

**ВІДГУК**  
офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Шевченка Ігоря Васильовича  
**«Методи, моделі та інформаційні технології моніторингу і оптимізації**  
**процесу вирошування монокристалів напівпровідників»,**  
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології

### **1. Актуальність теми дослідження**

Пошук нових стратегій інформаційної підтримки виробництва, методів вилучення необхідної для моніторингу інформації з урахуванням особливостей конкретних процесів і невизначеності окремих взаємозв'язків між технологічними параметрами стає все більш актуальним. Аналіз проблем моніторингу складних виробничих процесів свідчить про те, що виробничики і дослідники часто стикаються з неможливістю отримання необхідної для контролю інформації при використанні прямих методів вимірювань.

Типовим представником складного виробничого процесу, в якому необхідний безперервний моніторинг ключових для якості продукту параметрів, є процес вирошування монокристалів напівпровідників. Крім того, режим процесу вирошування монокристалу, а отже і якість продукту істотно залежить від технологічної оснастки, параметри якої індивідуально підбираються для різних типорозмірів виробів.

Автор пропонує міждисциплінарний підхід до створення систем управління якістю – поєднання систем непрямого моніторингу на базі феноменологічних моделей фізичних процесів та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, що дозволяє отримати ефективні методи моніторингу та управління якістю в складних виробничих процесах.

Використання системного підходу до розглянутої проблеми дозволяє розробити методи для цілого класу однорідних задач. Зі сказаного випливає, що



розробка ефективних інформаційних технологій, методів, моделей та інструментальних засобів моніторингу і супроводу процесу вирошування монокристалів напівпровідників є актуальною задачею і її вирішення може суттєво підвищити стабільність якості наукової продукції і дати значний економічний ефект.

## **2. Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому**

Дисертаційна робота є завершеною працею і складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

**В першому розділі** роботи автором проведено аналіз сучасного стану проблем моніторингу складних виробничих процесів, аналіз існуючих моделей та інструментальних засобів моніторингу та управління якістю процесу вирошування монокристалів, аналіз технологій підтримки прийняття рішень на основі ситуаційного підходу, а також аналіз можливих підходів до реалізації функцій моніторингу і оптимізації процесу вирошування монокристалів напівпровідників.

На підставі результатів аналізу автором визначено мету дисертаційної роботи, а саме – розв’язання актуальної науково-прикладної проблеми створення теоретичних та прикладних основ інформаційної підтримки процесу вирошування монокристалів напівпровідників і процесів оптимізації параметрів технологічної оснастки для забезпечення підвищення якості продукції. Відповідно до мети сформульовані задачі дослідження.

**Другій розділ** дисертації присвячено розробці теоретичних основ побудови інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирошування монокристалів. Запропонована концепція управління якістю виробничого процесу заснована на інформаційній підтримці процесів технологічної підготовки виробництва та моніторингу процесу вирошування.

Формалізовано постановку задачі управління якістю складного виробничого процесу, в якої критерієм якості управління обрано ймовірність

пропуску критичних ситуацій в ході реалізації процесу.

Розроблена теоретико-множинна модель інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирошування.

Запропонована концепція моніторингу температурних полів у процесі вирошування монокристалів, яка передбачає непряме вимірювання температури нагрівачів, що знаходяться в розплаві, обчислення параметрів температурного поля в розплаві та зливку і візуалізацію результатів вимірювань і обчислень на моніторі оператора. Реалізація цієї концепції дозволила забезпечити інформаційна підтримка дій оператора на новому рівні.

Удосконалено метод побудови прикладної інформаційної технології підтримки прийняття рішень з діагностики та корекції складного технологічного процесу шляхом додавання етапу формування комплексу моделей фізичних явищ технологічного процесу.

**В третьому розділі** автором розроблені методи, моделі та інформаційна технологія моніторингу температурних полів у процесі вирошування монокристалів. Показано, що дії оператора щодо підвищення якості продукції повинні враховувати розподіл температури у злитку та підкрystalальної області розплаву. Для цього розроблені нейромережева модель для непрямого моніторингу температурного поля, модель для непрямих вимірювань температури фонового нагрівача, чисельно-аналітична модель розрахунку температурного поля, метод моделювання явища кристалізації в процесі моніторингу, в якому застосований нечіткий клітинний автомат.

Розроблено моделі застосовані у інформаційній технології моніторингу температурного поля в процесі вирошування монокристалів арсеніду галію.

**У четвертому розділі** розроблено математичну модель зв'язку між геометричними параметрами елементів теплового вузла і тепловими потоками випромінювання, яка дозволила описати теплову взаємодію випромінювання між поверхнею злитка і поверхнею екрану кусочно-циліндричної форми, що дало можливість розраховувати температуру на поверхні злитка та оптимізувати форму екрану з урахуванням заданого критерію.

Удосконалено математичну модель задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрану за рахунок використання складового критерію оптимізації.

**П'ятий розділ** присвячено розробці моделей, алгоритмів та інформаційних технологій підтримки прийняття оперативних рішень та управління якістю процесу вирошування. Розглянуто питання розробки теоретичних основ розпізнавання проблемних ситуацій та уникнення їх перетворення на нештатні ситуації.

Розроблено ієрархічну базу знань для діагностики несприятливих ситуацій і видачі рекомендацій щодо корекції теплового режиму процесу вирошування монокристалів. Проведено кластеризацію простору ознак і розроблено моделі та процедури перетворення значень параметрів процесу вирошування в значення ознак ситуацій.

Запропоновано нечітку модель розпізнавання ситуацій у процесі вирошування монокристалів, в якій оцінюється ступінь критичності ситуації, а для настройки використовуються індивідуальні коефіцієнти значущості елементарних посилок кожного правила. Розроблено алгоритми розв'язання задачі корекції бази знань, вирішення задачі розпізнавання ситуацій і видачі рекомендацій щодо корекції теплових умов вирошування.

Розроблено інформаційну технологію підтримки прийняття оперативних рішень у ході процесу вирошування монокристалів та інтегровану інформаційну технологію управління якістю процесу вирошування монокристалів, яка включає інформаційну технологію моніторингу теплових полів, технологію моніторингу підтримки прийняття оперативних рішень і інформаційну технологію оптимізації теплових умов охолодження злитка.

**В шостому** розділі розглянуто питання практичної реалізації моделей, методів і інформаційних технологій, які розроблені в попередніх розділах дисертації. Наведено опис функціональних структур підсистем «Екран», «Моніторинг» і «Порадник», які реалізують інформаційні технології оптимізації умов охолодження злитка, моніторингу температурних полів, та підтримки

прийняття рішень щодо корекції теплових умов вирощування монокристалів. Показано структуру баз даних, схеми алгоритмів функціонування та інтерфейси програмних модулів.

Доведено ефективність запропонованих методів і моделей за результатами порівняльних досліджень залишкових напружень і рівня дислокаций в злитках арсеніду галію при використанні інформаційно-аналітичної системи управління якістю процесу вирощування, в яку увійшли підсистеми «Екран», «Моніторинг», «Порадник». Показано, що після впровадження вказаних підсистем підвищилася якість продукції за рахунок зниження середнього рівня щільності дислокаций в злитках арсеніду галію. Наведено методику оцінки економічного ефекту от впровадження інформаційно-аналітичної системи управління якістю на підприємстві "Галар".

У додатках наводяться результати експериментальних досліджень математичної моделі непрямого вимірю температури фонового нагрівача, методика використання цієї моделі, та документи про впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **3. Основні результати дослідження**

В дисертаційній роботі Шевченком І.В. особисто були отримані такі основні результати:

1. Уперше запропоновано:

1.1. Теоретико-множинну модель інформаційно-аналітичної системи керування якістю процесу вирощування монокристалів, яка, на відміну від відомих, містить у своєму складі ряд моделей якості та моделей, які відображають сутність технологічного процесу, що дозволило реалізувати комплексний підхід до підвищення якості технологічного процесу та кінцевого продукту.

1.2. Метод настроювання параметрів нечіткого клітинного автомата, що моделює процес вирощування монокристалу, який основано на пошуку

оптимальних значень вагових коефіцієнтів у зваженій  $t$ -конормі Лукасевича, що дозволило адекватно відобразити динаміку складного процесу вирошування 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 технологічного процесу, шляхом формування комплексу моделей моніторингу технологічного процесу, заснованого на розкритті фізичного уявлення процесу, що дозволило здійснити контроль важливих параметрів процесу, які недоступні для прямих вимірювань і тим самим підвищити ефективність керування якістю.

2.2. Метод розв'язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва, шляхом побудови складного критерію якості з врахуванням обмежень, що дозволило забезпечити інформаційну підтримку процесу технологічної підготовки виробництва і підвищити якість кінцевого продукту.

2.3. Нейромережеву модель для непрямого моніторингу температурного поля, що дозволило підвищити точність результатів непрямих вимірювань параметрів температурного поля для отримання важливих даних для оцінки якості процесу вирошування монокристалів напівпровідників.

2.4. Метод моделювання процесу кристалізації для цілей моніторингу шляхом застосування нечіткого клітинного автомatu, що дозволило визначати значення коефіцієнта тепlopровідності в розмитій зоні фронту кристалізації та забезпечило актуалізацію даних, необхідних для моніторингу процесу вирошування монокристалів.

3. Набули подальшого розвитку:

3.1. Модель підсистеми підтримки прийняття оперативних рішень для корекції процесу вирошування монокристалів шляхом уведення бази математичних моделей для непрямого моніторингу та аналізу температурних полів розплаву та злитка, а також інтерфейсів для зв'язку із АСУТП

вирошування монокристалів і з підсистемою техніко-економічного планування АСУ підприємства, що дозволило приймати оперативні рішення в ході процесу вирошування з урахуванням як фізичних, так і економічних показників.

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

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

#### **4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій**

Належний ступінь обґрунтованості досягнуто за рахунок використання апробованих математичних апаратів теорії системного аналізу, теорії моделювання, теорії оптимізації, теорії множин, теорії ухвалення рішень, теорії нейронних мереж, теорії нечітких множин. Моделі, алгоритми і програмні засоби, запропоновані автором, базуються на відомих теоретичних положеннях і перевірені експериментально, що підтверджено актами про впровадження отриманих результатів.

Автореферат достатньо повно відображає основний зміст дисертаційної роботи.

Результати кандидатської дисертації не включені до результатів докторської дисертаційної роботи.

## **5. Достовірність результатів досліджень**

Достовірність висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, забезпечена теоретичною обґрунтованістю вихідних положень, кількісним та якісним дослідженням фактичного матеріалу, який автор отримав у процесі дослідження.

Всі основні результати дисертаційного дослідження підтверджуються комп'ютерним моделюванням та адекватністю математичних викладок відповідним експериментам, що підтверджує їх достовірність.

## **6. Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів**

Дисертаційна робота Шевченка І.В. представляє собою закінчене одноосібне дослідження, яке містить сукупність важливих наукових та практичних результатів, що свідчить про особистий внесок автора в науку.

В дисертаційній роботі отримані результати, які є теоретичною базою для подальшого розвитку наукових основ створення та застосування інформаційних технологій та інформаційних систем для автоматизованої переробки інформації з метою моніторингу та оптимізації складних виробничих процесів.

Розроблено систему підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності для системи управління якістю високотехнологічного продукту, що є значним внеском в розвиток інтелектуальних інформаційних технологій.

## **7. Практична цінність роботи**

Упровадження інформаційно-аналітичної системи управління якістю на ПП «Галар» (м. Світловодськ) дозволило отримати суттєвий економічний ефект 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 арсеніду 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». Річний економічний ефект від впровадження перевищує 85 тис. грн.

Моделі та алгоритми моніторингу процесу нормалізації залізничного ліття впроваджені в ПАТ «КСЗ» (м. Кременчук). Програмний модуль, вбудований в SCADA-систему контролю режиму печі нормалізації забезпечує: контроль температурного режиму печі, контроль температури навколошнього середовища; контроль атмосферного тиску та вологості; контроль стану устаткування; корекцію уставок співвідношення «газ-повітря» в контурі управління пальниками печі з урахуванням значень вищеперелічених параметрів. Застосування програмного модуля, що реалізує моніторинг і корекцію процесу нормалізації дозволило підвищити якість виливків.

У додатках є відповідні акти про впровадження.

Вважаю, що отримані в роботі результати знайдуть своє застосування в подальших дослідженнях з даного напрямку. Розроблені автором методи, моделі та інформаційні технології можуть бути використані при розробці інформаційного та програмного забезпечення систем автоматизованого моніторингу та корекції якості складних технологічних процесів в напівпровідниковій, хімічній, металургійній галузях народного господарства.

## **8. Апробація і повнота викладу нових наукових результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях**

Повнота викладення підтверджена науковими публікаціями у фахових виданнях та матеріалах міжнародних та вітчизняних науково-практичних конференцій. Основні результати, що отримані в дисертаційній роботі, опубліковано у 49 друкованих працях, у тому числі 1 монографія, 25 статей у

наукових фахових виданнях (12 статей опубліковані у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз) і 23 публікацій – у працях наукових конференцій і форумів.

## **9. Зв'язок роботи з науковими програмами**

Робота виконувалася автором на кафедрі інформаційних управлюючих 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).

## **10. Зауваження до роботи**

На жаль, дисертаційна робота Шевченка І.В. не вільна від недоліків, серед яких слід відзначити такі:

- не достатньо повно обґрунтовані вибір теоретико-множинного підходу для моделювання інформаційно-аналітичної системи та її складових та вибір еволюційних алгоритмів для оптимізації;
- у роботі не наведено формалізоване поняття ефективності управління якістю продукції, яке характеризується низкою показників;
- критерій оптимальності управління якістю виробничого процесу залежить не тільки від пропуску критичних і нештатних ситуацій, тому вираз 1, стор. 10 автoreферату ( відповідно 2.1 стор. 74 дисертації) для визначення цього критерію є досить наближеним;

- у роботі не наведені у повному обсязі порівняльні кількісні оцінки, які б підтвердили результати автора щодо спрощення процесу навчання моделі розпізнавання ситуацій, спрощення обчислювального процесу моделювання процесу кристалізації, підвищення точності непрямих вимірювань параметрів температурного поля, оперативності рішень;
- у роботі не в повному обсязі виконано формальну перевірку адекватності наведених моделей;
- п. 2.2 наукової новизни сформульовано не досить вдало, оскільки не зрозуміло, що означає тут “модель оптимізації”. Доцільно було б замінити текст “Метод розв’язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва, шляхом створення моделі оптимізації зі складним критерієм” на “Метод розв’язання задачі оптимізації геометричних параметрів теплового екрана на етапі технологічної підготовки виробництва шляхом побудови цільової функції з врахуванням особливостей технологічного процесу та відповідних обмежень”;
- у першому розділі автором наведені специфічні проблеми складних виробничих процесів (нестабільність, відсутність масштабної інваріантності, тощо), але у висновках не визначено, які з них вирішенні автором;
- на початку другого розділу дисертації (стор. 68) автором наведено повторно її структуру та зміст 3-5 розділів. Це є зайвим.
- перший розділ є перевантаженим матеріалом довідкового характеру, перевищує рекомендований обсяг;
- наявні помилки стилістичного та синтаксичного характеру.

## **11. Висновки**

Висловлені зауваження суттєво не знижують цінність представленого наукового дослідження, його науково-теоретичного та практичного значення. Незважаючи на зазначені недоліки, розглянуту дисертаційну роботу Шевченка І.В. “Методи, моделі та інформаційні технології моніторингу і оптимізації процесу вирощування монокристалів напівпровідників” слід вважати закінченою

науковою роботою, в якій розв'язується актуальна науково-прикладна проблема – створення наукових основ управління якістю та моніторингу процесу вирощування монокристалів напівпровідників шляхом інформаційної підтримки вирішення виробничих завдань на стадіях технологічної підготовки виробництва і виготовлення монокристалів.

Зміст дисертаційної роботи відповідає паспорту спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології. Вважаю, що дисертаційна робота відповідає всім вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, відповідним пунктам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор Шевченко І.В. заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології.

Офіційний опонент,

завідувач кафедрою інформаційних систем

Одеського національного

політехнічного університету

д.т.н., проф. Антощук С.Г.

Підпис завідувача кафедрою інформаційних систем

д.т.н., проф. Антощук С.Г.

засвідчую:

Вченій секретар



Канд

В. Г. Шевченко