

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Суздаль Віктор Семенович

УДК 681.513.54: [548.5: 004.451.2]

**СИНТЕЗ ВІДМОВОСТІЙКИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ
ПРОЦЕСАМИ ВИРОЩУВАННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ
МОНОКРИСТАЛІВ**

05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків - 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України.

- Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор
Дербунович Леонід Вікторович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут", професор
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор
Тунік Анатолій Азарійович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри
- доктор технічних наук, професор
Кулік Анатолій Степанович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", за-
відувач кафедри
- доктор технічних наук, професор
Ястребенецький Михайло Онисимович,
Харківська філія Державного науково-технічного центру з
ядерної та радіаційної безпеки,
завідувач відділу
- Провідна установа:** Одеський Національний політехнічний університет Міністер-
ства освіти і науки України, м. Одеса

Захист відбудеться " 27 " червня 2006 року о _____ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.07 у Національному технічному університеті "Харківський політехніч-
ний інститут" за адресою: 61002, м. Харків-2, _____ вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного універси-
тету "Харківський політехнічний інститут", 61002, м. Харків-2, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий " _____ " травня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Гамаюн І.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток квантової електроніки, ядерного приладобудування, виникнення нових ідей і напрямків в галузях фізики високих енергій, медицини, астрофізики, космонавтики і боротьби з тероризмом пов'язані з інтенсивним використанням функціональних монокристалів (ФМК). Найбільше поширення у виробництві ФМК одержали численні методи вирощування монокристалів з розплаву: Стокбаргера, Киропулоса, Чохральського, Степанова, тигельної зонної плавки та інші. Вони складають одну з найбільш представницьких груп методів, що мають загальні ознаки, зумовлені закономірностями спрямованої кристалізації, і в той же час - істотні технічні та технологічні особливості.

Провідною організацією в галузі вирощування ФМК на Україні є Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України (ІСМА), м. Харків. Високим попитом на світовому ринку користуються одержувані в ІСМА великогабаритні лужногалоїдні кристали (ЛГК), які вирощують витягуванням з розплаву на затравку методом Чохральського. Ці монокристали мають унікальні сцинтиляційні властивості. У промисловому виробництві ЛГК одержують кристали масою понад 500 кг, діаметром до 520 мм, які використовують, наприклад, у вітчизняних медичних гамма-томографах, що поставляються в медичні центри України і за кордон.

Великий внесок у вирішення проблем одержання ФМК і створення АСУ ТП вирощування цих кристалів внесли представники шкіл В.А. Татарченко, В.С. Лейбовича, Г.А. Сатункіна; ідеї та методи удосконалювання сучасних технологічних процесів (ТП) вирощування ФМК, моделювання цих процесів пов'язані з такими іменами, як Л.Г. Ейдельман, Б.В. Гриньов, В.І. Горілецький, А.П. Оксанич, Б.Л. Тіман, А.Д. Тевяшев та інші. Завдяки їх роботам вдалося досягти відтворюваного вирощування монокристалів достатньо високої якості в виробничих умовах.

Досвід промислового виробництва великогабаритних ФМК показує, що найбільш характерні риси ТП вирощування: багатомірність і нестационарність цього об'єкта управління (ОУ), високий рівень виробничих шумів, вплив суб'єктивних факторів на якість і надійність функціонування АСУ ТП. Застосування традиційних детермінованих алгоритмів управління до таких ОУ дозволяє вирощувати великогабаритні ФМК з точністю стабілізації діаметра кристала у $(6\div 7)\%$ від його номінального значення, чого недостатньо для одержання структурно досконалих монокристалів з рівномірним розподілом активатора. Безперервність та тривалість процесу вирощування ФМК в умовах промислового виробництва ($10\div 12$ діб), помилки та збої при функціонуванні установок вирощування ФМК, які приводять до великих матеріальних втрат, визначають гостру необхідність розвитку методів проектування високонадійних багатопроцесорних систем управління (БПСУ) ростовими установками.

Отже, істотне підвищення вимог споживачів до характеристик ФМК, зростання обсягів виробництва, оснащення його новими дорогими ростовими установками визначають нові, більш жорсткі вимоги до якості, відмовостійкості та надійності систем управління процесами кристалізації, виконання яких можна добитися шляхом використання нової концепції управління, сучасних досягнень технічної діагностики, убудованих засобів діагностування та відновлення працездатності БПСУ.

Таким чином, необхідність вирішення важливої науково-практичної проблеми - підвищення ефективності виробництва великогабаритних ФМК високої якості, низької собівартості, конкурентоздатних на світовому ринку, шляхом впровадження нового класу АСУ ТП, створеної на основі концепції адаптивного й відмовостійкого управління сучасними росто-

вими установками, а також розробки теоретичних і інженерно-технічних основ синтезу БПСУ, робастних до фактичного рівня параметричної невизначеності ОУ і зовнішніх збурень, включаючи побудову діагностичного забезпечення і програмно-технічних засобів АСУ ТП кристалізації, - все це визначає актуальність теми досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи та отримані результати відповідають проблематиці держбюджетних та госпдоговірних тем, що виконуються в ІСМА. Дослідження, виконані в дисертації, пов'язані з міжнародними проектами "Belle" (University of Tsukuba, Японія), "BaBar" (SLAC, США), "Glast" (NASA, США), "PiBeta" (Paul Sherrer, Швейцарія).

Більша частина наукових результатів дисертації відповідає тематиці госпдоговірних робіт ІСМА в галузі розвитку методів синтезу АСУ ТП великогабаритних ЛГК у 1999-2005 р.р., зокрема, науково-дослідним роботам, профінансованим НАН України:

- "Розробка і дослідження розподіленої системи управління для установок вирощування великогабаритних лужногалоїдних кристалів" (шифр "Гармонія");
- "Розробка і дослідження каналу управління діаметром великогабаритних лужногалоїдних монокристалів у розподіленій системі управління" (шифр "Симфонія");
- "Розробка комплексу мікропроцесорних технічних засобів контролю і регулювання рівня розплаву при вирощуванні лужногалоїдних монокристалів" (шифр "Співзвуччя", Д.Р. № 0101U006612);
- "Розробка нової системи та алгоритмів автоматизованого управління вирощуванням великогабаритних кристалів" (шифр "Темп", Д.Р. № 0103U003476);
- "Дослідження процесів тепло- і масопереносу при вирощуванні великогабаритних лужногалоїдних скінтіляційних монокристалів" (шифр "Вплив", Д.Р. № 0104U006375).

В темах "Гармонія", "Симфонія", "Співзвуччя", "Темп" автор - науковий керівник робіт, в темі "Вплив" - відповідальний виконавець етапів, пов'язаних з математичним моделюванням і синтезом АСУ ТП вирощування великогабаритних ЛГК.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-практичної проблеми - підвищення ефективності виробництва високоякісних великогабаритних монокристалів на основі розробки нової концепції автоматизованого управління ТП промислового вирощування великогабаритних ФМК; створення методичних, теоретичних та інженерно-технічних засобів проектування, методів синтезу адаптивних і відмовостійких БПСУ ростовими установками з урахуванням багатовимірності, стохастичності і нестационарності процесів кристалізації.

Основні задачі дисертаційної роботи, визначені поставленою метою:

1. Проведення аналізу стану і тенденцій розвитку автоматизованих систем управління процесами вирощування великогабаритних ФМК і обґрунтування необхідності розробки нової концепції управління сучасними ростовими установками в умовах промислового виробництва.

2. Розробка моделей процесу кристалізації з урахуванням несиметричності теплових і гідравлічних полів системи кристал-розплав, що забезпечують прийнятний компроміс між властивими для цього об'єкта якостями нестационарності та параметричної невизначеності і мірою їх урахування для ефективного управління вирощуванням великогабаритних ФМК.

3. Розробка діагностичних моделей БПСУ поведінкового, функціонального та структурно-логічного рівнів з урахуванням особливостей управління процесами вирощування ФМК, можливостей сучасних електронних технологій і вимог міжнародних стандартів проектування.

4. Розробка методів синтезу БПСУ на основі розвинутих алгоритмів управління ТП вирощування великогабаритних ФМК, які забезпечують необхідну точність і якість управління в умовах нестаціонарності і стохастичності процесу кристалізації.

5. Розробка методів синтезу програмно-апаратних засобів тестового і функціонального діагностування БПСУ на основі мікроконтролерів.

6. Розробка комплексу програмно-апаратних засобів АСУ ТП вирощування великогабаритних ФМК на основі запропонованих моделей, методів, алгоритмів управління та методів синтезу мікроконтролерних пристроїв управління з убудованими засобами тестового і функціонального діагностування, а також з модулями сигнатурного моніторингу.

Об'єкт дослідження - АСУ ТП вирощування великогабаритних ФМК з розплаву.

Предмет дослідження - методи синтезу відмовостійких БПСУ процесами вирощування великогабаритних високоякісних ФМК.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених задач використано методи теорії управління в умовах неповної інформації, зокрема, методи адаптивного управління на основі прогнозуючих моделей ОУ - для вибору, обґрунтування та синтезу систем і алгоритмів управління ТП вирощування ФМК; методи рішень рівнянь математичної фізики – для моделювання процесів тепло – и масопереносу в системі кристал – розплав; методи технічної діагностики - для розробки функціональних і тестових засобів діагностування БПСУ; методи теорії графів - при розробці графових моделей БПСУ; методи теорії кінцевих автоматів - для організації діагностичних експериментів (ДЕ) в БПСУ, розробки концепції сигнатурного моніторингу та убудованих програмно-технічних засобів діагностування.

Оцінку ефективності застосування розроблених методів здійснено на основі аналізу експериментальних даних, отриманих у лабораторних і виробничих умовах.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат дисертації полягає в розробці нової концепції автоматизованого управління ТП вирощування високоякісних великогабаритних ФМК в умовах промислового виробництва, методів синтезу відмовостійких адаптивних багатопроцесорних систем управління ростовими установками, впровадження яких забезпечило досягнення високих якісних і кількісних показників ТП вирощування великогабаритних ФМК.

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, такі:

1. Здійснено дальший розвиток математичних моделей в тривимірному просторі процесів тепло- і масопереносу з урахуванням порушення симетрії фізичних полів в системі кристал-розплав і гідродинаміки бінарного розплаву, що дозволило визначити необхідні умови забезпечення рівномірності розподілу активатора в кристалі і вирішити інші задачі оперативного управління ТП кристалізації ФМК.

2. Вперше формалізовано стохастичну модель процесу кристалізації, що включає в себе співвідношення Навьє-Стокса, теплопровідності і дифузії у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь з випадковими коефіцієнтами і з випадковою правою частиною, застосування якої підвищує точність оцінки впливу технологічних параметрів на результат вирощування ФМК.

3. Вперше обґрунтовано використання та реалізовано новий клас БПСУ ростовими установками, які відрізняються від існуючих систем з детермінованими алгоритмами управління використанням методу аперіодичного рекурсивного прогнозного управління, в якому одночасно здійснюються процедури ідентифікації параметрів системи та аперіодичного управління з прогнозуванням, що дозволило підвищити якість вирощуваних ФМК в умовах промислового виробництва.

4. Розроблено новий метод управління процесом вирощування монокристалів, який відрізняється від існуючих введенням додаткових контурів управління фоновим підживленням розплаву і квазібезперервним витягуванням кристалу, обґрунтовано його ефективність для управління ТП вирощування якісних великогабаритних ФМК.

5. Набули дальшого розвитку графові моделі БПСУ з самотестуємими процесорними модулями, на основі яких формалізовано нову систему організації умовних та безумовних діагностичних експериментів для виявлення в системі управління несправних процесорних модулів та інтерфейсних зв'язків між ними, що дозволило скоротити апаратні і часові затрати на технічне обслуговування БПСУ.

6. Набули дальшого розвитку функціональні моделі мікроконтролерних засобів управління і методи синтезу функціональних тестів, які дозволяють розширити клас знайдених несправностей механізмів обробки, передачі, збереження і управління в мікроконтролері (МК) із резидентною та зовнішньою пам'яттю, підвищити вірогідність тестового діагностування систем управління.

7. Набув дальшого розвитку метод функціонального діагностування мікроконтролерних засобів управління з застосуванням діагностичного процесора (ДП), який функціонує паралельно з основним процесором і перевіряє вірність виконання сегментів управляючої програми та здійснює відновлення працездатності БПСУ.

8. Вперше розроблено та обґрунтовано метод синтезу і проектування діагностичного забезпечення (ДЗ) БПСУ на основі концепції сигнатурного моніторингу, що дозволяє здійснити перевірку справності АСУ ТП в режимах тестового і функціонального діагностування уніфікованими убудованими програмно-апаратними модулями, забезпечити високий коефіцієнт готовності і рівень відмовостійкості систем управління.

Практичне значення одержаних результатів обумовлене:

- рішенням задачі підвищення якості великогабаритних ФМК за рахунок більш високої точності стабілізації діаметра вирощуваного кристала;
- підвищенням ефективності і продуктивності ростових установок завдяки використанню якісно нової концепції управління, заснованої на методах адаптивного управління з прогнозуючими моделями;
- зменшенням витрат сировини, електроенергії та інших матеріальних ресурсів на одиницю продукції внаслідок підвищення відмовостійкості і надійності АСУ ТП на основі використання програмно-апаратних засобів діагностування та концепції сигнатурного моніторингу;
- зниженням собівартості великогабаритних ФМК і збільшенням конкурентоздатності вітчизняних монокристалів на світовому ринку.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, підтверджені експериментальними дослідженнями і практично реалізовані при розробці алгоритмів управління, створенні інформаційного та програмно-технічного забезпечення АСУ ТП вирощування великогабаритних ЛГК CsI(Na) і NaI(Tl) на промислових установках типу "РОСТ" в ІСМА НАН України, монокрис-

талів корунду в Інституті монокристалів НАН України, монокристалів тетраборату літія в Інституті електронної фізики НАН України. Практичне використання результатів дисертаційної роботи дозволило більш ніж в 1,5 рази підвищити точність стабілізації діаметра вирощуваних кристалів, уникнути фатальних помилок і зменшити матеріальні втрати в процесі промислового виробництва, підвищити відмовостійкість АСУ ТП та відтворюваність результатів вирощування.

Методи і прилади, які використовувались при створенні АСУ ТП ростовими установками, захищені авторськими свідоцтвами, патентами України і РФ.

Наукові і науково-методичні розробки дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації, що виносяться на захист, отримані автором самостійно, серед них – концепція управління процесом вирощування великогабаритних ФМК на основі розвинутого алгоритму прогностичного управління і концепція сигнатурного моніторингу для тестового та функціонального діагностування БПСУ.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати роботи доповідалися й обговорювалися на:

- Шостій міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 1998);
- Міжнародній конференції з проблем управління (Москва, 1999);
- Одинадцятій міжнародній конференції з росту кристалів і епітаксії (США, Орizona, 1999);
- Європейській конференції за матеріалами "E-MRS 1999" (Страсбург, 1999);
- Інтернаціональній конференції "Advances Materials" (Київ, 1999);
- Міжнародній конференції "Проблеми автоматизованого електроприводу" (Крим, Стрімчак, 2001);
- Науково-практичній конференції "Проблеми автоматизації технологічних процесів і шляхи їх рішення на підприємствах України" (Київ, 2001);
- Восьмій міжнародній конференції "Теорія і техніка передачі, прийому і обробки інформації" ("Інтегровані інформаційні системи, мережі і технології") "ІСТ-2002" (Харків, 2002);
- Десятій Російській національній конференції з росту кристалів "НКРК-2002" (Москва, 2002);
- Міжнародній конференції "ICFM-2003" (Крим, Партеніт, 2003);
- Дванадцятій міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2004);
- Одинадцятій національній конференції з росту кристалів "НКРК-2004" (Москва, 2004);
- Тринадцятій науково-практичній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2005).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 44 друкованих праці, серед яких 1 монографія, 25 статей в наукових фахових виданнях, що входять в перелік ВАК України, 6 патентів України і Росії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 321 найменувань на 30 сторінках і 10 додатків на 41 сторінках, а також містить 75 рисунків та 23 таблиці. Повний обсяг дисертації складає 326 сторінок, включаючи 308 сторінок основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі дослідження, викладені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

Перший розділ містить аналіз особливостей ТП вирощування великогабаритних ФМК із розплаву, аналіз стану і тенденцій розвитку АСУ ТП сучасними ростовими установками. Відзначено, що в процесі вирощування кристала відбувається перерозподіл мас розплаву і кристала в робочому просторі ростової установки, зміна всіх характеристик теплового поля, параметрів тепло- і масопереносу, положення фронту кристалізації (ФК) і величини градієнта температури в зоні ФК. Ці особливості розглянутого ОУ, а також високий рівень виробничих шумів, наявність зон зміни параметрів ОУ, в яких процес кристалізації втрачає стійкість, в значній мірі ускладнюють процес створення високоефективних систем управління ростовими установками.

На даний час моделювання процесів вирощування ФМК методом Чохральського засновано на чисельному рішенні нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса разом з рівняннями переносу тепла і маси в наближенні Буссинеска. Аналіз стану проблеми моделювання процесів вирощування ФМК із розплаву показав, що для формалізації і вирішення задачі управління необхідно переходити до тривимірних моделей фізичних процесів кристалізації і враховувати стохастичні властивості ОУ.

Традиційна доктрина управління ТП вирощування ФМК заснована на використанні детермінованих моделей і методів управління ростовими установками. У розділі обґрунтовано доцільність переходу до нової концепції управління, заснованої на стохастичному підході з урахуванням нестационарності фізичних полів у системі кристал-розплав і на використанні адаптивних методів управління.

Зростання складності БПСУ процесами вирощування ФМК викликає насущну потребу забезпечення необхідного рівня відмовостійкості і надійності цих систем у виробничих умовах. Відзначено, що функціональне діагностування БПСУ, засноване на використанні алгебраїчних інваріантів, як контрольних умов перевірки правильності функціонування системи управління в просторі сигналів, є найбільш ефективним підходом до вирішення проблеми підвищення відмовостійкості БПСУ. Застосування теорії спостерігачів до задачі перевірки правильності функціонування динамічної системи покладено в основу запропонованої концепції сигнатурного моніторингу БПСУ.

Аналіз ДЗ сучасних БПСУ показує, що висока якість технічного обслуговування систем досягається сполученням тестових методів діагностування на системному та функціонально-структурному рівнях, статичних і динамічних процесів діагностування, використанням убудованих програмно-апаратних засобів тестування і дотриманням міжнародних стандартів тестопридатного проектування. На системному рівні організація ДЕ здійснюється на основі аналізу графоаналітичних моделей БПСУ Препарата-Метца-Чена (ПМЧ), в результаті якого можна ідентифікувати несправні процесорні модулі БПСУ. Відзначено, що теорія діагностуємості систем, що розвивається в більшості робіт у цій галузі, обмежена умовами стійкості

дефектів, справністю тестових інтерфейсних зв'язків (ТІЗ) між модулями і відсутністю властивостей самоперевіряємості модулів системи.

Відзначено, що на структурно-логічному рівні діагностування БПСУ широко використовуються методи компактного псевдовипадкового і псевдовичерпного тестування. Аналізується ідея сполучення концепції убудованого самотестування і стандарту проектування IEEE 1449.1 "Периферійне сканування". Аналіз ДЗ мікропроцесорних надвеликих інтегральних схем провідних закордонних фірм показує, що 5÷8% площі кристала займають убудовані засоби діагностування, які можуть бути використані для сигнатурного моніторингу БПСУ.

Розділ завершується обґрунтуванням та формулюванням мети і задач дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено розвитку методології математичного моделювання процесу кристалізації монокристалів з розплаву як ОУ із стохастичними властивостями. Для підвищення якості великогабаритних ФМК необхідно враховувати при управлінні реальні властивості ОУ: нестационарність, високий рівень шумів, порушення симетрії фізичних полів в процесі вирощування.

У методі Чохральського форма і розміри вирощуваного кристала визначаються капілярними силами, що формують меніск у зоні міжфазної межі, і умовами тепло- і масообміну в системі кристал-розплав. Поперечний переріз кристала при капілярному формоутворенні збігається з перетином стовпа розплаву поверхнею кристалізації. Параметри геометрії стовпа розплаву - результат рішення рівнянь Нав'є-Стокса разом з капілярним рівнянням Лапласа, як граничною умовою на вільній поверхні.

З метою урахування при розробці АСУ ТП стохастичних властивостей моделей кристалізації здійснено перехід від нелінійної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описує фізичні процеси тепло- і масопереносу в системі кристал-розплав, до системи лінійних, звичайних диференціальних рівнянь (ЗДР) з використанням підстановки Кармана $U = \omega \cdot r \cdot H(\varepsilon)$, $V = \omega \cdot r \cdot G(\varepsilon)$, $W = -2\sqrt{\omega \cdot v} \cdot H(\varepsilon)$, $p = (C\omega^2 \cdot r^2 \cdot \rho) / 2 - 2\rho \cdot \omega \cdot v \cdot P(\varepsilon)$, а також методу Фур'є розподілу змінних $\theta(r, z, t) = \theta_1(r) \cdot \theta_2(z) \cdot \theta_3(t)$, $C(r, z, t) = C_1(r) \cdot C_2(z) \cdot C_3(t)$, де U , V , W - радіальний, осьовий та окружний компоненти вектора швидкості в циліндричній системі координат, $\theta = (T - T_K) / \Delta T$ - безрозмірна величина температури T , $\Delta T = T_T - T_K$ - максимальна різниця температур, T_K , T_T - максимальна і мінімальна величина T на поверхні кристала і стінках тигля відповідно, C - концентрація домішки в розплаві, ρ - щільність розплаву, p - тиск у розплаві, ω - кутова швидкість обертання, v - кінематична в'язкість розплаву, H , G , P - безрозмірні функції від $\varepsilon = z \cdot \sqrt{\omega / v}$.

При $H = y_{1h}$, $\frac{dy_{1h}}{d\varepsilon} = y_{2h}$, $\frac{dy_{2h}}{d\varepsilon} = y_{3h}$, $G = y_{1g}$, $\frac{dy_{1g}}{d\varepsilon} = y_{2g}$, $P = y_{1p}$ і $\bar{y}(\varepsilon)$ - векторі з компонентами

$(y_{1h}, y_{2h}, y_{3h}, y_{1g}, y_{2g}, y_{1p})$, в результаті лінеаризації системи ЗДР при $\bar{y}(\varepsilon) = \bar{y}_0(\varepsilon) + \tilde{\bar{y}}(\varepsilon)$, $\bar{y}(\varepsilon_0) = \bar{y}_0(\varepsilon_0) + \tilde{\bar{y}}(\varepsilon_0)$, $\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$, де $\tilde{\bar{y}}(\varepsilon)$, $\tilde{\bar{y}}(\varepsilon_0)$ - малі збурення, отримано загальну математичну модель фізичних процесів кристалізації при вирощуванні ФМК для стаціонарного випадку у вигляді системи ЗДР, яка потім видозмінена вже з урахуванням стохастичних властивостей ОУ. Використано зображення рівнянь Нав'є-Стокса, теплопровідності, дифузії у вигляді систем ЗДР з випадковими коефіцієнтами та випадковою правою частиною і отримано

загальну стохастичну модель фізичних процесів кристалізації в стаціонарному випадку для осесиметричної системи:

$$\frac{d\tilde{y}}{d\varepsilon} - A(\varepsilon; \omega)\tilde{y} = \bar{\alpha}(\omega), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \chi_0(\omega) \frac{d^2\theta_1(r)}{dr^2} + \chi_0(\omega) \frac{1}{r} \frac{d\theta_1(r)}{dr} - \lambda_0^2\theta_1(r) = \eta_1(\omega), \\ \chi_0(\omega) \frac{d^2\theta_2(z)}{dz^2} + \lambda_0^2\theta_2(z) = \eta_2(\omega), \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \chi_c(\omega) \frac{d^2C_1(r)}{dr^2} + \chi_c(\omega) \frac{1}{r} \frac{dC_1(r)}{dr} - \lambda_c^2C_1(r) = \xi_1(\omega), \\ \chi_c(\omega) \frac{d^2C_2(z)}{dz^2} + \lambda_c^2C_2(z) = \xi_2(\omega), \end{cases}, \quad (3)$$

де $A(\varepsilon, \omega) = [J(\bar{y}_0(\varepsilon); \varepsilon, \omega)]$ - випадкова матриця Якобі розмірності 6×6 , $\bar{\alpha}(\omega)$ - випадковий вектор-стовпець розмірності 1×6 ; $\chi_0(\omega)$, $\chi_c(\omega)$, $\eta_1(\omega)$, $\eta_2(\omega)$, $\xi_1(\omega)$, $\xi_2(\omega)$ - випадкові величини; $\omega \in \Omega$, де (Ω, Σ, P) - імовірнісний простір, Ω - простір елементарних подій, Σ - σ -алгебра подій, P - імовірнісна міра на σ -алгебрі подій, λ_0 , λ_c - константи.

Проведено аналіз фізичних полів у системі кристал-розплав, виходячи з загальної постановки тривимірної задачі і використання математичної моделі неоднорідного розплаву в наближенні Буссинеска.

Рішення рівнянь тривимірної математичної моделі процесів тепло- і масопереносу отримано методом кінцевих елементів. Проведено дослідження руху розплаву в залежності від швидкості обертання тигля і кристала, розмірів вирощуваного монокристала стосовно розмірів тигля, від співвідношення висоти тигля до його ширини, числа Рейнольдса. Для монокристала CsI(Na) за допомогою тривимірних математичних моделей гідродинаміки і процесів тепло- і масопереносу визначені розподіли температури в тиглі (рис. 1) і кристалі, ліній струму в розплаві в залежності від температурного поля (рис. 2) при різних співвідношеннях швидкості обертання кристала і тигля, розмірів вирощуваного кристала до розмірів тигля, числа Рейнольдса.

Рис. 1. Розподіл температури в тиглі

Рис. 2. Функція струму

Фізичні параметри моделей: число Грасгофа (теплове) $Gr=1 \cdot 10^5$; число Грасгофа (концентраційне) $Gr_D=1 \cdot 10^3$; число Прандтля (теплове) $Pr=0,02$; число Прандтля (концентраційне) $Pr_D=0,3$; число Марангоні (теплове) $Mn=5,1 \cdot 10^4$; число Біота (теплове) $Bi=0,5$; число Біота (концентраційне) $Bi_D=-15,6$; щільність розплаву $\rho=4510 \text{ Кг/м}^3$; питома теплоємність кристала $199,7 \text{ Дж/Кг}\cdot\text{К}$; теплопровідність кристала 163 Вт/мК .

Отримані результати дозволили при проектуванні АСУ ТП конкретних установок "РОСТ" із заданими діаметром кристала та геометричними розмірами тигля визначити швидкості обертання тигля і кристала для забезпечення безвихрового переміщення розплаву в зоні ФК, що є необхідною умовою забезпечення рівномірності розподілу домішки в кристалі.

Третій розділ присвячено вирішенню проблеми адаптивного управління процесом кристалізації і розробці класу прогнозних регуляторів для застосування їх при вирощуванні великогабаритних ФМК. У методі прогнозного управління використовується модель ОУ, що дозволяє прогнозувати майбутню поведінку системи на кінцевому інтервалі часу, горизонт прогнозування (ГП), що починається в даний момент часу t (або на N_1 кроці). Прогнозуються також залежності майбутніх управляючих сигналів $\tilde{u}(t+k|t)$ в межах горизонту управління (ГУ). В результаті формується послідовність оптимальних управлінь, і перше з них ($\tilde{u}(t|t)$) подається на реальний ОУ. В наступний момент $t+1$ процес повторюється, але з ГП, зрушеним на 1 крок.

Управління оптимізують з використанням квадратичного критерію

$$J(t) = \sum_{k=0}^{N_2} [\tilde{y}(t+k|t) - r(t+k|t)]^2 Q_1(k) + \sum_{k=0}^{N_3-1} [\Delta \tilde{u}(t+k|t)]^2 Q_2(k), \quad (4)$$

де N_2 – момент закінчення ГП, N_3 - момент часу закінчення ГУ. Введено обмеження на різницю між спрогнозованими виходами $\tilde{y}(t+k|t)$ і дійсною траєкторією $r(t+k|t)$ на ГП, і на приріст сигналу управління $\Delta \tilde{u}(t+k|t)$ на ГУ. Величини штрафів на управління і помилку управління змінюють за допомогою вагових матриць $Q_1(k)$ і $Q_2(k)$.

Побудову адекватної математичної моделі процесу вирощування ФМК пропонується здійснити в класі моделей, що описуються стохастичним різницевим рівнянням з дискретним часом. Нехай в результаті структурної і параметричної ідентифікації ОУ отримано модель, що має r входів, m виходів і l шумів. Зобразимо отриману модель для k -го кроку в скінченних різницях з матрицями розмірності $(r \times 1)$ для входу $U(k)$, (1×1) - для шумів $W(k)$ і $(m \times 1)$ - для виходу $Y(k)$ у вигляді $A(B) \cdot Y(k) = G(B) \cdot U(k) + D(B) \cdot W(k)$, де $A(B)$, $G(B)$, $D(B)$ - матричні поліноми ступенів m , r , l . Поточне значення виходу визначено по його попередніх значеннях у вигляді авторегресійної (АР) моделі з ковзаючим середнім і з зовнішніми шумами (поліноми системи вирівнюють за максимальним порядком одного з них).

На основі аналізу існуючих алгоритмів прогнозного управління запропоновано для управління ГП вирощування ФМК використовувати алгоритм аперіодичного управління з прогнозуванням (АУП) із включенням до нього авторегресійної моделі шуму. Параметри алгоритму знаходять за умовою, що вектор управління $U_q(k)$ забезпечує зведене до нуля значення виходу ОУ за q тактів ГУ. При цьому всі значення управління після $(k+q-1)$ -го такту будуть нульовими, а вектор майбутніх виходів ОУ з $Y_p(k+q)$ стане нульовим за умовою, що ніякі збурення після цього кроку не впливають на ОУ. При цих припущеннях управління, що мінімізує критерій (4), виходить аперіодичним:

$$U_q(k) = \begin{bmatrix} -(T_u^T(B) T_u(B) + QI)^+ T_u^T(B) G(B) \\ -(T_u^T(B) T_u(B) + QI)^+ T_u^T(B) A(B) \\ -(T_u^T(B) T_u(B) + QI)^+ T_u^T(B) D(B) \\ -(T_u^T(B) T_u(B) + QI)^+ T_u^T(B) T_w(B) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_p(k-p) \\ Y_p(k-p) \\ W_p(k-p) \\ W_{p+q}(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де

$$U_p(k-p) = \begin{bmatrix} U(k-p) \\ U(k-p+1) \\ \vdots \\ U(k-1) \end{bmatrix}, Y_p(k-p) = \begin{bmatrix} Y(k-p) \\ Y(k-p+1) \\ \vdots \\ Y(k-1) \end{bmatrix}, W_p(k-p) = \begin{bmatrix} W(k-p) \\ W(k-p+1) \\ \vdots \\ W(k-1) \end{bmatrix},$$

$$W_{p+q}(k) = \begin{bmatrix} W(k+q) \\ W(k+q+1) \\ \vdots \\ W(k+q+p-1) \end{bmatrix},$$

а $U_p(k-p)$, $Y_p(k-p)$, $W_p(k-p)$, $W_{p+q}(k)$ - відповідно, управління, помилка управління, оцінка шуму на p попередніх кроках управління і прогноз шуму, $T_u(B)$, $T_w(B)$ - теплицеві матриці, сформовані з коефіцієнтів поліномів $G(B)$ і $D(B)$, відповідно, Q - штрафний параметр, величина якого впливає на якість функціонування АУП.

Управляючий вплив може бути відкорегований шляхом зміни ГУ. При малому ГУ управляючі впливи мають більшу амплітуду, ніж в альтернативних випадках, що забезпечує підвищену якість регулювання. Збільшення амплітуди управляючих впливів відбувається через те, що регулятор повинен за короткий відрізок часу забезпечити нульовий вихід ОУ. Великі значення ГУ дозволяють значну частину часу управляти виходом ОУ для його обнуління, тобто для цього потрібні менші управляючі впливи. Збільшення ГУ означає зменшення управляючих впливів і амплітуди регулювання, що особливо важливо при управлінні вирощуванням ФМК.

Алгоритм АУП індуферентний до проблеми стійкості і має тільки дві регульовані змінні.

Оцінку управління по алгоритму АУП для r входів можна проводити по рівнянню (5) у формі

$$U(k) = \theta(k) \bar{\Psi}_p(k), \quad (6)$$

Для лінійної системи ідентифікацію запропоновано вести по попередніх та поточних вимірах рекурентним оцінюванням параметрів СУ по методу найменших квадратів.

$$P_p(k) = P_p(k-1) [I - \bar{\Psi}_p(k) K_p(k)], \quad (7)$$

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + [U(k) - \hat{U}(k+1)] K_p(k), \quad (8)$$

де

$$K_p(k) = \frac{\bar{\Psi}_p^T(k) P_p(k-1)}{1 + \bar{\Psi}_p^T(k) P_p(k-1) \bar{\Psi}_p(k)} \quad (9)$$

Матриці $P_p(0)$ і $\theta(0)$ ініціалізуються числовими значеннями M і нулями відповідно, де M – велике позитивне число (константа M потрібна тільки для ініціалізації і визначається емпірично). Для великих наборів даних точне значення ініціалізованих констант неважливе.

Таким чином, в алгоритмі АУП матриці (7) і (8) обчислюють рекурсивно, виходячи безпосередньо з вхідних і вихідних даних, отриманих на кожному кроці управління; рекур-

сивна формула одночасно задовольняє і вимогам ідентифікації системи, і управлінню АУП. В результаті, процес управління здійснюється так, щоб не було затримки між кроком ідентифікації і кроком обчислення управління. Модель шуму, що використовується в алгоритмі АУП, підвищує якість управління.

Алгоритм функціонування регулятора АУП для SISO-системи (один вхід, один вихід) після ініціалізації:

Крок 1. У вектор сигналів $\bar{\Psi}_p(k)$ на початку циклу управління вводять нові виміряні значення $Y(k)$, $W(k)$ і значення управляючого сигналу $U(k)$, обчислене на кроці b на попередньому циклі.

Крок 2. Обчислення вектора $K_p(k)$ через підстановку $P_p(k-1)$ і $\bar{\Psi}_p(k)$ у рівняння (9).

Обчислення спочатку $\bar{\Psi}_p^T(k)P_p(k-1)$, а потім

$$\left[\bar{\Psi}_p^T(k)P_p(k-1)\right]\bar{\Psi}_p(k).$$

Рис. 3. АУП-регулятор

Крок 3. Обчислення прогнозного значення сигналу управління $\hat{U}(k+1)$ через підстановку $\hat{\theta}(k)$ й $\bar{\Psi}_p(k)$ у рівняння (6).

Крок 4. Відновлення $P_p(k-1)$ по рівнянню (7) за результатами розрахунку $P_p(k)$ з $\bar{\Psi}_p(k)$, отриманим після кроку 1, і $K_p(k)$, обчисленим після кроку 2.

Крок 5. Відновлення $\hat{\theta}(k)$ після розрахунку $\hat{\theta}(k+1)$ по рівнянню (8) із вхідним сигналом $U(k)$, прогнозним управлінням $\hat{U}(k+1)$ з кроку 3 і $K_p(k)$ з кроку 2.

Крок 6. Обчислення управління $U(k+1)$ по рівнянню (6) за результатами розрахунку $\hat{\theta}(k+1)$.

Крок 7. Збільшення k на одиницю і перехід до кроку 1, або закінчення роботи алгоритму при виконанні умов, обумовлених ходом ТП.

На основі даних вирощування великогабаритних ЛГК проведено порівняльний аналіз алгоритмів функціонування АУП- і ПІД-регуляторів у контурі стабілізації діаметра кристала. Структурну схему АУП-регулятора приведено на рис. 3. Чисельне моделювання проведене з урахуванням особливостей ОУ і з використанням методу виміру рівня розплаву для оцінки діаметра вирощуваного монокристала.

Структурну і параметричну ідентифікацію моделі ОУ проведено на основі даних, отриманих у режимі реального часу SCADA-системою ТРЕЙС МОУД на установці "РОСТ" при вирощуванні монокристалів CsI(Na) діаметром 300 мм.

Результати параметричної ідентифікації показують нестационарність процесу вирощування великогабаритних ЛГК. По моделі ОУ для 1-го дня вирощування проведено розрахунок управління на основі ПІД-регулятора, настроєного за допомогою пакета Nonlinear Control Design блоку NCD Output. Потім цей регулятор був використаний для роботи на моделі 11-го дня вирощування. Результати моделювання роботи ПІД-регулятора показують, що наприкінці вирощування зменшується запас стійкості системи регулювання діаметра кристала, і її помилки зростають на 10%, що робить неможливим одержання якісного монокристала по всій його довжині.

Аналіз помилок регулювання АУП-регулятора для 1-го, 2-го і 11-го днів вирощування при зміні заданого значення для кожної моделі показує (рис. 4), що АУП-регулятор працює

стійко вже з третього кроку алгоритму управління, має малі відхилення вихідного параметра від заданого значення на всьому протязі вирощування і може з успіхом застосовуватися для управління діаметром великогабаритних ФМК.

Четвертий розділ присвячено розробці методів тестового діагностування БПСУ ростовими установками на системному і функціональному рівнях. У БПСУ вирощування великогабаритних кристалів на різних ростових установках використовуються кілька десятків МК, що з'єднані локальною мережею. На системному рівні необхідно верифікувати справність кожного процесорного модуля і інтерфейсних зв'язків між ними.

Рис. 4. Помилки регулювання АУП-регулятора, що управляє діаметром кристала, на 1-у, 2-у і 11-у добу вирощування

Запропоновано метод синтезу структури t/t_p -S-діагностуємої системи й організації ДЕ у БПСУ, що містить n модулів, з яких t несправних, у тому числі, $t_p \leq t$ модулів мають перемешовані несправності (ПН) і S несправних ТІЗ. При побудові ДЕ в БПСУ припускається, що кожен МК модуль є самотестуємим. Результати тестування зображаються діагностичним синдромом, розміткою дуг графової ПМЧ моделі. ПМЧ модель БПСУ - орієнтований граф $G(M, A)$, в якому кожна вершина $m_i \in M$ зображує відповідний процесорний модуль, і існує дуга $a_{ij} \in A$ між вершинами (m_i, m_j) , якщо процесор m_i тестує m_j через ТІЗ. З кожною вершиною $m_i \in M$ графа G пов'язані відображення: $\Gamma(m_i) = \{m_j: (m_i, m_j) \in A\}$ і $\Gamma^{-1}(m_i) = \{m_j: (m_j, m_i) \in A\}$.

Визначення 1. Нехай у системі з M модулів існує $F \subseteq M$, $|F| \leq t$ несправних модулів. Синдром, що дозволяє знайти F несправних модулів системи за умовою $t(t_p=0)$, будемо називати k -сумісним, а безліч несправних модулів F - k -сумісною безліччю несправностей.

Визначення 2. Система є t/t_p -S-діагностуємою, якщо при заданому t/t_p -обмеженні для кожного k -сумісного синдрому безліч несправних модулів k - сумісно за умовою, що не більш S результатів тестування є помилкові.

Доведені нижченаведені твердження і теорема, що дозволяють визначити характеристики t/t_p -S-діагностуємості БПСУ.

Твердження 1. Система є t/t_p -S-діагностуємою, якщо $|\Gamma^{-1}(m_i)| \geq t+S$ для кожного модуля $m_i \in M$.

Нехай безліч модулів $X \subseteq M$ має відображення $\Gamma(X) = \cup_{m_i \in X} (\Gamma(m_i) - X)$, а $\Psi(X, k)$ позначає безліч з k модулів у $(M - X)$, що мають найбільше число ТІЗ з модулями безлічі $\{X\}$.

Теорема 1. Система є t/t_p -S-діагностуємою тоді і тільки тоді, коли виконуються наступні умови:

- 1) $|\Gamma^{-1}(m_i)| \geq t+S, \forall m_i \in M;$

- 2) для кожного цілого числа $q, 0 \leq q \leq t$, і для кожної підмножини $X \subseteq M, |X| = n - 2t + q, \Psi[X, \min(t, t_p + q)] > S.$

Твердження 2. Система M з n процесорних модулів, що є t/t_p -S-діагностуємою і містить, щонайменше, один модуль $m_i \in M$ такий, що $|\Gamma^{-1}(m_i)| = t+S$. Тоді $t_p = 0$.

На підставі доведених тверджень визначається оптимальність структури t/t_p -S-діагностуємих БПСУ.

Визначення 3. Система M з n процесорних модулів є оптимально t/t_p -S-діагностуємою, якщо кожен модуль $m_i \in M$ перевіряється k модулями й аналізується

наступне число синдромів:

- 1) $k=(t+s+1)$ синдромів для випадку t/t_p -S-діагностуємості,
- 2) $k=(t+s)$ синдромів для випадку $t/t_{p=0}$ -S-діагностуємості.

Для t/t_p -S-діагностуємої системи з n модулів мінімальний час процедури безумовного ДЕ складає $T \leq n(t+s+1)T_n$, де T_n – час додатка тестової послідовності для одного процесорного модуля.

Показано, що в структурі БПСУ з модулями, що самотестуються, можна скоротити час тестування і число міжмодульних зв'язків на n у порівнянні з системами без самотестування.

У БПСУ з модулями, що самотестуються, при організації умовного ДЕ необхідно вирішити задачу вибору мінімальної підмножини справних модулів, визначених на першому кроці самотестування, для перевірки справності всієї системи за мінімальне число кроків. Показано, що ця задача зводиться до вирішення задачі вибору мінімального покриття в теорії графів.

У роботі запропоновано підхід до тестового діагностування МК із RISC-архітектурою, заснований на використанні розширеної функціональної моделі МК. Функціональні вузли МК, убудована і зовнішня пам'ять, множини його команд і інтерфейсів взаємозалежні між собою безліччю функціональних відносин або механізмів, що є функціональною апаратно-програмною моделлю МК.

Визначення 4. Механізмом будемо називати процес обробки, передачі, збереження інформації в об'єкті діагностування, що виконується визначеними апаратними засобами МК під управлінням програм.

Повний тест складається з множини послідовностей, які перевіряють кожний механізм МК з урахуванням обмеження, що при синтезі тестів для окремого механізму передбачаються справними всі інші механізми.

У роботі запропоновано метод синтезу функціональних тестів, який є розвитком підходів, представлених у відомих роботах С.Г. Шаршунова, В.П. Чипуліса, J.A. Abraham, S.M. Thatte. Аналіз особливостей функцій і структур сучасних МК дозволяє виділити додатково механізми збереження і передачі даних на регулярних структурах і механізмах адресації для управління фазою вибірки операндів. Для синтезу тестів, що перевіряють механізм збереження і передачі даних, запропоновано використовувати графову модель механізму - граф реєстрових передач (ГРП).

На основі запропонованої моделі ГРП розроблено алгоритм синтезу перевіряючих тестів механізму збереження і передачі шляхом рішення задачі вибору мінімальної множини шляхів ГРП, що покривають всі дуги графа.

Діагностування механізму збереження і передачі даних в оперативній запам'ятовуючій пристрій (ОЗП) здійснюється шляхом перевірки справності комірок пам'яті і правильності прямої і непрямої адресації до резидентного і зовнішнього ОЗП МК. Для синтезу перевіряючих тестів механізму адресації МК запропоновано модель механізму, що зображена узагальненим графом реєстрових передач (УГРП). УГРП складається з вершин ГРП, що використовуються в процесі адресації. Кожна дуга УГРП відзначається номером управляючого сигналу, які ініціює відповідну реєстрову передачу, і номером відносного моменту часу формування цього сигналу.

Несправності механізму адресації включають клас оверлейних помилок і збоїв синхронізації, що приводять до зсуву в часі або пропадання управляючих сигналів, а також до формування управляючих сигналів, що не передбачені механізмом адресації. На основі запро-

понованої моделі УГРП розроблено процедуру синтезу тестів перевірки механізму адресації у вигляді послідовності команд, що формують дані в регістрах механізму і зовнішнього ОЗП.

Рис. 5. Марковська модель ПН:
 a_1 - справний стан МК, a_2, a_3, a_4 - несправні стани, P_{ij} - перехідні імовірності станів

Для діагностування ПН і збоїв у МК запропоновано використовувати Марковську модель ПН, що включає три найбільш ймовірні класи помилок: оверлейні, кодів операції й адресації (рис. 5).

Для діагностування ПН прийняті такі обмеження: тривалість часового інтервалу впливу ПН повинна бути не менше тривалості тестової послідовності; у кожному часовому інтервалі активною може бути тільки одна несправність. Процедура діагностування ПН визначається часом запуску функціональних тестів перевірки справності МК і числом його повторень при заданій імовірності виявлення ПН.

Час запуску визначається в процесі сигнатурного моніторингу.

Центральна гранична теорема для ланцюгів Маркова дозволяє знайти імовірність m -кратної активності ПН за n кроків.

Для випадку мінімального числа появ ПН a_j отримане рівняння

$$\frac{m - np_j}{\sqrt{nb_j}} = -s, \quad (10)$$

де $\alpha = \{p_i\}$, $\beta = \{b_i\}$ - вектори граничних імовірностей p_j і дисперсій b_j числа переходів у стан a_j за n шагів, s вибирається з таблиці значень функції $\Phi(s)$.

Приймаючи $m=2$, з урахуванням введених обмежень, і вирішуючи рівняння (10) відносно n , одержимо число повторень n_j^T тесту L_j у вигляді

$$n_j^T = \frac{1}{4p_j^2} \left(s\sqrt{b_j} + \sqrt{b_j s^2 + 8p_j} \right)^2.$$

Величина n_j^T дорівнює числу тимчасових інтервалів тривалістю L_j , в одному з яких ПН a_j активна щонайменше 1 раз з імовірністю, обумовленою значенням s .

У п'ятому розділі вирішено проблему підвищення відмовостійкості БПСУ ростовими установками на основі концепції сигнатурного моніторингу. Розроблено методи синтезу ДП для функціонального діагностування АСУ ТП із мінімальним латентним часом виявлення помилок і відновлення працездатності СУ, убудованих засобів діагностування з використанням уніфікованих модулів сигнатурного моніторингу: лічильників-таймерів, генераторів тестів, сигнатурно-синдромних аналізаторів. Відзначено, що концепція сигнатурного моніторингу є розвитком методу спостерігачів Люенбергера, для реалізації якого вирішуються три задачі: розбивка управляючих програм МК на сегменти лінійних ділянок; обчислення еталонних сигнатур сегментів, що є алгебраїчними інваріантами і зберігаються в пам'яті ДП; контроль правильності виконання сегментів програми, а також відновлення її працездатності у випадку помилки. Алгебраїчні інваріанти сегментів - це адреса сегмента, контрольні суми команд МК, час виконання сегмента програми.

ДП здійснює сигнатурний моніторинг правильності виконання кожного сегмента про-

грами і правильність переходів від сегмента до сегмента. З появою помилки ДП повертає резидентний процесор до повторного виконання сегмента програми, на якому виявлена помилка. Для обчислення точок повернення запропоновано використовувати графову модель управляючої програми, де вершини - сегменти програм, а дуги - дозволені переходи між сегментами.

Запропоновано метод обчислення точок повернення в різних вершинах програмного графа. Повторне виконання сегментів програми забезпечує відновлення працездатності МК, якщо максимальний латентний період виявлення ПН і її тривалість не перевищують припустимого часу відновлення МК.

Обґрунтовано структуру ДП, що включає регістри, лічильники-таймери, сигнатурні аналізатори, генератори еталонних сигнатур, схеми управління, які розміщуються на одній печатній платі резидентного МК. Обґрунтовано доцільність використання уніфікованих модулів сигнатурного моніторингу для реалізації процедур функціонального і тестового діагностування, здійснюваних у БПСУ ростовими установками в різні періоди часу.

Розроблено метод синтезу генераторів тестових послідовностей (ГТП) на зсувових регістрах з лінійним зворотним зв'язком, що забезпечує більш просту реалізацію ГТП у порівнянні з відомими методами. Обґрунтовано доцільність синтезу лічильників-таймерів, генераторів еталонних сигнатур, ГТП, синдромно-сигнатурних аналізаторів на зсувових регістрах з нелінійними зворотними зв'язками (ЗРНЗЗ).

При синтезі генераторів псевдовичерпних тестів на ЗРНЗЗ запропоновано підхід, заснований на рекурсивному алгоритмі перебування остовних дерев у графі $G_{(k-1)}$ ($k-1$)-розрядного зсувового регістра (ЗР), що породжують гамільтонові цикли в графі G_k (k -розрядного ЗР) з мінімальними апаратними витратами на реалізацію функцій зворотного зв'язку ЗРНЗЗ, у вигляді деревоподібної мережі з логічних елементів (І-НІ, АБО-НІ, ВИКЛ-АБО) без розгалужень.

Визначення 5. Послідовність k -мірних двійкових векторів довжиною 2^k , у якій усі вектори різні, називається лічильниковою.

Розроблено метод синтезу генераторів лічильникових послідовностей і ГТП на ЗРНЗЗ/ЗР. Перші k розрядів ЗР із нелінійною функцією зворотного зв'язку формують 2^k різних двійкових векторів, що через k тактів, визначаючи на кожному такті значення розрядів $(x_{k+1}, x_{k+2}, \dots, x_n)$ у ЗР, зсувуються в ланцюг ЗР. Довжина циклу ЗРНЗЗ дорівнює 2^k , тому максимальна розмірність ланцюга генератора на ЗРНЗЗ/ЗР $n=2^k$.

Теорема 2. Нехай задано схему ГПТ на ЗРНЗЗ/ЗР довжиною в n розрядів, у якому розряди x_1, x_2, \dots, x_k формують повний цикл довжиною 2^k різних двійкових векторів за допомогою функції нелінійної ОС $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, що породжує гамільтонів цикл у k -розрядному ЗР. Якщо початкові стани всіх n розрядів ГПТ збігаються із значеннями функції $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, зсунених на (2^k-i) тактів, то на виходах будь-яких k суміжних розрядів ГПТ формуються 2^k різних тестових наборів за 2^k тактових зсунень регістра.

Теорема 2 визначає умови початкової установки розрядів генераторів псевдовичерпних тестів на основі ЗРНЗЗ/ЗР.

Наслідок 1. Розряди ЗРНЗЗ/ЗР $(x_n, x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$ є суміжними і створюють повний гамільтонів цикл у k -розрядному ЗР.

Показано, що задача синтезу ГТП на ЗРНЗЗ/ЗР для тестування (n, m, k) схем зводиться до перебування мінімального числа максимальних підмножин незалежних вхідних змінних (клік графа ЗР) і знаходження мінімального покриття множини вхідних змінних кліками цього

графа, що забезпечує побудову ГТП мінімальної розмірності з мінімальною довжиною перевіряючої послідовності. На основі запропонованого підходу розроблено алгоритм синтезу генераторів на ЗРН33/ЗР.

Розроблено метод синтезу псевдовипадкових тестів на мережах клітинних автоматів, що легко реалізуються апаратно на ПЛІС типу FPGA і CPLD.

Визначення 6. Мережа клітинних автоматів (МКА), усі клітки якої набудовані тим самим правилом, називається однорідною МКА, у противному випадку МКА називають гібридною.

Рис. 6. Структурна схема об'єктного рівня АСУ ТП установкою "РОСТ"

Визначення 7. Однорідна або гібридна МКА називається адитивною, якщо правила настроювання кліток є класом лінійних функцій. Показано, що адитивні правила настроювання МКА дозволяють

генерувати послідовності різної довжини в залежності від початкових станів кліток і граничних умов. Для аналізу поведінки гібридних МКА запропоновано використовувати матричну модель її структури.

Визначення 8. Квадратна матриця розмірності $L \times L$, що представляє правила настроювання клітинних автоматів мережі, називається характеристичною матрицею МКА, у якій i -ий рядок матриці визначений правилом настроювання i -го клітинного автомата.

Характеристична матриця МКА (надалі T -матриця) дозволяє зобразити функцію переходів автоматної моделі адитивної мережі клітинних автоматів у вигляді:

$$\begin{cases} [f_{t+1}(X) = [T][f_t(X)], \\ \dots \\ [f_{t+n}(X) = [T]^n[f_t(X)], \end{cases} \quad (11)$$

де $f_t(X)$ – стан МКА в момент часу t , а $f_{t+1}(X)$ – стан МКА в момент часу $(t+1)$.

На основі матричних моделей (11) розроблено метод синтезу структур МКА з визначеними правилами настроювання, що генерують послідовності максимальної довжини. Розроблено алгоритм і програму, що обчислює правила еволюції МКА для генерації послідовностей максимальної довжини. Запропоновано метод синтезу лічильникових структур, синдромних аналізаторів, заснований на кодуванні станів їх автоматних моделей, що породжує гамільтонів цикл у графі n -розрядного ЗР. Показано, що застосування розроблених методів і алгоритмів синтезу генераторів тестів для синтезу лічильникових структур дозволяє побудувати схеми, що не перевищують по апаратурних витратах відомі схеми, але, на відміну від останніх, мають мінімальну довжину відрізняючої послідовності з простою процедурою перевірки їхньої справності.

Шостий розділ присвячено аналізу і практичному рішенню найбільш важливих проблем структурної, алгоритмічної і програмно-технічної побудови БПСУ сучасними ростовими установками. На основі аналізу результатів моделювання гідродинаміки бінарного розплаву, тепло- і масопереносу в розплаві і визначення впливу технологічних параметрів на процес вирощування розроблена дворівнева структура БПСУ на основі архітектури "клієнт-сервер" з використанням мінімального числа МК об'єктного рівня АСУ ТП (рис. 6).

Приведено опис структур і алгоритмів функціонування блоків АСУ ТП, розроблених на основі запропонованої концепції управління процесами вирощування великогабаритних

ФМК. ДЗ БПСУ, що здійснює тестове і функціональне діагностування блоків АСУ ТП зовнішніми й убудованими засобами тестового діагностування, сигнатурний моніторинг кожного МК для виявлення перемежованих несправностей, збоїв і відмовлення працездатності АСУ ТП, дозволило підвищити ефективність і якість виробництва, скоротити матеріальні втрати.

Запропоновано використовувати в сучасних ростових установках блоки контролю рівня розплаву, регулювання росту кристалів, у яких, як елемент, що управляє діаметром монокристала і температурою розплаву, використовуються дві модифікації контролера типу РПМ. В регулятор температури розплаву введено функцію самонастроювання ПД-регулятора по кривій нагрівання ОУ, а для визначення коефіцієнтів настроювання регулятора запропоновано використовувати алгоритм Зіглера-Ніколса і Коена-Куна.

Рис. 7. Зміна рівня розплаву на установці "РОСТ" (хрестиком позначені моменти управління)

Розроблено алгоритм визначення моменту початку кристалізації за значенням температурного коефіцієнта зміни активної складової електроопору розплаву, що містить у собі операції виміру температури розплаву і його опору при фіксованих частотах, пошуку резонансної частоти в заданому діапазоні температур розплаву і визначення електроопору з розрахунком його індуктивної і ємнісної складових, шунтуючого опору приелектродного шару та активної складової опору розплаву.

Алгоритм управління ростом кристала із перемінним діаметром засновано на використанні блоків перемінного завдання діаметра кристала і відповідної зміни рівня розплаву. Застосування алгоритму гарантує рівномірну зміну теплових умов і масової швидкості кристалізації, що забезпечує плавну зміну поверхні монокристала протягом усього вирощування і є необхідною умовою одержання бездислокаційних монокристалів. З використанням запропонованих методів і алгоритмів адаптивного управління розроблено АСУ ТП процесом вирощування ЛГК, в основу функціонування якої покладено новий спосіб вирощування монокристала з квазібезперервним витягуванням зразка, безперервним підживленням розплаву і прогнозним управлінням, що самонастроюється за алгоритмом АУП (рис. 7).

Управління вирощуванням кристала починається з включення фонового підживлення розплаву з частотою F_v і здійснюється циклічно. На один робочий цикл t_0 припадає N циклів управління ТП тривалістю t_v . Кожний цикл управління починається з виміру початкового рівня розплаву, після чого кристал перемішують вгору на величину Δh_s . Рівень розплаву в тиглі падає на величину Δh_n . За результатами порівняння Δh_n із заданим значенням Δh_0 визначають помилку управління діаметром кристала Δh_e і змінюють температуру донного нагрівача по АУП алгоритму управління. Значення управляючого впливу на температуру донного нагрівача за період циклу t_v обмежене і не перевищує $\pm 0,4^\circ\text{C}$ при вирощуванні, наприклад, ЛГК діаметром 500 мм.

Після закінчення часу $(N-1) t_v$ починається основне підживлення розплаву початковою сировиною з частотою F_0 . Після досягнення початкового значення рівня розплаву h_0 у тиглі система управління включає фонове підживлення (блок 10 алгоритму). Таким чином, підживлення розплаву ведеться безупинно протягом усього вирощування. При вирощуванні ЛГК діаметром 500 мм тривалість основного підживлення складає 10-12 хв. при тривалості робочого циклу 20-22 хв. Під час основного підживлення продовжується прогнозне управ-

ління ТП із періодом t_v . Цикл управління $t_v \ll t_0$ вибирають з урахуванням динамічних властивостей ОУ.

Застосування цього способу дозволило забезпечити зріст монокристалів ЛГК із швидкістю 3.6-3,8 мм/годину (2.4-2.8 мм/годину до того), високу точність управління діаметром кристала і стабілізацію масової швидкості кристалізації.

Розроблені методи і засоби забезпечили вирощування високоякісних монокристалів з нестабільністю діаметра, який не перевищує 2%, і з рівномірним розподілом домішки по об'єму зразка при її концентрації в діапазоні 0,041-0,056, що гарантувало одержання на їх основі високоякісних детекторів.

У **додатках** приводяться додаткові математичні розрахунки, тексти програмних модулів, результати експериментів, документи про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Підсумком дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення ефективності виробництва великогабаритних ФМК, конкурентоздатних на світовому ринку, шляхом створення та впровадження АСУ ТП, побудованої на основі нової концепції адаптивного управління, сигнатурного моніторингу і використання убудованих засобів діагностування працездатності БПСУ.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи.

1. Аналіз існуючих підходів до побудови АСУ ТП вирощування великогабаритних ФМК показав, що такі особливості процесу кристалізації, як багатомірність і нестационарність об'єкту управління, високий рівень виробничих шумів, широкий діапазон якісних характеристик сировини і невизначеність початкових умов, не дозволяють добитися вирощування високоякісних кристалів з використанням традиційних систем управління, заснованих на детермінованих законах управління. Безперервність та тривалість ТП, помилки та збої систем управління ростовими установками призводять до великих матеріальних втрат, визначають необхідність створення високонадійних й відмовостійких АСУ ТП.

2. На основі нової концепції автоматизації ТП вирощування великогабаритних монокристалів обґрунтовано необхідність розробки БПСУ ростовими установками та розробки методів синтезу адаптивних і відмовостійких систем управління. Створення нового класу БПСУ ростовими установками дозволило підвищити ефективність виробництва конкурентоздатних монокристалів.

3. На основі аналізу задач планування і управління виробництвом високоякісних монокристалів обґрунтовано необхідність дальшого розвитку тривимірних математичних моделей гідродинаміки бінарного розплаву, тепло- і масопереносу в рідкій та твердій фазах. Використання цих моделей дозволило проаналізувати фізичні процеси кристалізації при відсутності осьової симетрії, дослідити поведінку ліній струму розплаву в залежності від температурного поля, швидкості обертання тигля і кристала, розмірів вирощуваного кристала, співвідношення висоти тигля до його ширини, числа Рейнольдса, визначити умови кристалізації для одержання рівномірного розподілу активатора в об'ємі кристала.

4. Запропоновано і формалізовано стохастичну модель процесів кристалізації з зображенням рівнянь Нав'є-Стокса, теплопровідності, дифузії у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь з випадковими коефіцієнтами і випадковою правою частиною. Показано,

що використання в цій моделі підстановки Кармана, лінеаризації і розділення змінних дозволило здійснити перехід до системи лінійних рівнянь і моделювати процеси кристалізації на основі експериментальних даних по розподілу температур на стінках тигля, поверхні розплаву та у підкристальній області, визначити закони змінення параметрів ТП і діапазони, в яких можливе управління із зворотними зв'язками тепловими умовами вирощування та швидкістю витягування кристала, а також програмно-логічне управління рівнем розплаву, швидкостями обертання кристала та тигля і іншими змінними для вирощування високоякісних великогабаритних монокристалів.

5. Проведено аналіз, вибір і обґрунтування використання прогнозного методу для управління процесом вирощування великогабаритних ФМК. Цей метод, заснований на прогнозуванні збурень за результатами попередніх вимірів, дозволяє підвищити точність і якість управління ТП з неповною апріорною і повною поточною інформацією про основні збурення.

Розроблено метод синтезу аперіодичного прогноуючого регулятора, для управління контуром стабілізації діаметра кристала, в якому матриці вхідних, вихідних впливів і збурень обчислюються рекурсивно з використанням інформації, отриманої на кожному кроці управління; при цьому рекурсивна формула розрахунків одночасно задовольняє вимогам ідентифікації системи і рівнянню аперіодичного управління з прогнозуванням. В результаті, при управлінні в реальному режимі часу не відбувається затримки між кроком ідентифікації і кроком обчислення управляючого впливу, що дозволяє підвищити якість управління ТП вирощування ФМК.

6. Розроблено новий метод управління процесом вирощування монокристалів, заснований на використанні додаткових контурів фонового підживлення розплаву для стабілізації теплових умов вирощування і квазібезперервного витягування кристала, показана його ефективність для управління ТП вирощування якісних великогабаритних ФМК.

7. Обґрунтовано і розроблено метод синтезу діагностичного забезпечення БПСУ ростовими установками на основі концепції сигнатурного моніторингу з використанням уніфікованих убудованих програмно – апаратних модулів, які забезпечують діагностування АСУ ТП на системному, функціональному та структурно – логічному рівнях.

8. Запропоновано на системному рівні організації тестового діагностування БПСУ використовувати графові діагностичні моделі Препарата – Метца – Чена. Визначено необхідні та достатні умови t/t_p - S -діагностуємості системи із n модулів з t несправними, серед яких t_p модулів мають перемешовані несправності та S несправних інтерфейсних зв'язків. На підставі цих умов визначено оптимальну t/t_p - S -діагностуєму структуру БПСУ, яка має мінімальне число міжмодульних зв'язків та мінімальний час тестування. Вперше запропоновано графоаналітичну ПМЧ-модель системи управління з модулями, які самотестуються, що дозволяє скоротити час технічного обслуговування БПСУ.

9. Розроблено функціональні моделі мікроконтролерних модулів управління з RISC архітектурою шляхом включення в його структуру зовнішньої пам'яті і портів зв'язку з ОУ, що дозволило відобразити взаємозв'язок програмно-апаратних функцій МК у вигляді механізмів обробки, передачі, зберігання і управління. На основі запропонованої функціональної моделі механізму зберігання і передачі даних у вигляді графа реєстрових передач розроблено алгоритми синтезу тестів, перевіряючих справність механізмів управління передачею даних та вибірки реєстрів, механізмів адресації з резидентної і зовнішньої пам'яті. З використанням Марковської моделі перемешованих несправностей у мікроконтролерних модулях управління розроблено метод розрахунку числа повторень тестових послідовностей на основі апріорних

знань величин перехідних імовірностей станів моделі для виявлення найбільш імовірних помилок контролера – оверлейних, кодів операцій та адресації.

10. Розроблено метод функціонального діагностування мікроконтролерних засобів управління із застосуванням діагностичного процесора. Запропоновано структуру ДП, що функціонує паралельно з управляючими МК. В процесі управління ростовими установками діагностичний процесор перевіряє правильність виконання сегментів управляючої програми шляхом порівняння реальних та еталонних синдромів і сигнатур, здійснює відновлення працездатності МК при появі перемержованих несправностей шляхом повторного "прокручування" сегментів програми, що дозволяє підвищити відмовостійкість систем управління.

11. Розроблено методи синтезу уніфікованих модулів сигнатурного моніторингу лічильників-таймерів, генераторів псевдовипадкових і псевдовичерпних тестів та еталонних сигнатур, сигнатурних і синдромних аналізаторів, які спрощують схемну реалізацію убудованих програмно - технічних засобів тестового і функціонального діагностування БПСУ на сучасних логічних інтегральних схемах, що програмуються, типу FPGA і CPLD.

12. Розроблені методи синтезу відмовостійких АСУ ТП вирощування великогабаритних монокристалів на основі концепції адаптивного і відмовостійкого управління дозволили створити високоефективні системи управління установками "РОСТ" у досвідному виробництві ІСМА НАН України (м. Харків), установками серії "СГВК" Інституту монокристалів НАН України (м. Харків), виробництвом монокристалів тетраборату літія в Інституті фізики НАН України (м. Ужгород). Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (м. Харків).

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рост кристаллов / В.И. Горилецкий, Б.В. Гринев, В.С. Суздаль и др. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с.

Здобувачем запропоновано концепцію проектування і архітектура систем управління для виробництва великогабаритних лужногалоїдних кристалів з урахуванням особливостей процесів їхнього вирощування з розплаву.

2. Абрамова Л.С., Епифанов Ю.М., Корнилич П.И., Суздаль В.С. Автоматизированная установка для многоканального измерения проводимости расплавов // Приборы и техника эксперимента. – М., 1989. - №3. - С. 246-247.

Здобувач запропонував метод управління автоматизованою установкою для багатоканального вимірювання провідності розплаву.

3. Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Абрамова Л.С. Многоканальный измеритель электросопротивления жидких сред // Заводская лаборатория. – М., 1990. - №1. - С. 44-46.

Здобувач розробив метод і алгоритм визначення електроопору розплаву.

4. Рогачев А.И., Суздаль В.С., Абрамова Л.С. Исследование процесса возникновения дефектов при разрезании монокристаллов // Вестник Харьковского политехнического института. – Харьков: ХГУ, 1990. - Вып. 16. - №278. –С.11-13.

Здобувачеві належить аналіз причин виникнення дефектів при різанні кристалів. Ним запропоновано новий алгоритм управління при обробці вирощених кристалів і наявності збурень.

5. Попов Н.Р., Рогачев А.И., Суздаль В.С., Абрамова Л.С. Математическая модель САУ

установки для порезки водорастворимых монокристаллов // Вестник Харьковского политехнического института. - Харьков: ХГУ, 1991. - Вып. 17. - №282. – С. 6-10.

Здобувач здійснив моделювання процесу різання монокристалів.

6. Епифанов Ю.М., Суздаль В.С., Герасимчук Л.И., Комплекс технических средств для исследования свойств расплава // Заводская лаборатория. – М., 1996. - № 5, тем. вып. "Диагностика материалов". - С. 28-31.

Здобувачеві належить розробка структурних схем технічних засобів для дослідження властивостей розплаву при вирощуванні монокристалів.

7. Zaslavsky B.G., Grinev B.V., Suzdal V.S., Kudin A.M., Kisil I.I., Vasetsky S.I., Mitichkin A.I. Automated growing of large alkali halide single crystals // J. Crystal Growth. - 1999. – Vol. 198/199. - P.856-859.

Здобувач розглянув основні проблеми автоматизації процесу вирощування великогабаритних монокристалів із розплаву.

8. Суздаль В.С., Горилецкий В.И., Заславский Б.Г., Герасимчук Л.И., Звягинцев В.Н. Характерные особенности автоматизированного роста больших монокристаллов из расплава // Известия ВУЗ'ов. Материалы электронной техники. – М., 1999. - №2. - С.46-49.

На основі аналізу особливостей процесів вирощування великих монокристалів із розплаву здобувач сформулював вимоги до систем управління ТП вирощування високоякісних кристалів.

9. Bondarenko S.K., Goriletsky V.I., Suzdal V.S. Production of large CsI(Tl) single crystals grown by semicontinuous automated method // Functional materials. - Kharkov, 1999. - Vol. 6, № 2. - P. 380-382.

Здобувач відзначив основні задачі автоматизації виробництва великогабаритних сцинтиляційних монокристалів CsI(Tl).

10. Zaslavsky B.G., Kolotiy O.D., Kisil I.I., Suzdal V.S., Lyakhov V.V. Comparative analysis of thermal conditions at growing of large CsI(Tl) scintillation single crystals by automated pulling from the melt using cylindrical and conical crucibles // Functional materials. - Kharkov, 1999. - Vol .6, № 4. - P.760-766.

Здобувач проаналізував проблеми забезпечення заданих теплових умов при вирощуванні великогабаритних монокристалів у циліндричному і конічному тиглях.

11. Тавровский И.И., Суздаль В.С., Епифанов Ю.М., Стрельников Н.И., Герасимчук Л.И. Цифровой программный регулятор // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 80. - С.7-8.

Здобувачем запропоновано структуру і блок-схему відмовостійких регуляторів для розподілених систем управління процесами вирощування ФМК.

12. Суздаль В.С. Экономико-математические модели в системе обеспечения качества сцинтилляционных монокристаллов // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 83. - С.12-15.

13. Суздаль В.С. Архитектура АСУ ТП получения монокристаллов из расплава // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ, 2000. - Вып. 119. - С.15-18.

14. Суздаль В.С. Автоматизированное управление ростовыми установками // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут ". - Харків: НТУ "ХПІ", 2001. – Вып. 10. - С.379-380.

15. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Математические мо-

дели физических процессов при выращивании монокристаллов методом Чохральского // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЕ, 2001. – №4(17). – С.33-43.

Здобувачем запропоновано використання тривимірних моделей фізичних процесів при кристалізації під час синтезу систем управління технологічними процесами вирощування якісних функціональних монокристалів.

16. Заславский Б.Г., Кисиль И.И., Ляхов В.В., Суздаль В.С., Васецкий С.И. Состояние и перспективы развития автоматизированных методов вытягивания крупных сцинтилляционных щелочногалоидных монокристаллов с заданными свойствами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. – №5. – С.14-19.

Здобувачем обґрунтовано перспективність використання розвинутих алгоритмів управління для підвищення ефективності автоматизованих методів витягування великих монокристалів.

17. Бережная М.А., Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Тавровский И.И., Темников И.Н. Отказоустойчивые системы управления на основе микроконтроллеров // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 12, т.1 - С.218-220.

Здобувачем запропоновано принципи розробки стійких до відмов систем управління на основі мікроконтролерів в сучасних умовах виробництва.

18. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Тавровский И.И., Темников И.Н. Отказоустойчивые микроконтроллеры на основе сигнатурного мониторинга // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 2002. - №4,5 (37). - С.71-73.

Здобувачем запропоновано застосування стійких до відмов мікроконтролерів на основі сигнатурного моніторингу в практиці вирощування функціональних монокристалів із розплаву.

19. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена при выращивании монокристаллов методом Чохральского // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЕ, 2002. – №1(18). – С.12-16.

Здобувач запропонував спосіб використання результатів моделювання процесів тепло-і масообміну при вирощуванні монокристалів методом Чохральського для синтезу систем управління.

20. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Математическое моделирование процессов выращивания монокристаллов с заданными свойствами из расплава // Вестник Херсонского государственного технического университета. – Херсон, 2001. – №3(12). – С. 259-264.

Здобувач вирішив проблему використання математичного моделювання процесу вирощування монокристалів із заданими властивостями із розплаву.

21. Раисов Ю.А., Суздаль В.С., Тавровский И.И. Алгоритм настройки коэффициентов ПИД-регулятора привода движения // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2002. - Вип. 12, т.2 -С.411-412.

Здобувачем запропоновано алгоритм комбінованої настройки ПІД-регулятора при наявності збурень.

22. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Математическая модель термоупругих напряжений при росте кристаллов // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЕ, 2002. – №2(19). – С.27-33.

Здобувачем досліджено математичну модель термопружних напруг при рості кристалів.

23. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Численное моделирование термоупругих напряжений при росте кристаллов // Радиоэлектроника и информатика. – Харьков: ХНУРЕ, 2002. - №3(20). - С.32-37.

Здобувачем обгрунтовано використання запропонованого методу моделювання термопружних напруг для вирішення практичної задачі управління процесом кристалізації методом Чохральського.

24. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Математичне моделювання і чисельний аналіз фізичних процесів при вирощуванні великогабаритних лужно-галоїдних монокристалів // Науковий вісник Інституту економіки та нових технологій "Нові технології". - Кременчук, 2004. - № 1-2 (4-5). - С.135-142.

Здобувач визначив задачі чисельного аналізу фізичних процесів при вирощуванні великогабаритних якісних лужногалоїдних монокристалів.

25. Суздаль В.С., Дербунович Л.В., Герасимчук Л.И., Епифанов Ю.М. Моделирование процесса выращивания крупногабаритных щелочно-галоидных кристаллов методом Чохральского // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №56. - С.111-120.

Здобувач визначив задачі моделювання для синтезу контурів програмно-логічного управління технологічними параметрами ростових установок.

26. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Соболев А.В., Некрасов В.В. Диагностические модели реактивных многопроцессорных систем управления // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: ХарДАЗТ, 2004. - №4,5 (48,49). - С.108 -109.

Здобувач розробив діагностичні моделі реактивних багатопроекторних систем управління при вирощуванні великогабаритних монокристалів.

27. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Бережная М.А., Соболев А.В., Татаренко Д.А. Диагностические модели многопроцессорных систем управления // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - Харків: ХарДАЗТ, 2004. - №6 (50). - С.33-37.

Здобувач розробив діагностичні моделі з самодіагностуванням для реактивних багатопроекторних систем управління.

28. Дербунович Л.В., Суздаль В.С., Соболев А.В. Моделирование динамических систем на сетях клеточных автоматов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №7. - С.52-57.

Здобувач здійснив моделювання динамічних систем на базі клітинних автоматів, які використовуються при вирощуванні великогабаритних монокристалів.

29. Дербунович Л.В., Герасимчук Л.И., Суздаль В.С., Соболев А.В. Прогнозное управление процессом выращивания сцинтилляционных монокристаллов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №17. - С.26-29.

Здобувач реалізував синтез прогнозного управління процесом вирощування сцинтиляційних монокристалів.

30. Епифанов Ю.М., Суздаль В.С., Цуранов А.В. Устройство автоматизированной загрузки шихты к установкам для выращивания монокристаллов корунда методом Вернейля // Сб. науч. тр. "Выращивание, исследование и применение монокристаллов". – Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1985. - № 15. - С.121-124.

Здобувач запропонував метод автоматизованого завантаження шихти на установках для вирощування монокристалів корунду методом Вернейля.

31. Стадник П.Е., Суздаль В.С., Заславский Б.Г. Об автоматизации процессов получения кристаллов больших размеров // Сб. науч. тр. "Получение и свойства кристаллов". - Харьков: ВНИИ монокристаллов, 1986. - №17. - С. 91-105.

Здобувачем досліджено особливості процесів виробництва великогабаритних кристалів, що необхідно для обґрунтованого синтезу ефективної системи управління.

32. Suzdal V.S., Goriletsky V.I., Gerasimchuk L.I. Optimization of algorithmic support for controlling the process of obtaining large-size single crystals from the melt // 11-th IFAC International Workshop. Control applications of optimization. – Saint-Petersburg (Russia). - 2000 - P.257-258.

Здобувачем обґрунтовано необхідність використання оптимальних алгоритмів управління для витягування великих монокристалів.

33. Суздаль В.С., Стадник П.Е. Системы управления процессами получения монокристаллов из расплава // Функциональные материалы для науки и техники. – Харьков: "Институт монокристаллов", 2001. – С.514-526.

Здобувачем здійснено наукове обґрунтування концепції побудови автоматизованих систем управління для важливої галузі народного господарства України - вирощування великогабаритних високоякісних функціональних монокристалів із розплаву.

34. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Математические модели физических процессов при выращивании монокристаллов методом Чохральского // Сб. науч. тр. 1-го международного радиоэлектронного Форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2002). - Ч. II. – Харьков: ХНУРЭ. - 2002. - С. 102-105.

Здобувачем досліджено початкові і граничні умови для моделей фізичних процесів при вирощуванні монокристалів методом Чохральського.

35. Тевяшев А.Д., Суздаль В.С., Бородавко Ю.М., Пелипец А.А. Численное моделирование термоупругих напряжений при росте кристаллов // Сб. науч. тр. 8-ой международной конференции "Теория и техника передачи, приема и обработки информации" (ИИСТ-2002). - Харьков: ХНУРЭ. - 2002. - С. 400-402.

Здобувачем досліджено початкові і граничні умови для математичної моделі термopужних напруг при вирощуванні монокристалів методом Чохральського.

36. Цифровое задающее устройство: А.с. № 983123 СССР, МКИ G 05 В 19/18 / Л.Б. Грищенко, В.С. Суздаль, Н.И. Стрельников, Ю.М. Епифанов (СССР). - №3301029; Заявл. 15.06.81; Опубл. 23.12.82, Бюл. №47. – 1 с.

Здобувач запропонував метод відновлення пристрою при випадкових відключеннях напруги.

37. Уровнемер: А.с. 1093906 СССР, МКИ G 01 F 23/24 / В.С. Суздаль, Ю.М. Епифанов, В.А. Львович, А.В. Радкевич (СССР). - № 2997529/18-10; Заявл. 23.10.80; Опубл. 23.05.84, Бюл. №19. - 1 с.

Здобувачем запропоновано адаптивний алгоритм роботи вимірювача рівня розплаву.

38. Уровнемер: А.с. 1415067 СССР, МКИ G 01 F 23/24 / А.П. Воронов, Ю.М. Епифанов, М.Б. Космына, В.В. Некрасов, В.С. Суздаль (СССР). - № 4141404/24-10; Заявл. 31.10.86; Опубл. 07.08.88, Бюл. № 29. - 1 с.

Здобувач запропонував схему вимірювача рівня розплаву при вирощуванні плівок.

39. Пат. 1589173 РФ, МКИ G 01 N 25/04. Способ определения начала кристаллизации при выращивании кристаллов из раствора – расплава / А.П. Воронов, Ю.М. Епифанов, М.Б. Космына, В.В. Некрасов, В.С. Суздаль (Украина). - №4615320; Заявл. 02.11.88; Опубл. 30.12.93, Бюл. №32 - 1 с.

Здобувач розробив метод вимірювання провідності розплаву.

40. Пат. 2039974 РФ, МКИ G 01 N 25/02. Способ определения начала кристаллизации при выращивании кристаллов из раствора – расплава / Ю.М. Епифанов, В.С. Суздаль, В.Н. Гладкий, В.Д. Бяло (Украина). - № 5044894/25; Заявл. 01.06.92; Опубл. 20.07.95, Бюл. № 20. - 1 с.

Здобувачем досліджено залежність електроопору розплаву від частоти коливань перетворювача при вирощуванні лужно-галоидних монокристалів.

41. Пат. 29080 А Україна, МПК С 30 В 15/20. Пристрій для регулювання росту монокристалів / В.І. Горілецький, Б.В. Гриньов, Ю.М. Єпифанов, С.К. Бондаренко, В.А. Кузнєцов, В.С. Суздаль, Л.І. Герасимчук (Україна). - № 97126470; Заявл. 30.12.97; Надрук. 16.10.2000, Бюл. № 5. - Ч. II. - 1 с.

Здобувач запропонував збільшення кількості управляючих сигналів в одному циклі для підвищення якості регулювання при вирощуванні кристалів.

42. Пат. 30878 А Україна, МПК С 30 В 15/20. Пристрій для регулювання росту монокристалів / Л.І. Герасимчук, В.І. Горілецький, Ю.М. Єпифанов, В.М. Звягінцев, В.А. Кузнєцов, В.С. Суздаль, І.І. Тавровський (Україна). - № 98063101; Заявл. 16.06.98; Надрук. 15.12.2000, Бюл. № 7. - Ч. II. - 1 с.

Здобувач обгрунтував залежність точності регулювання діаметра монокристала від рівня дискретності переміщення кристалотримача.

43. Пат. 43077 А Україна, МПК С 30 В 15/20. Пристрій для регулювання росту монокристалів / В.С.Суздаль, В.І. Горілецький, Л.І. Герасимчук, Ю.М. Єпифанов, В.М. Звягінцев, І.І. Тавровський, М.І. Стрельніков (Україна). - №2001020889; Заявл. 09.02.01; Надрук. 15.11.01, Бюл. № 10. – Кн. 1. – 1 с.

Здобувач запропонував структуру двокаскадного регулятора температури нагрівача із допоміжними зв'язками.

44. Пат. 46475 А Україна, МПК С 30 В 15/20. Пристрій для регулювання росту монокристалів / Л.І. Герасимчук, В.І. Горілецький, Ю.М. Єпифанов, В.М. Звягінцев, М.П. Артеменко, В.С.Суздаль, І.І. Тавровський (Україна). - №2001075253; Заявл. 23.07.01; Надрук. 15.05.02, Бюл. № 5. – Кн. 1. - 1 с.

Здобувач запропонував модель вимірювання рівня розплаву в процесі кристалізації великогабаритних монокристалів.

АНОТАЦІЯ

Суздаль В.С. Синтез відмовостійких автоматизованих систем управління процесами вирощування високоякісних великогабаритних монокристалів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. - Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, Харків, 2005.

Дисертація присвячена синтезу стійких до відмов адаптивних систем управління в галузі одержання великогабаритних функціональних монокристалів (ФМК) високої якості. Розроб-

лено метод аперіодичного прогнозного регулювання при управлінні технологічним процесом вирощування ФМК на основі нового рекурсивного алгоритму. Розроблені графові моделі систем управління із процесорними модулями, які самотестуються, що дозволяє на поведінковому рівні організувати умовні діагностичні експерименти для виявлення в системах управління несправних процесорних модулів і інтерфейсних зв'язків між ними. Розроблені й обґрунтовані методи проектування діагностичного забезпечення систем управління на основі концепції сигнатурного моніторингу. Розроблено новий метод управління процесом вирощування монокристалів, заснований на використанні додаткових контурів фонового підживлення розплава і квазібезперервного витягування кристала, показана його ефективність для управління ТП вирощування якісних великогабаритних ФМК.

Практична реалізація розроблених алгоритмів і методів управління в промисловому виробництві великогабаритних скінтіляційних монокристалів дозволила підвищити якість готової продукції та ефективність виробництва.

Ключові слова: технологічний процес, нестационарний режим роботи, моделювання, алгоритм, адаптивне управління, прогнозне регулювання, діагностичне забезпечення.

АННОТАЦИЯ

Суздаль В.С. Синтез отказоустойчивых автоматизированных систем управления процессами выращивания высококачественных крупногабаритных - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. - Институт скінтіляційних матеріалів НАН України, Харків, 2005.

Диссертация посвящена разработке и обоснованию новых методов автоматизированного управления технологическим процессом получения крупногабаритных функциональных монокристаллов (ФМК) с целью повышения эффективности производства и достижения высоких показателей качества выращиваемых кристаллов. Обоснована необходимость разработки новой концепции адаптивного и отказоустойчивого управления выращиванием ФМК, теоретических и инженерно-технических основ синтеза и проектирования многопроцессорными системами управления (МПСУ) ростовыми установками, устойчивых к фактическому уровню параметрической неопределенности объекта управления, разработки моделей и создание на их основе алгоритмов управления и отказоустойчивых программно-технических средств МПСУ для промышленного производства высококачественных крупногабаритных ФМК.

Проведено моделирование процессов кристаллизации в трехмерном пространстве. Формализация этих моделей и их использование позволяют определить необходимые условия обеспечения равномерности распределения активатора в объеме кристалла и решить ряд других важных задач для синтеза систем управления выращиванием. Получена стохастическая модель процесса кристаллизации, включающая в себя уравнения Навье-Стокса, теплопроводности и диффузии в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений со случайными коэффициентами и случайной правой частью, на основе которой получены оценки влияния технологических параметров ростовых установок на процесс выращивания ФМК.

Обоснован и реализован новый класс МПСУ ростовыми установками с использованием метода аперіодического прогнозного регулирования диаметра кристалла на основе рекур-

сивного алгоритма, в котором формула рекурсии одновременно удовлетворяет требованиям идентификации параметров системы и уравнению аperiodического управления с прогнозированием, что позволяет повысить качество выращиваемых ФМК в условиях промышленного производства. Предложен метод управления процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов, который отличается от существующих введением дополнительных контуров фоновой подпитки расплава и квазинепрерывного вытягивания кристалла, обоснована его эффективность для управления ТП выращивания качественных ФМК

На основе анализа современных методов и программно-аппаратных средств технической диагностики разработаны принципы построения диагностического обеспечения МПСУ ростовыми установками. Разработаны диагностические модели МПСУ поведенческого, функционального и структурно-логического уровней с учетом особенностей управления процессами выращивания ФМК и статистических данных об отказах систем управления. Разработаны графовые модели МПСУ с самотестируемыми процессорными модулями, позволяющие на поведенческом уровне организовать условные диагностические эксперименты для обнаружения в системе управления неисправных процессорных модулей и интерфейсных связей между ними. Разработаны и обоснованы методы синтеза и проектирования диагностического обеспечения МПСУ на основе концепции сигнатурного мониторинга, что позволило осуществить тестовое и функциональное диагностирование МПСУ унифицированными встроенными программно-аппаратными модулями и обеспечить высокий коэффициент готовности и требуемый уровень отказоустойчивости системы управления. Предложен и обоснован метод функционального диагностирования микроконтроллерных устройств управления с применением диагностического процессора, который проверяет правильность выполнения сегментов управляющей программы и осуществляет восстановление работоспособности МПСУ при появлении сбоев и перемежающихся неисправностей.

На основе предложенных моделей, методов, алгоритмов управления и методов синтеза микроконтроллерных систем управления с встроенными средствами тестового и функционального диагностирования модулями сигнатурного мониторинга разработан комплекс программно-технических средств МПСУ ростовыми установками, внедрение и эксплуатация которых обеспечивает получение ФМК высокого качества в промышленных условиях.

Ключевые слова: технологический процесс, нестационарный режим работы, моделирование, алгоритм, адаптивное управление, прогнозное регулирование, диагностическое обеспечение.

ABSTRACT

Suzdal V.S. Synthesis fault-tolerant automated control system of process by growing high-quality large-size monocrystals. – Manuscript.

Thesis for a doctor degree of technical science on specialty 05.13.07 – automation of technological processes. - Institute for Scintillation Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, 2005.

The thesis is devoted to development and a substantiation of methodology of design of fault-tolerant adaptive control systems in the field of growing large-sized functional single crystals. The method of adaptive predictive control is developed at control of a process of growing functional single crystals on the basis of new recursive algorithm in which the formula of a recursion simultaneously meets the requirements of identification of system and to the equation of the aperiodic con-

trol with prediction. Are developed graph models of control systems with the self-adjustable processor units, allowing at a behavioral level to organize the conditional and unconditional diagnostic experiments for detection in control systems faulty processor units and the interface connections between them.

Methods of a synthesis and design of diagnostic provision control systems on the basis of the concept of signature monitoring are developed and justified. The new method of single-crystal growth with application of the level detector of melt, background additional charging of melt, the quasicontinuous pulling of the chip is offered and efficiency of its application for control process growing large-sized functional single crystals is justified.

Practical implementation of the developed algorithms and methods of control in industrial production large-sized scintillation single crystals has allowed to boost fault tolerance and accuracy control systems that has ensured the boosted quality level of a finished product of the factory-manufacturer.

Keywords: technological process, non-stationary mode of operation, modeling, algorithm, adaptive control, prediction adjusting, diagnostic assurance.