_2^{11}	A_i^{11}	w_i^{11}	A_n^{11}	w_n^{11}	d_1
1 ₂	A_1^{12}	w_1^{12}	A_2^{12}	w_2^{12}	A_i^{12}	w_i^{12}	A_n^{12}	w_n^{12}	
...	
1 _{k1}	$A_1^{1k_1}$	$w_1^{1k_1}$	$A_2^{1k_1}$	$w_2^{1k_1}$	$A_i^{1k_1}$	$w_i^{1k_1}$	$A_n^{1k_1}$	$w_n^{1k_1}$	
...
j_1	A_1^{j1}	w_1^{j1}	A_2^{j1}	w_2^{j1}	A_i^{j1}	w_i^{j1}	A_n^{j1}	w_n^{j1}	d_j
j_2	A_1^{j2}	w_1^{j2}	A_2^{j2}	w_2^{j2}	A_i^{j2}	w_i^{j2}	A_n^{j2}	w_n^{j2}	

...		
j_{kp}	$A_1^{jk_p}$	$w_1^{jk_p}$	$A_2^{jk_p}$	$w_2^{jk_p}$	$A_i^{jk_p}$	$w_i^{jk_p}$	$A_n^{jk_p}$	$w_n^{jk_p}$	
...
m_1	$A_1^{m_1}$	$w_1^{m_1}$	$A_2^{m_1}$	$w_2^{m_1}$	$A_i^{m_1}$	$w_i^{m_1}$	$A_n^{m_1}$	$w_n^{m_1}$	d_m
m_2	$A_1^{m_2}$	$w_1^{m_2}$	$A_2^{m_2}$	$w_2^{m_2}$	$A_i^{m_2}$	$w_i^{m_2}$	$A_n^{m_2}$	$w_n^{m_2}$	
...		
m_{km}	$A_1^{m_{km}}$	$w_1^{m_{km}}$	$A_2^{m_{km}}$	$w_2^{m_{km}}$	$A_i^{m_{km}}$	$w_i^{m_{km}}$	$A_n^{m_{km}}$	$w_n^{m_{km}}$	

Елемент A_i^{jp} , що знаходиться на перетині i -го стовпця та j_p -го рядка відповідає лінгвістичній оцінці параметра x_i в рядку матриці знань з номером j_p . Лінгвістична оцінка вибирається з терм-множин, що відповідають змінній x_i , яка описує стан процесу, тобто $A_i^{jp} \in T_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k_j}$. Тоді удосконалена нечітка модель розпізнавання ситуацій виглядає таким чином:

$$\bigcup_{p=\overline{1, k_j}} \bigcap_n \left[(x_i = A_i^{jp}) w_i^{jk_p} \right] \rightarrow d_j, \quad (29)$$

де d_j – діагностичний висновок щодо поточної ситуації.

Діагностика ситуації передбачає визначення ступеня критичності. На першому етапі процедури визначення критичності для кожної ознаки x_i з правила, що визначає ситуацію S , фіксують значення x_i^* як відстань від центра кластера номінального режиму до поточної робочої точки. На другому етапі обчислюють ступінь критичності як зважену суму значень ознак:

$$K_s = \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i x_i^*, \quad (30)$$

де α_i – ваговий коефіцієнт значущості ознаки з точки зору критичності ситуації. Для оцінювання значущості ознак у конкретних ситуаціях використовувався метод парних порівнянь.

На третьому етапі для лінгвістичної оцінки критичності ситуації використовують лінгвістичну змінну з трьома значеннями: «Мала» (у центрі кластера номінального режиму); «Середня» – у центрі кластера критичного режиму; «Висока» – від критичної зони і вище. Нечітку шкалу оцінки ступеня критичності наведено на рис. 8.

Після розпізнавання ситуації та оцінювання її критичності СППР повинна видавати рекомендацію щодо корекції режиму процесу вирощування. Розглянуті вище ситуації мають дві категорії – критичні й нештатні. У дисертаційній роботі розглянуто корекцію критичних ситуацій.

За допомогою експертів сформульовані рекомендації оператору в критичних ситуаціях. Рекомендації в більшості випадків стосуються зміни температурного режиму і перевірок стабільності значень окремих параметрів процесу. Оператор приймає рішення і реалізує рекомендації, якщо ступінь критичності ситуацій середній або високий.

Якщо у двох ситуаціях ступінь критичності однаковий, то необхідно, щоб СППР

видала рекомендації з урахуванням спільної появи ситуацій. Для розв'язання цієї проблеми була сформована матриця попарної сумісності критичних ситуацій (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця сумісності ситуацій

	S2	S4	S6	S7
S2	–	A2.4	A2.6	0
S4	–	–	A4.6x5	1
S6	–	–	–	1
S7	–	–	–	–

У даній таблиці символ «1» означає, що одночасна поява двох ситуацій викликає еквівалентні рекомендації; символ «0» означає, що спільна поява ситуацій S2 і S7 не викликає суперечливих рекомендацій; A2.4 – спільна поява ситуацій S2 і S4 вимагає видачі особливої рекомендації; A2.6 – спільна поява ситуацій S2 і S6 вимагає видачі особливої рекомендації; A4.6x5 – спільна поява ситуацій S4, S6 і ознаки x5 вимагає видачі особливої рекомендації.

Таким чином, побудована удосконалена нечітка модель розпізнавання ситуацій (32)–(33), яка дозволяє коригувати і поповнювати базу знань і генерувати повідомлення та рекомендації щодо корекції режиму процесу вирощування монокристалів.

Завдання навчання та донавчання СППР містить дві задачі – поповнення БЗ і корекції антецедентів правил. Поповнення БЗ відбувається, якщо оператор виявляє невраховану в БЗ критичну (або нештатну) ситуацію. Протягом усього процесу вирощування дані про всі вимірювані та контрольовані параметри процесу зберігаються в окремій таблиці БД і після закінчення процесу вирощування інформація про хід протікання процесу архівується. У міру надходження даних про якість вирощеного злитка архів процесу забезпечується додатковим файлом, у якому зберігається оцінка результатів вирощування. У міру накопичення архівної інформації (по закінченні 20...40 процесів вирощування) оператор дає команду для обробки накопичених даних. При цьому виділяються вектори значень параметрів ТП, що передували виникненню несприятливої ситуації.

Корекція вагових коефіцієнтів елементарних посилок здійснюється при підготовці БЗ до використання у складі СППР, або за отриманням нової підвибірки прикладів. Кожен приклад містить пару «вхід-вихід» $\langle X^*, d^* \rangle$, тобто вектор значень ознак ситуації та номер відомої ситуації як шаблон. Для настроювання використовувалося 80 прикладів і ще 80 – для тестування моделі.

Підбір значень вагових коефіцієнтів проводився за допомогою еволюційного алгоритму, який генерує популяцію рішень, реалізує мутацію, відбір та уточнення координат рішень-лідерів. На рис. 8 показано частку розпізнаних ситуацій до навчання (значення всіх вагових коефіцієнтів дорівнюють 1) і після навчання. Після навчання модель помітно краще розпізнає ситуації. Рівень ризику помилок першого і другого роду у всіх ситуаціях уважався однаковим. Донавчання відбувається у міру накопичення нової підвибірки прикладів у процесі експлуатації підсистеми.

Для корекції БЗ у разі виявлення відомої критичної або нештатної ситуації, значення ознак якої відрізняються від значень ознак, наявних у БЗ, розроблено спеціаль-

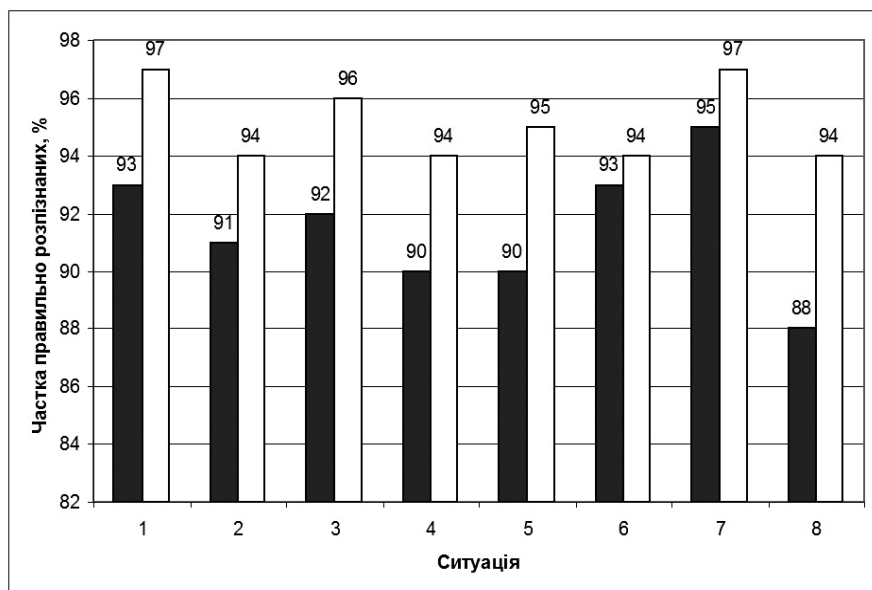


Рисунок 8 – Частка розпізнаних ситуацій до навчання моделі та після навчання

Розроблено інформаційну технологію підтримки прийняття оперативних рішень у ході процесу вирощування монокристалів (рис. 9). Інтегрована інформаційна технологія управління якістю процесу вирощування (рис. 10) об'єднує три інформаційні технології, розроблені в розділах 3, 4 і 5.

На етапі аналізу даних використовуються не лише результати діагностики, а й результати лабораторного аналізу якості злитка – щільність дислокацій у різних перетинах злитка і дисперсія відхилень діаметра циліндричної частини.

ний алгоритм, який полягає в обчисленні ступеня істинності нового антецедента, порівняння отриманого значення з порогом і перевірки існування його аналога. Якщо ступінь істинності вищий за поріг і аналог існує, коригуються значення вагових коефіцієнтів елементарних посилок. Інакше антецедент додають до правила зі знаком диз'юнкції. Розроблено також алгоритми діагностики ситуацій, видачі рекомендацій і корекції бази

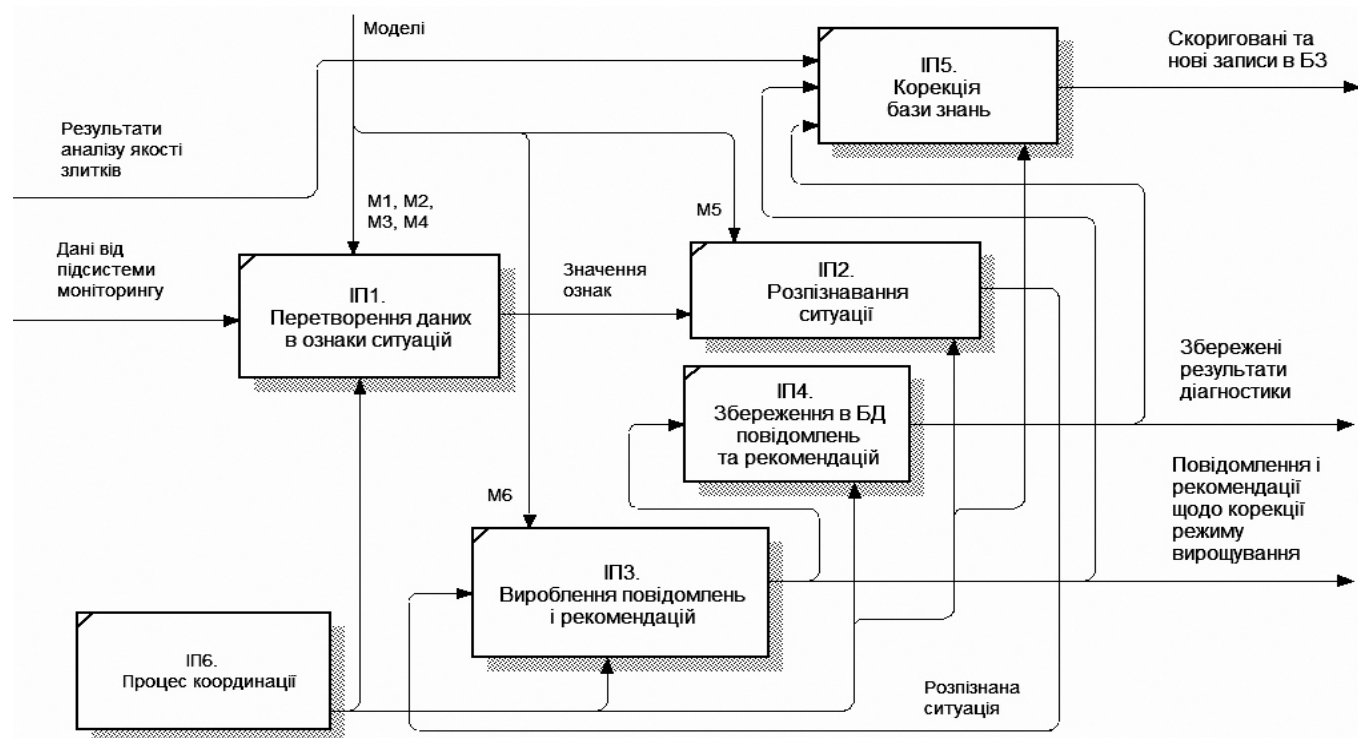


Рисунок 9 – Загальна схема інформаційної технології підтримки прийняття оперативних рішень

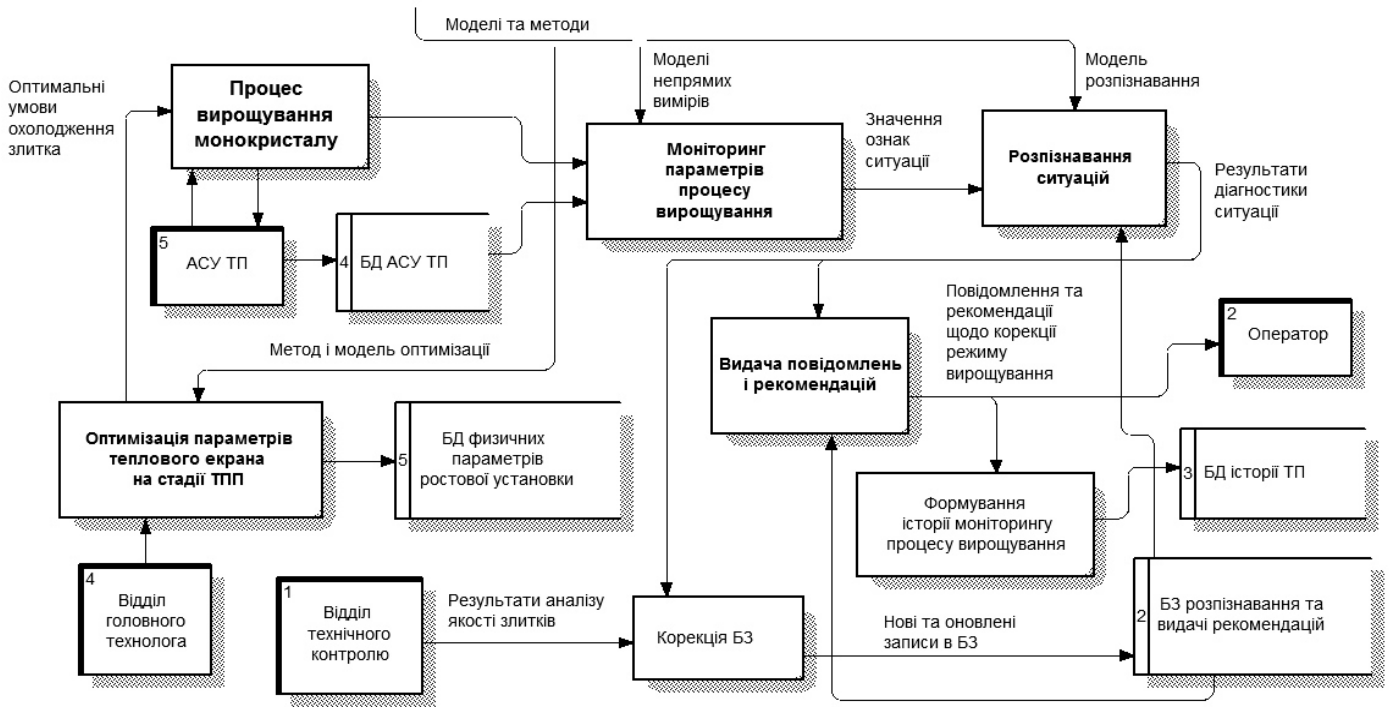


Рисунок 10 – Схема інтегрованої інформаційної технології управління якістю процесу вирощування

Таким чином, створені теоретичні та практичні передумови для практичної реалізації інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування монокристалів напівпровідників.

У шостому розділі вирішені питання практичної реалізації підсистем «Моніторинг», «Порадник», «Екран» у яких реалізовані розроблені моделі, методи та алгоритми розв’язання функціональних задач ІАС УЯПВ. Реалізація інформаційної технології моніторингу процесу вирощування монокристалів полягала в розробці підсистеми «Моніторинг». Функціональну модель підсистеми «Моніторинг» зображено в нотатції DFD на рис. 11.

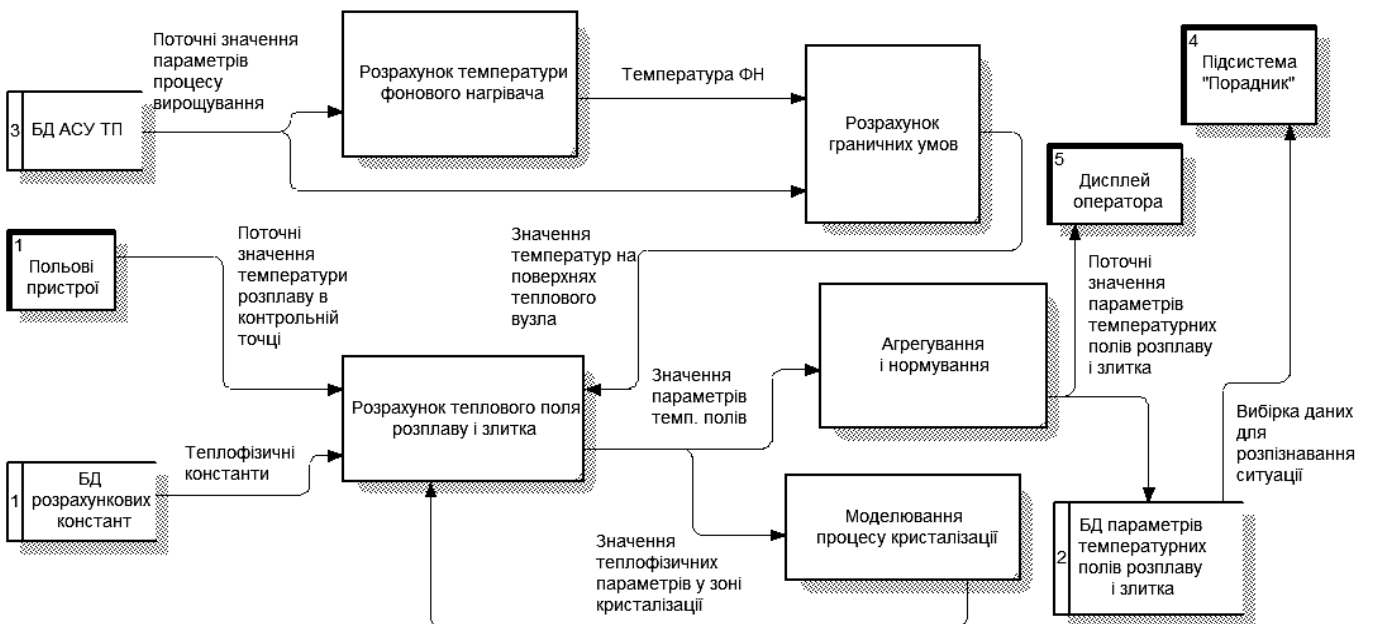


Рисунок 11 – Функціональна модель підсистеми «Моніторинг»

Реалізація інформаційної технології підтримки прийняття оперативних рішень у процесі вирощування полягала в розробці підсистеми «Порадник». Функціональну модель підсистеми «Порадник» зображено в нотації DFD на рис. 12.

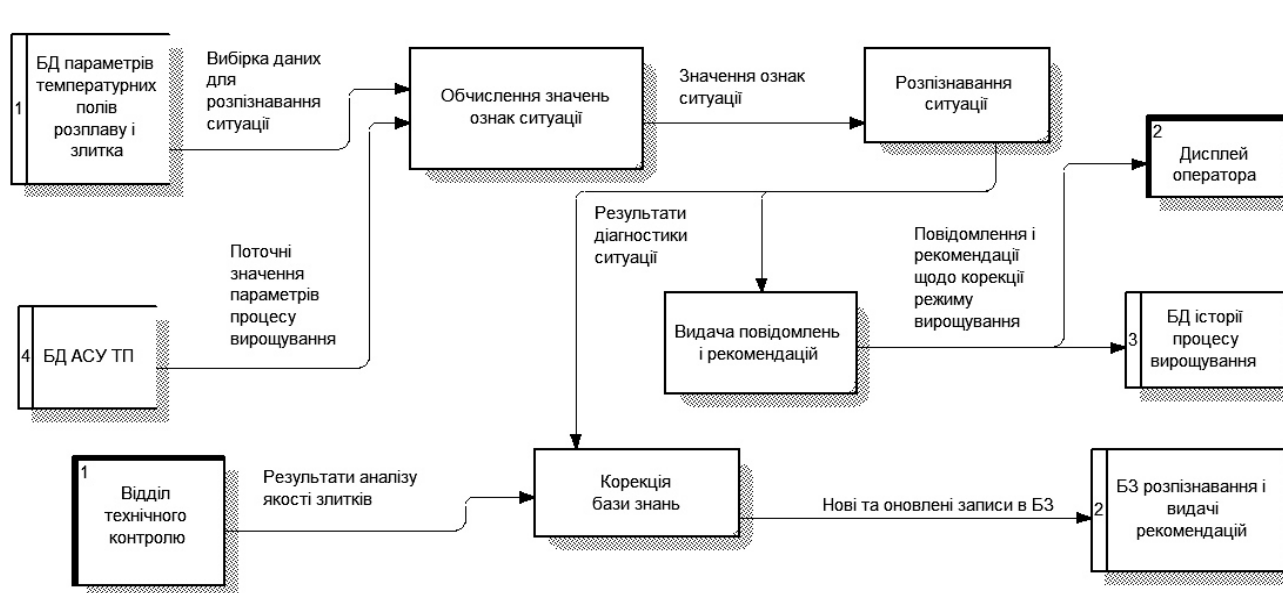


Рисунок 12 – Функціональна модель підсистеми «Порадник»

Функціональна модель підсистеми «Екран» зображена в нотації DFD на рис. 13. Підсистема «Екран» використовується на стадії технологічної підготовки виробництва злитків нового типорозміру або в процесі реконструкції теплових вузлів ростових установок. Оптимізація теплових умов вирощування та охолодження злитка спрямована в кінцевому рахунку, на зниження рівня щільності дислокацій у монокристалах і відповідно на підвищення споживчих властивостей кінцевого продукту.

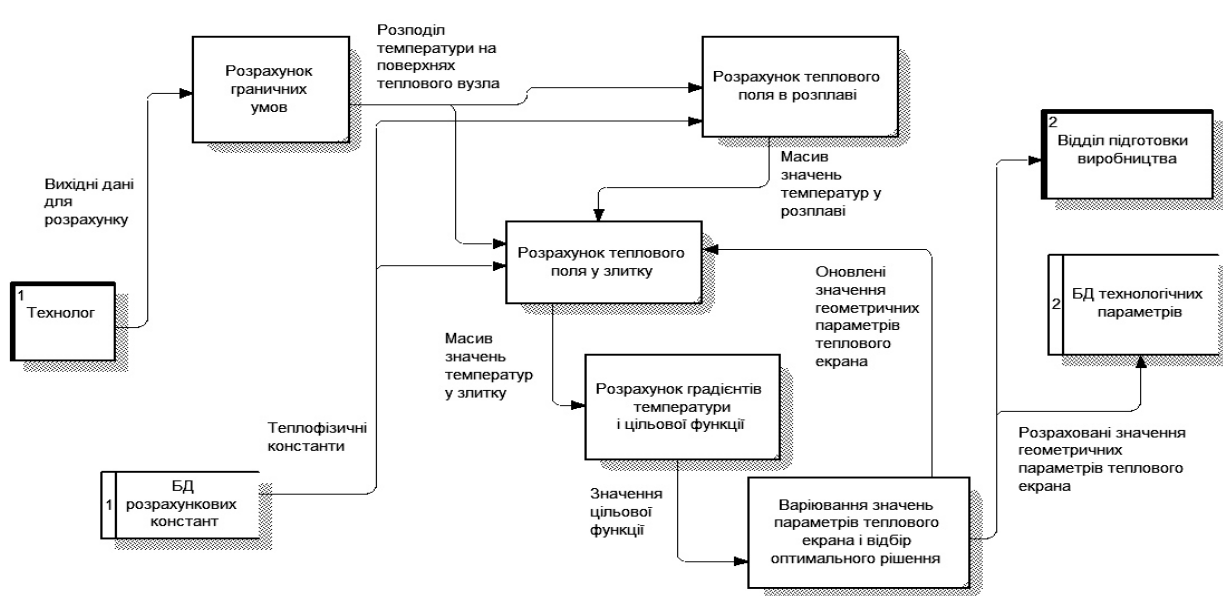


Рисунок 13 – Функціональна модель підсистеми «Екран»

На рис. 14 показано усереднений розподіл щільності дислокацій у злитках GaAs: а) без застосування ІАС УЯПВ; б) із застосуванням ІАС УЯПВ. З експериментальних

даних дослідження щільності дислокацій по довжині злитків, вирощених на ростовій установці «Арсенід 1М», можна зробити висновок про те, що застосування ІАС

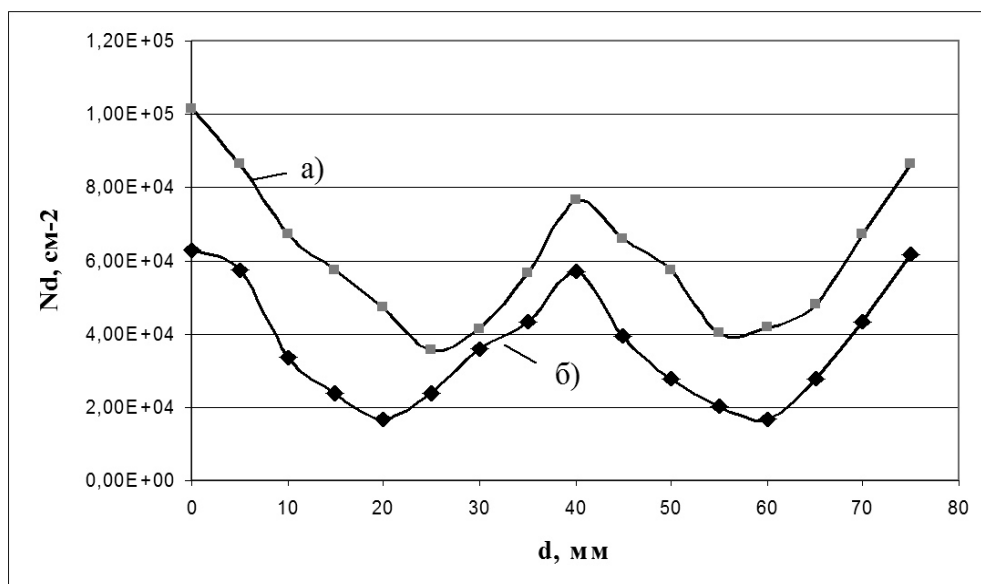


Рисунок 14 – Розподіл щільності дислокацій у злитку GaAs: а) без застосування ІАС; б) із застосуванням ІАС

УЯПВ дозволило зменшити залишкові напруги і як наслідок досягти зменшення щільності дислокацій у злитку в середньому в 1,5 рази. Наведено результати оцінювання економічного ефекту від упровадження на виробничому підприємстві ІАС УЯПВ. Після впровадження ІАС УЯПВ протягом 2013-го року втрати від зривів процесу вирощування монокристалів арсеніду галію знизилися приблизно в 3,5 рази. Діаграму зниження втрат від виникнення нештатних ситуацій наведено на рис. 15. Розрахований також економічний ефект від спрощення процесу технічної підготовки виробництва при впровадженні підсистеми «Екран». Сумарний економічний ефект від впровадження ІАС УЯПВ склав близько 85,4 тис. грн.

Діаграму зниження втрат від виникнення нештатних ситуацій наведено на рис. 15. Розрахований також економічний ефект від спрощення процесу технічної підготовки виробництва при впровадженні підсистеми «Екран». Сумарний економічний ефект від впровадження ІАС УЯПВ склав близько 85,4 тис. грн.

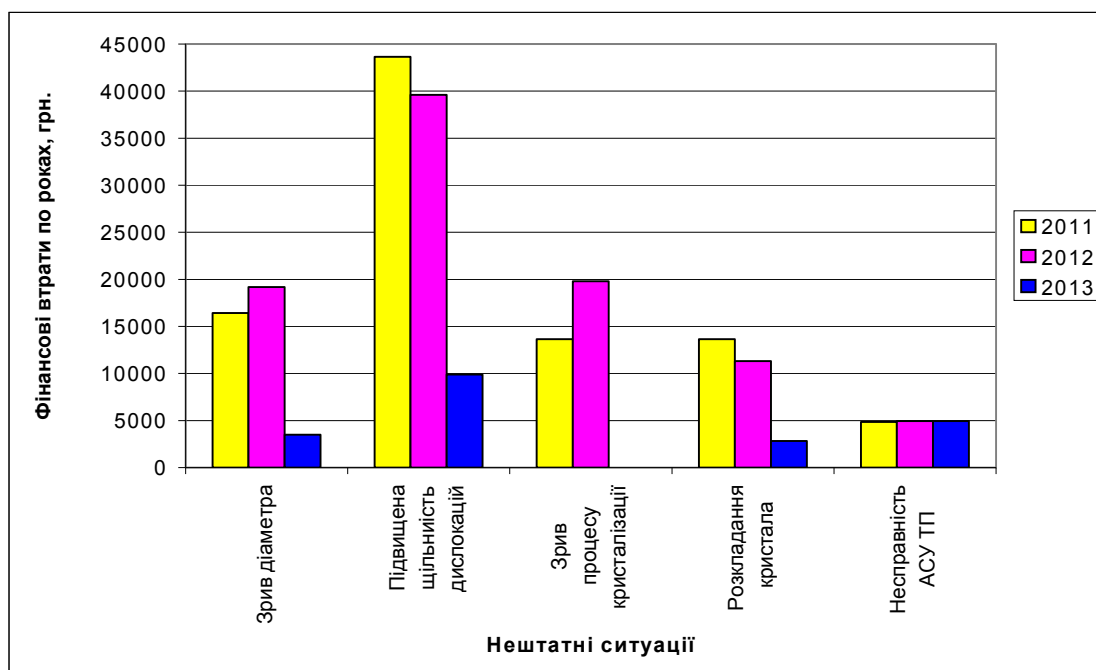


Рисунок 15 – Діаграма втрат від появи нештатних ситуацій у виробництві арсеніду галію

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана важлива науково-прикладна проблема створення теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу вирощування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки для забезпечення підвищення якості продукції.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у такому:

1. Уперше запропоновано теоретико-множинну модель інформаційно-аналітичної системи керування якістю процесу вирощування монокристалів, яка містить у своєму складі модель якості продукту, модель якості виробничого процесу, функціональну підсистему оптимізації параметрів оснастки на стадії технологічної підготовки виробництва, функціональну підсистему моніторингу процесу вирощування, функціональну підсистему підтримки прийняття оперативних рішень щодо корекції режиму вирощування, відображення множини параметрів якості процесу на множини параметрів якості продукту і відображення впливу множини рішень функціональних задач на якість виробничого процесу, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до підвищення якості виробничого процесу та кінцевого продукту.

2. Удосконалено метод побудови прикладної інформаційної технології підтримки прийняття рішень з діагностики та корекції складного виробничого процесу, шляхом додавання етапу формування комплексу моделей фізичних явищ технологічного процесу, що дозволяє здійснити моніторинг важливих параметрів процесу, які недоступні для прямих вимірювань і підвищити ефективність керування якістю.

3. Розроблено методи, моделі та інформаційну технологію моніторингу температурних полів у процесі вирощування монокристалів, а саме:

- удосконалено нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля, яка, на відміну від відомих, ураховує конвективні теплові потоки, швидкість витягування, стадію процесу витягування, що дозволяє підвищити точність результатів непрямих вимірювань параметрів температурного поля і створити нову інформаційну технологію отримання важливих даних для оцінки якості монокристалів напівпровідників що виготовляються;

- удосконалено метод моделювання процесу кристалізації шляхом застосування нечіткого клітинного автомату на етапі відтворення форми монокристалу, що дозволяє спростити обчислювальний процес моделювання порівняно з відомими методами, отримувати уточнені значення коефіцієнта теплопровідності в проблемній зоні фронту кристалізації та здійснювати інформаційну технологію моніторингу процесу вирощування монокристалів;

- уперше запропоновано метод настроювання параметрів нечіткого клітинного автомата, оснований на пошуку оптимальних значень коефіцієнтів у зваженій t-конормі Лукасевича, що дозволяє адекватно відобразити динаміку складного процесу вирощування монокристалів і реалізувати необхідну обробку даних для моніторингу цього процесу;

- розроблено і реалізовано у рамках підсистеми «Моніторинг» інформаційну технологію моніторингу процесу вирощування монокристалів. Підсистема забезпечує надання необхідної оператору візуальної інформації щодо зміни температурних полів розплаву і злитка.

4. Розроблено методи, моделі та інформаційну технологію підтримки задачі оптимізації теплових умов охолодження злитків в ростовій установці на стадії технологічної підготовки виробництва, а саме:

- удосконалено метод розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва, який містить математичну модель оптимізації зі складним критерієм і використовує еволюційну процедуру оптимізаційних розрахунків, що дозволяє здійснити інформаційну підтримку процесу технологічної підготовки виробництва і підвищити якість кінцевого продукту;
- розроблено і реалізовано у рамках підсистеми «Екран» інформаційну технологію оптимізації умов охолодження злитка у процесі вирощування шляхом вибору оптимальній конфігурації теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва. Це забезпечує зниження ймовірності виникнення підвищеної щільності дислокацій в монокристалі. Показано ефективність підсистеми на прикладі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана для установки "Арсенід-1М".

5. Розроблено методи, моделі та інформаційну технологію підтримки прийняття оперативних рішень в ході процесу вирощування монокристалів, а саме:

- набула подальшого розвитку модель підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень для корекції процесу вирощування монокристалів шляхом уведення бази математичних моделей для розв'язання задач моніторингу температурних полів, інтерфейсів з АСУ ТП і з підсистемою ТЕП АСУ підприємства, що дозволяє приймати оперативні рішення щодо корекції процесу вирощування з урахуванням як фізичних, так і економічних показників;
- набула подальшого розвитку модель пошуку рішень для оператора у вигляді рекомендацій, шляхом уведення нечіткого представлення ситуацій, яке враховує тренди параметрів процесу вирощування, що дозволяє гнучко реагувати на виникнення проблемних ситуацій та приймати адекватні рішення щодо корекції процесу вирощування монокристалів;
- набула подальшого розвитку нечітка модель розпізнавання ситуацій у процесі вирощування монокристалів, шляхом оцінки ступеню критичності ситуації, і в якій для настроювання використовуються індивідуальні коефіцієнти значущості елементарних посилок кожного правила, що дозволяє спростити процес навчання та донавчання моделі при появі нових проблемних ситуацій;
- розроблено і реалізовано у рамках підсистеми «Порадник» інформаційну технологію підтримки прийняття оперативних рішень у процесі вирощування. Підсистема забезпечує обробку даних для підтримки процесу розпізнавання ситуацій і видачу рекомендацій щодо корекції режиму процесу вирощування.

6. Розроблено і реалізовано у рамках інформаційно-аналітичної системи інтегровану інформаційну технологію управління якістю процесу вирощування монокристалів. До складу системи у вигляді функціональних підсистем увійшли підсистеми «Моніторинг», «Порадник» і «Екран».

7. Упровадження інформаційно-аналітичної системи управління якістю на ПП «Галар» (м. Світловодськ) дозволило отримати річний економічний ефект 85,4 тис. грн. за рахунок зменшення витрат електроенергії, матеріальних ресурсів, трудовитрат і втрат прибутку на одиницю готової продукції при зниженні кількості нештатних ситуацій і відповідного зниження частки бракованої продукції у виробництві злитків арсе-

ніду галію, завдяки використанню підсистем «Моніторинг», «Порадник» і «Екран», а також зменшення витрат на технічну підготовку виробництва злитків арсеніду галію за рахунок виключення експериментальних робіт на ростових установках при підборі розмірів і положення теплового екрана, завдяки використанню підсистеми «Екран».

8. Методи, моделі та алгоритми моніторингу процесу нормалізації залізничного лиття впроваджені в цеху обробки і термообробки ПАТ «КСЗ». Програмний модуль, вбудований в SCADA-систему контролю режиму печі нормалізації забезпечує: контроль температурного режиму печі шляхом фіксації показань термомпар в двох теплових зонах; контроль температури навколишнього середовища; контроль атмосферного тиску та вологості; контроль стану вхідний і вихідний штор; корекцію уставок співвідношення «газ-повітря» в контурі управління пальниками печі з урахуванням значень вищенаведених параметрів.

У період експлуатації програмного модуля за рахунок підвищення ефективності регулювання теплового режиму і поліпшення рівномірності нагрівання деталей середній рівень бальності зерна по ОСТ-32-183-2001 стабільно склав 9...10 проти 8...9 у попередні періоди експлуатації печі. Таким чином, застосування програмного модуля, що реалізує моніторинг і корекцію процесу нормалізації дозволило підвищити якість виливків.

9. Отримані в роботі результати можуть бути рекомендовані для застосування при розвитку науково-методичних основ автоматизованого розв'язання завдань управління якістю складних виробничих процесів у багатьох галузях народного господарства.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Модели и информационные технологии мониторинга и оптимизации процесса выращивания монокристаллов полупроводников: Монография / Левыкин В. М., Шевченко И. В., Оксанич И. Г. – Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2014. – 216 с.
2. Шевченко И. В. Информационные технологии управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников / И.В. Шевченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 3/2 (69). – С. 52–56. (BASE, Ulrichsweb, Driver, Index Copernicus, WorldCat, DOAJ, EBSCO, FreeFullPDF, eLIBRARY, Bielefeld Academic Search Engine, РІНЦ, WorldCat).
3. Шевченко И. В. Информационная технология оптимизации геометрических параметров тепловых узлов установок для выращивания монокристаллов / И.В. Шевченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2013. – Випуск 4 (81). – С. 114–120. –(Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
4. Левыкин В. М. Модель структуры информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников / В. М. Левыкин, И. В. Шевченко // Вісник Академії митної служби України. – №2. – 2014. – С. 63–71.
5. Левыкин В. М. Модель специализированной системы поддержки принятия решений для коррекции процесса выращивания монокристаллов / В. М. Левыкин, И.В. Шевченко. – Управляющие системы и машины. – №2. – 2014. – С. 32–38. – (РІНЦ, Google Scholar).

6. Левыкин В. М. Метод построения информационной технологии диагностики состояния сложного технологического процесса / В. М. Левыкин, И. В. Шевченко // Управляющие системы и машины. – №3. – 2014. – С. 33–38. – (РИНЦ, Google Scholar).
7. Щербак С. С. Информационная технология разработки специализированной СППР оперативного управления производством полупроводниковых изделий / С. С. Щербак, И. В. Шевченко, В. В. Завгородний, В. Ф. Шостак // Вісник Академії митної служби України. Серія «Технічні науки». – Академія митної служби України, 2013. – Випуск 1 (49). – С. 74–85. – (Web of science, РИНЦ)
8. Оксанич А. П. Метод и нейросетевая модель расчёта температурного поля расплава в процессе выращивания методом Чохральского / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, Ю. А. Краснопольская // Інформаційні системи і технології. Математичне моделювання. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – № 1(72). Частина 1. – С. 54–60. – (Ulrich' s Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
9. Краснопольская Ю. А. Нейросетевая модель расчёта температурного поля слитка в процессе выращивания монокристаллов методом Чохральского / Ю. А. Краснопольская, И. В. Шевченко, Е. А. Глушков, М. В. Репин // Нові технології. Науковий вісник ІЕНТ. – 2009. – № 2(24). – С. 3–9.
10. Шевченко И.В. Моделирование процесса выращивания полупроводниковых материалов на основе нейронной сети и нечёткого клеточного автомата / И.В. Шевченко, Ю.А. Краснопольская, Е.А. Глушков, С.Л. Шкатуло // Нові технології. Науковий вісник ІЕНТ. – 2010. – № 1(27). – С. 169–177.
11. Оксанич А. П. Виртуальный датчик для мониторинга температуры фонового нагревателя в тепловом узле установки для выращивания монокристаллов арсенида галлия / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, Ю. А. Краснопольская // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики : Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник / Харьковский Национальный университет радиоэлектроники. – 2011. – Вып. 156. – С. 16–26.
12. Левыкин В. М. Информационная технология мониторинга температурных полей в процессе выращивания монокристаллов / В. М. Левыкин, И. В. Шевченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 1 (46). – С. 133–138. – (РИНЦ, Google Scholar).
13. Оксанич А. П. Математическая модель геометрии теплового узла установки для выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского / А. П. Оксанич, П. А. Хозя, И. В. Шевченко, В. А. Тербан // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков, 2008. – Т. 7. – № 4. – С. 351–355.
14. Оксанич А. П. Численно-аналитический подход к моделированию тепловых явлений в процессе выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского / А. П. Оксанич, П. А. Хозя, И. В. Шевченко // Складні системи і процеси. – 2008. – № 2. – С. 14–18..
15. Кротюк И. Г. Формирование многоуровневых оценок качества производственных процессов / И. Г. Кротюк, И. В. Шевченко // Нові технології. Науковий вісник КУЕІТУ. – № 3 (13). – 2006. – С. 89–95.

16. Шевченко И. В. Эвристический метод кластеризации в метрическом пространстве признаков / И. В. Шевченко, А. О. Минашкин, Л. Н. Осипчук // Нові технології. – 2009. – № 4 (26). – С. 101–106.
17. Шевченко И. В. Метод кластеризации данных, основанный на параллельном генетическом алгоритме / И. В. Шевченко, Е. С. Король, И. В. Тимошук // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Випуск 5 (88). – С. 56–61. – (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
18. Шевченко И. В. Диагностика неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников / И. В. Шевченко, Н. Н. Дымченко, С. А. Грицаков // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 34–43. – (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
19. Шевченко И. В. Программное обеспечение для расчёта температурного поля в слитках GaAs, выращиваемых по ЛЕС-технологии / И. В. Шевченко, Ю. А. Краснопольская, С. Л. Шкатуло // Інформаційно-управляючі системи та технології. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – № 4(69), частина 1. – С. 38–42. – (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
20. Шевченко И. В. Модель взаимодействия интеллектуального агента и среды как инструмент мониторинга сложного технико-экономического процесса / И. В. Шевченко, И. С. Шаповал, Т. Д. Стаценко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Випуск 5 (88). – С. 131–135. – (Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Inspec).
21. Шевченко И. В. Использование знаний о предметной области при формировании и настройке нейронной сети для медицинской диагностики / И. В. Шевченко, Ю. В. Удовиченко // Нові технології. – 2009. – № 4 (26). – С. 112–119.
22. Мурашко Ф. Г. Извлечение знаний из баз данных при помощи нейронной сети и нечёткого интерпретатора / Ф. Г. Мурашко, И. В. Шевченко, С. А. Лабзов // Нові технології. – 2008. – №4 (22). – С. 41–45.
23. Шевченко И. В. Представление и получение знаний в инструментальной системе нечёткого моделирования / И. В. Шевченко, Ю. О. Стрелец, В. Е. Краскевич // Нові технології : науковий вісник КУЕІТУ. – № 1–2 (15–16). – 2007. – С. 74–78.
24. Оксанич А. П. Прогнозирование концентрации углерода в слитках при выращивании монокристаллов кремния для солнечной энергетики / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, С. А. Волохов // Радиоэлектроника и информатика. – 2009. – № 3 (46). – С. 20–24.
25. Шевченко И. В. Методы получения контуров на цифровых растровых изображениях с нечётким отображением дислокаций в пластинах GaAs / И. В. Шевченко, А. Н. Самойлов // Комп'ютерно-інтегровані технології : освіта, наука, виробництво. – Луцьк, 2013. – № 12. – С. 63–69. – (РІНЦ).
26. Шевченко И. В. Оптимизация конфигурации теплового экрана ростовой установки по критерию минимума неравномерности осевых температурных градиентов / И.

- В. Шевченко, А. П. Оксанич, С. А. Волохов // Системные технологии : Региональный межвузовский сборник научных работ. – Днепропетровск, 2010. – № 1 (66). – С. 3–17.
27. Оксанич А. П. Моделирование тепловых явлений в процессе выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, П. А. Хозя // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития : Сборник научных трудов III Международного радиоэлектронного форума (МРФ–2008). – Т 3. – Харьков: ХНУРЭ, 2008. – С. 120–123.
28. Шевченко И. В. Адаптивний алгоритм випадкового пошуку глобальних екстремумів багатовимірних функцій / И. В. Шевченко, С. Л. Шкатуло // Інформаційні технології в економічних та технічних системах : тези доповідей на III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів (ІТЕТС-2009). – Кременчук, 2009. – С. 122–123.
29. Шевченко И. В. Оптимизация геометрических параметров теплового экрана ростовой установки // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології (МЕТІТ-4) : збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2010. – С. 230–232.
30. Оксанич А. П. Усовершенствование математической модели взаимодействия тепловых потоков излучения слитка и экрана в установке для выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, В. А. Тербан // Функциональная компонентная база микро-, опто- и наноэлектроники : сборник научных трудов III Международной научной конференции. – Харьков–Кацивели, 2010. – С. 201–204.
31. Шевченко И. В. Программное обеспечение для расчёта температурного поля в слитке монокристалла арсенида галлия, выращиваемого методом Чохральского по ЛЕС-технологии / И. В. Шевченко, Ю. А. Краснопольская // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка : збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2011. – С. 72–74.
32. Оксанич А. П. Влияние температуры фонового нагревателя на температурные градиенты и уровень дислокаций в слитке ПИН GaAs, выращиваемого по ЛЕС-технологии / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, В. А. Тербан // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка : збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2011. – С. 91–93.
33. Оксанич А. П. Интеллектуальные системы мониторинга процесса выращивания монокристаллов / А. П. Оксанич, И. В. Шевченко, В. А. Тербан : збірник матеріалів V Всеукраїнської наукової конференції з фізики напівпровідників. – Ужгород, 2011. – С. 437–438.
34. Шевченко И. В. Мультиагентная интеллектуальная система для мониторинга температурного поля в процессе выращивания монокристаллов // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів : матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. – Кременчук, 2011. – С. 47–49.
35. Шевченко И. В. Концепция построения автоматизированной системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского // Системний аналіз. Інформатика. Керування : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя, 2012. – С. 303–304.

36. Шевченко И.В. Информационная технология мониторинга температурных полей в тепловом узле ростовой установки // Информационные системы и технологи (ИСТ–2012) : материалы I Международной научно-технической конференции посвященной 75-летию В. В. Свиридова. – Харьков, 2012. – С. 82.
37. Шевченко И. В. Информационная технология оптимизации геометрических параметров тепловых экранов установок для выращивания монокристаллов арсенида галлия // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Кременчук, 2012. – С. 93–95.
38. Шевченко И. В. Построение системы диагностики состояний процесса выращивания монокристаллов GaAs // Системний аналіз. Інформатика. Керування : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя, 2013. – С. 272–273.
39. Шевченко И. В. Математическая модель для определения температуры фонового нагревателя при выращивании монокристаллов арсенида галлия по ЛЕС-технологии / И. В. Шевченко, Ю. А. Краснопольская // Системний аналіз. Інформатика. Керування : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. – Запоріжжя, 2013. – С. 276–277.
40. Шевченко И. В. Адаптация весовых коэффициентов нечетких правил при помощи нейронной сети / И. В. Шевченко, Н. В. Рылова // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка : тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2013. – С. 243–244.
41. Шевченко И. В. Модель подсистемы «Советчик мастера» для процесса выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка : тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2013. – С. 249–250.
42. Шевченко И. В. Структура автоматизированной системы управления качеством процесса выращивания монокристаллов полупроводников // Информационные системы и технологи (ИСТ–2013) : материалы II Международной научно-технической конференции. – Харьков, 2013. – С. 73–75.
43. Шевченко И. В. Обобщенная структура многокомпонентной системы мониторинга процесса выращивания монокристаллов // Розвиток наукових досліджень 2013 : матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. – Т. 5. – Полтава, 2013. – С. 38–40.
44. Шевченко И. В. Структура информационной технологии разработки специализированных СППР оперативного управления производством полупроводниковых изделий / И. В. Шевченко, С. С. Щербак // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів: матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції. – Кременчук, 2013. – С. 50–52.
45. Шевченко И. В. Определение степени критичности ситуаций в процессе выращивания монокристаллов // IT-Перспектива : матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Кременчук, 2014. – С. 16–18.
46. Шевченко И. В. Методика построения моделей диагностики ситуаций в сложном технологическом процессе / И. В. Шевченко, С. А. Сергиенко // Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка : тези доповідей III Міжнародної

науково-практичної конференції. – Кременчук, 2014. – С. 93–95.

47. Шевченко И. В. Проблемы мониторинга сложных технологических процессов и систем // Актуальні питання та організаційно-правові основи міжнародного співробітництва у сфері високих технологій : Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, 2014. – С. 81–84.

48. Шевченко И. В. Адаптивная нечеткая модель распознавания неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников // Інформаційні системи та технології (ІСТ-2014) : матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції. – Харків, 2014. – С. 91–92.

49. Шевченко И. В. Модель взаимодействия интеллектуального агента и окружающей среды / И. В. Шевченко, И. С. Шаповал // «Інновації і Web» (InWeb-2014) в рамках I Міжнародного форуму IT-Тренди: великі дані, штучний інтелект, соціальні медіа : збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. – Кременчук, 2014. – С. 11–13.

АНОТАЦІЯ

Шевченко І. В. Методи, моделі та інформаційні технології моніторингу і оптимізації процесу вирощування монокристалів напівпровідників. – На правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, Харків, 2015.

Сформульовано і розв'язано актуальну науково-прикладну проблему створення теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу вирощування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки для забезпечення підвищення якості продукції.

Запропоновано модель інформаційно-аналітичної системи управління якістю, модель підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень для корекції процесу вирощування монокристалів, метод побудови прикладної інформаційної технології діагностики стану складного виробничого процесу, модель підсистеми прийняття оперативних рішень. Для інформаційного забезпечення моніторингу процесу вирощування запропоновано нейромережеву модель розрахунку температурного поля в розплаві та нечіткий навчений клітинний автомат. Розроблено інформаційну технологію моніторингу та візуалізації температурного поля в процесі вирощування монокристалів.

Для підтримки процесу оптимізації теплових умов охолодження злитка запропоновано математичні моделі та метод розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана. Розроблено інформаційну технологію оптимізації конфігурації теплового екрана ростовій установки для вирощування монокристалів методом Чохральського.

Удосконалено нечітку модель розпізнавання проблемних ситуацій, уведено оцінювання ступеня критичності ситуації, розроблено базу знань для діагностики проблемних ситуацій і надання рекомендацій щодо корекції режиму процесу вирощування монокристалів, яка включає правила реагування на виникнення однієї або двох критичних ситуацій. Розроблено інформаційну технологію підтримки прийняття опе-

ративних рішень у ході процесу вирощування монокристалів, а також інтегровану інформаційну технологію управління якістю процесу вирощування монокристалів.

Розглянуто питання практичної реалізації запропонованих методів і моделей, доведено їх достовірність і ефективність.

Ключові слова: моделі, методи, інформаційні технології, управління якістю, моніторинг, процеси вирощування монокристалів, діагностика ситуацій, підтримка прийняття рішень, інформаційно-аналітична система.

АННОТАЦІЯ

Шевченко И. В. Методы, модели и информационные технологии мониторинга и оптимизации процесса выращивания монокристаллов полупроводников. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы создания теоретических и прикладных основ информационной поддержки процесса выращивания монокристаллов полупроводников и процессов оптимизации параметров технологической оснастки для обеспечения повышения качества продукции.

Первый раздел посвящен анализу концепций и проблем управления качеством и мониторинга сложных технологических процессов и, в частности, процесса выращивания монокристаллов полупроводников. Показано, что дальнейшего повышения эффективности производства монокристаллов можно достичь путем разработки и внедрения информационно-аналитической системы управления качеством процесса выращивания (ИАС УКПВ), охватывающей технологическую подготовку производства, технологический процесс и стадию контроля готового продукта.

Второй раздел посвящен концептуальным вопросам создания ИАС УКПВ. Предложена теоретико-множественная модель ИАС УКПВ, модель подсистемы поддержки принятия оперативных решений для коррекции процесса выращивания монокристаллов, метод построения прикладной информационной технологии диагностики состояния сложного производственного процесса. Важной особенностью разработанных моделей является их интегрированное представление в рамках ИАС УКПВ для решения задач управления качеством.

Третий раздел посвящен разработке информационной технологии поддержки задач мониторинга тепловых условий выращивания монокристаллов. Основным элементом информационной технологии является нейросетевая модель для косвенного мониторинга температурного поля в расплаве, которая позволяет учесть конвективные тепловые потоки, скорость вытягивания, стадию процесса, что позволяет проводить косвенные измерения параметров температурного поля в реальном времени процесса выращивания монокристалла. Усовершенствован метод моделирования процесса кристаллизации, в котором используется нечеткий обучаемый клеточный автомат. Предложен метод настройки параметров нечеткого клеточного автомата, основанный на поиске оптимальных значений коэффициентов во взвешенной t-норме Лукасевича. Разработана информационная технология мониторинга температурного поля в процес-

се выращивания монокристаллов арсенида галлия.

В четвертом разделе решена задача информационной поддержки задачи оптимизации условий остывания слитков в процессе выращивания. Разработаны модели и метод оптимизации тепловых условий остывания слитка путем выбора геометрических параметров оснастки теплового узла. Разработана информационная технология автоматизированного решения задачи оптимизации конфигурации теплового экрана ростовой установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского.

В пятом разделе разработаны модели и информационная технология поддержки принятия оперативных решений в процессе выращивания. Усовершенствована нечеткая модель распознавания ситуаций, введено оценивание степени критичности ситуации, разработана база знаний для диагностики неблагоприятных ситуаций и выдачи рекомендаций по коррекции режима процесса выращивания монокристаллов, включающая правила реагирования на одновременное возникновение двух критических ситуаций одновременно. Разработана информационная технология поддержки принятия оперативных решений в ходе процесса выращивания монокристаллов и интегрированная информационная технология управления качеством процесса выращивания монокристаллов.

Шестой раздел посвящен практической реализации ИАС УКПВ. Разработаны подсистема «Мониторинг», реализующая функции косвенного измерения и визуализации температурных полей расплава и слитка в процессе выращивания и информационную поддержку действий оператора ростовой установки, подсистема «Советчик», реализующая диагностику неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов и поддержку принятия оперативных решений по коррекции режима выращивания, подсистема «Экран», реализующая информационную поддержку задачи оптимизации размеров и положения теплового экрана ростовой установки в процессе технологической подготовки производства монокристаллов арсенида галлия.

Анализ результатов внедрения ИАС УКПВ показал снижение убытков за счет уменьшения расхода электроэнергии, материальных ресурсов, трудозатрат и потерь прибыли на единицу готовой продукции при снижении количества нештатных ситуаций и соответствующего снижения доли бракованной продукции в производстве слитков арсенида галлия, а также уменьшение затрат на техническую подготовку производства слитков арсенида галлия за счет исключения экспериментальных работ на ростовых установках при подборе размеров и положения теплового экрана.

Ключевые слова: модели, методы, информационные технологии, управление качеством, мониторинг, процессы выращивания монокристаллов, диагностика ситуаций, поддержка принятия решений, информационно-аналитическая система.

ABSTRACT

Shevchenko I.V. Methods, models and information technologies for monitoring and optimizing the semiconductors single-crystal growth. – Manuscript.

Thesis for a Doctorate degree in Technical Sciences. Specialty 05.13.06 – Information Technologies. – Kharkiv National University of Radio Electronics of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2015.

An actual scientific and applied problem of theory development for production efficiency and product quality improvement with methods, models and information technologies for monitoring and optimizing the single-crystal growth has been formulated.

The model of informational analytical system and method of application information technology design for diagnosing the condition of a complex technological process are suggested. The information technology for monitoring the temperature field during single-crystals growing, and information technology for optimizing the temperature conditions of ingot cooling-down have been developed.

The fuzzy model of adverse situations recognition has been improved; the evaluation of situation criticality degree has been introduced. The knowledge base has been developed for the adverse situations diagnosis and recommendations on single-crystals growth conditions correction. The information technology has been developed to support operational decision-making during single-crystals growing. The information technology for single-crystals growth quality control has been developed too.

The problems of proposed methods and models implementation are discussed; their reliability and efficiency are proved.

Key words: models, methods, information technology, quality control, monitoring, single-crystals growth, situations diagnosis, decision-making support, informational analytical system.