

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Тавровський Ігор Ігорович

УДК 621.3.078.3

**СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ЗАДАНОЇ
СТРУКТУРИ ДЛЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий керівник

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Суздаль Віктор Семенович,
 Інститут сцинтиляційних матеріалів
 НАН України, м. Харків,
 провідний науковий співробітник
 відділу технологій вирощування
 монокристалів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Канюк Геннадій Іванович,
 Українська інженерно-педагогічна
 Академія, м. Харків, завідувач
 кафедри теплоенергетики
 і енергозбереження

доктор технічних наук, професор
Рогачов Олександр Іванович,
 Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 м. Харків, професор кафедри автоматики
 і управління в технічних системах

Захист відбудеться 19 травня 2011 р. о 14–30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61022, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « » _____ 2011 р.

Вчений секретар
 спеціалізованої вченої ради

Северин В. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку автоматизації процесів виробництва скінтіляційних монокристалів (СМК) показує, що нагальним залишається підвищення якості скінтіляторів в умовах зростаючих вимог до їх властивостей та зростаючого попиту. Одним із шляхів вирішення цього завдання є підвищення ефективності процесу керування з урахуванням характерних особливостей об'єкта керування (ОК). Для систем керування вирощуванням великогабаритних монокристалів з таким об'єктом керування як процес кристалізації, який триває досить довгий час і параметри якого змінюються, доцільно застосування робастних регуляторів заданої структури. Такі регулятори забезпечують стійкість системи керування (СК) та суттєво підвищують її якість і відмовостійкість.

Підвищення ефективності систем керування виробництвом СМК та їх стійкості до фактично наявного рівня невизначеності може бути забезпечено шляхом побудови моделей процесу кристалізації, розвитку наукових та інженерно-технічних засобів синтезу робастних регуляторів, створенням комплексу програмно-технічних засобів забезпечення відмовостійкості, що й визначає актуальність теми дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Інституті скінтіляційних матеріалів (ІСМА) НАН України у відповідності з госпдоговірною роботою ІСМА в області розвитку методів проектування СК виробництвом великогабаритних СМК, з науково-дослідними роботами, фінансованими Національною академією наук України: "Розробка комплексу мікропроцесорних технічних засобів контролю й регулювання рівня розплаву при вирощуванні скінтіляційних монокристалів" (ДР № 0101U006612); "Розробка нової системи й алгоритмів автоматизованого керування вирощуванням великогабаритних кристалів" (ДР № 0103U003476); "Дослідження процесів тепло- і масопереносу при вирощуванні великогабаритних лужногалоїдних скінтіляційних монокристалів" (ДР № 0104U006375); договору № А/2.2-08 відповідно до Державної цільової науково-технічної програми «Розробка та освоєння мікроелектронних технологій, організація серійного випуску приладів і систем на їх базі» (Постанова Кабінету Міністрів України від 21.11.07 №1355 і розпорядження Президії НАН України від 13.12.07 р. №806 та від 31.01.08 р. №111), у яких здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у розробці методу синтезу робастних регуляторів заданої структури й моделей процесу кристалізації для підвищення якості керування і відмовостійкості системи керування процесом вирощування скінтіляційних монокристалів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

- 1) аналіз стану та тенденцій розвитку автоматизації процесів керування вирощуванням СМК і обґрунтування необхідності розробки робастних методів оптимізації процесу керування кристалізацією в промислових умовах;
- 2) розробка математичних моделей процесів кристалізації крупногабаритних монокристалів для синтезу робастних регуляторів;

3) розробка метода синтезу робастного регулятора заданої структури, що забезпечує робастну стійкість керування на різних інтервалах часу вирощування кристала;

4) формулювання критерію якості керування процесом кристалізації та знаходження параметрів регулятора, які забезпечують робастну якість керування, враховуючи обмеження, накладені умовою робастної стійкості;

5) розробка моделей та алгоритмів функціонального діагностування на основі сигнатурного моніторингу для багатопроцесорних СК вирощуванням;

6) синтез робастного ПІ-регулятора для системи керування вирощуванням скінтіляційних монокристалів.

Об'єкт дослідження: процеси в системах автоматизованого керування вирощуванням великогабаритних скінтіляційних монокристалів.

Предмет дослідження: моделі та методи робастного керування процесами вирощування великогабаритних скінтіляційних монокристалів.

Методи досліджень. Фундаментальні положення теорії автоматичного керування, теорія операційного обчислення використовувались для розробки і дослідження показників якості систем автоматичного керування вирощуванням скінтіляційних монокристалів. Використані методи ідентифікації для моделювання об'єкта керування на основі вхід-вихідних даних вирощування, методи простору станів та методи передавальних функцій використовувались для оцінки рівня невизначеності моделі процесу кристалізації, методи робастного керування, зокрема, методи H_∞ оптимізації – для вибору, обґрунтування й проектування систем і алгоритмів керування процесами одержання скінтіляційних монокристалів; методи технічної діагностики застосовані для організації діагностичних експериментів у багатопроцесорних системах керування (БПСК), розробки концепції сигнатурного моніторингу й вбудованих програмно-технічних засобів діагностування, методи теорії графів використані при розробці діагностичних графових моделей БПСК. Оцінка ефективності застосування розроблених методів здійснена на основі статистичного аналізу експериментальних даних, отриманих у виробничих умовах і виконаного в середовищі MATLAB.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат дисертації полягає в обґрунтуванні й розробці робастного підходу до синтезу регулятора заданої структури та оптимізації на базі цього процесу керування вирощуванням СК в умовах стохастичності, нестационарності та наявності невизначеності в моделі об'єкта керування.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

1) одержали подальший розвиток математичні моделі стохастичного процесу кристалізації скінтіляційних монокристалів, представлені різницевиими рівняннями з дискретним часом, що дозволяє в промислових умовах ідентифікувати об'єкт керування на основі аналізу вхідних та вихідних даних процесу вирощування в режимі нормальної експлуатації;

2) вперше запропоновано синтезувати робастний регулятор заданої структури для керування діаметром вирощуваного СМК на основі методу H_{∞} оптимізації, що дозволило одержати реалізований регулятор з робастною якістю керування й робастною стійкістю на кожному інтервалі часу вирощування кристала;

3) одержав подальший розвиток частотний критерій якості керування процесом кристалізації, визначений як зважена сума квадратів помилок між заданими й обчисленими значеннями модуля границі й додаткового модуля границі як функцій номінальної чутливості й номінальної додаткової чутливості системи керування, відповідно;

4) вперше запропонована структурна схема діагностичного ядра, що реалізує функціональне діагностування багатопроцесорної системи керування на основі концепції сигнатурного моніторингу, алгоритмів оптимального розміщення контрольних точок і відновлення працездатності системи у випадку появи несправностей і збоїв;

5) одержав подальший розвиток алгоритм уведення контрольних точок у керуючу програму з урахуванням обмежень для програм реального часу, розвинені алгоритми розміщення контрольних точок для програм з фіксованим та змінюючимся розміром стану керуючої програми, що дозволяє підвищити ефективність функціонального діагностування в СК вирощуванням СМК;

б) вперше проведений синтез ПІ-регулятора для системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів, практична експлуатація якого на різних інтервалах кристалізації показала, що оптимізація настроювання ПІ-регулятора на основі робастного підходу дозволила збільшити точність стабілізації діаметра вирощуваного великогабаритного монокристалу і поліпшити якість монокристалів за рахунок стабілізації швидкості росту;

7) вперше запропонований спосіб вирощування монокристалів із застосуванням датчика рівня розплаву, фоновим підживленням розплаву, квазібезперервним витягуванням кристала й обґрунтована ефективність його застосування для керування процесами вирощування СМК (підтверджено патентом 81196 України).

Практичне значення одержаних результатів. Для галузі виробництва великогабаритних монокристалів практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

– проведений синтез робастного ПІ-регулятора для системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів, який забезпечує оптимальне керування процесом кристалізації на всіх інтервалах росту;

– розроблені алгоритми та програмні засоби для функціонального діагностування багатопроцесорної системи керування вирощуванням монокристалів методом контрольних точок з урахуванням обмежень для програм реального часу, що суттєво підвищило відмовостійкість систем керування та ефективність відновлення працездатності;

– розроблена структурна схема регулятора РПМФД, практична експлуатація якого на різних інтервалах кристалізації показала, що оптимізація настроювання ПІ-регулятора на основі робастного підходу дозволила

збільшити точність стабілізації діаметра вирощуваного СМК і поліпшити якість монокристалів.

Розроблені методи, моделі та програми для синтезу робастних регуляторів заданої структури впроваджені у виробництві сцинтиляційних матеріалів на промислових установках «РОСТ» в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно, серед них – критерії оптимальності систем керування для моделей кристалізації з неструктурною невизначеністю, математичні моделі об'єкта керування для різних інтервалів часу вирощування, розробка алгоритмічних, інструментальних і програмних засобів забезпечення функціонального діагностування й відновлення працездатності для багатопроекторних систем керування, синтез робастних регуляторів заданого порядку для інтервалів процесу кристалізації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення й результати роботи доповідалися й обговорювалися на: IX Національній науковій конференції по росту кристалів «НКРК-2000» (м. Харків, 2000), Внутрішній конференції кристалічні матеріали «ІССМ'2005» (м. Харків, 2005), 3 Національній науковій конференції «Функціональна компонентна база мікро-, опто- та наноелектроніки» (м. Кацівелі, 2010).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 17 наукових працях, з них 13 – у фахових наукових виданнях ВАК України, та 3 патенти України.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок, включаючи 40 рисунків по тексту, 10 таблиць по тексту, 3 додатка на 7 сторінках, 129 найменувань використаних джерел на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дослідження, сформульована мета і визначені основні задачі роботи, дана характеристика наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів, приведені відомості з практичного значення та апробації основних результатів роботи.

У **першому розділі** проведений аналіз сучасного стану й тенденцій розвитку процесів керування вирощуванням великогабаритних сцинтиляційних монокристалів з розплаву. Розглянуті особливості технологічних установок, на яких практично реалізовані процеси керованої кристалізації на затравку методом Чохральського з використанням для управління інформації про стан рівня розплаву в тиглі. Проаналізовані особливості процесу вирощування великогабаритних монокристалів як об'єкта керування. Показано, що ріст великогабаритних монокристалів відбувається при постійній зміні теплових умов. Практичний досвід вирощування СМК із використанням ПД-алгоритмів керування показує, що їх використання не вирішує повною мірою завдання якісного керування процесом кристалізації через наявність невизначеності в

описі об'єкта керування й недостатньої робастності цих алгоритмів, що приводить до економічних втрат при виробництві монокристалів.

Обґрунтована необхідність підвищення якості керування процесом кристалізації. Для цього запропоновано розробити методи синтезу робастних регуляторів заданої структури на основі методу норми H_∞ . Основою математичного забезпечення таких регуляторів повинні стати моделі й критерії робастного регулювання, розроблені з урахуванням нестационарності процесу кристалізації СМК, невизначеності в моделі об'єкта керування та зовнішніх збурень.

Другий розділ присвячений проблемі синтезу робастного регулятора заданої структури методом норми H_∞ . Розвинений частотний критерій якості керування з використанням норм H_∞ функцій чутливості й додаткової чутливості. Використовуючи визначення абсолютного й відносного збурення моделі об'єкта керування, припустимий діапазон збурень задан за допомогою дрібно-раціональної вагової функції $\Delta_p(s) = [P(s) - P_n(s)][P_n(s)W_d(s)]^{-1}$, де $\Delta_p(s)$ – зважена відносна невизначеність, $P(s)$ і $P_n(s)$ – збурена й номінальна модель об'єкта керування відповідно, $W_d(s)$ – вагова функція. Невизначеність включена у зворотний зв'язок замкненого контуру керування у вигляді мультиплікативних збурень на вході об'єкта, як показано на рис. 1, де $K(s)$ – передавальна функція регулятора. Таким чином, передавальна функція розімкненого контуру може бути записана у вигляді $M(s) = P_n(s)W_d(s)K(s)[1 + P_n(s)K(s)]^{-1}$, і, відповідно, умова робастності

$$\|M(s)\|_\infty < 1. \quad (1)$$

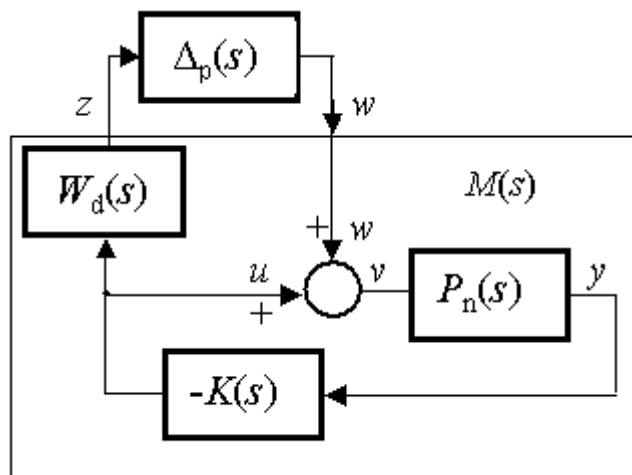


Рис. 1. Блок-схема замкненої системи з мультиплікативним збуренням моделі об'єкта керування на його вході

Для досягнення необхідного рівня якості керування обрані параметри синтезу регулятора $M_m(s) = \|S(s)\|_\infty^{-1}$ та $M_c = \|T(s)\|_\infty^{-1}$, де $S(s) = (1 + L(s))^{-1}$ –

функція номінальної чутливості замкненого контуру, $T(s) = \frac{L(s)}{1+L(s)}$ – функція номінальної додаткової чутливості замкненого контуру, $L(s) = K(s)P_n(s)$ – передавальна функція розімкнутого контуру керування. Сформульований критерій синтезу регулятора

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \left(\lambda_1 (M_m(\theta) - M_m^*)^2 + \lambda_2 (M_c(\theta) - M_c^*)^2 + \lambda_3 (\omega_c(\theta) - \omega_c^*)^2 \right), \quad (2)$$

де θ – вектор параметрів регулятора, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – вагові коефіцієнти, M_m і M_m^* – відповідно дійсне й задане значення модуля границі. M_c і M_c^* – дійсне й задане значення додаткового модуля границі. Таким чином, проблема якості керування робастним регулятором повинна вирішуватися для номінального $P_n(s)$ й збуреного $P(s)$ об'єктів керування шляхом мінімізації частотного критерію (2).

Для ідентифікації моделі ОК запропоновано використовувати ARMAX модель

$$y(k) = \sum_{j=1}^{m_1} A_j y(k-j) + \sum_{j=1}^{m_3} G_j u(k-j) + w(k) + \sum_{j=1}^{m_2} D_j w(k-j),$$

де y, w, u – вихід об'єкта, збурення й керування відповідно, A_j, G_j, D_j, F_j – дійсні числа.

Кристалізація великогабаритних СМК відбувається при зміні теплових умов, які залежать від довжини зростаючого зразка, як показано на рис. 2. У роботі запропоновано процес вирощування СМК на установках типу «РОСТ» умовно розбити на три інтервали, у кожному з яких теплові умови вирощування можна вважати квазістаціонарними. Ділянки, відповідні до росту кристала усередині тигля, виходу кристала з тигля й росту кристала за межами тигля показані на рис. 3. У процесі вирощування монокристала CsI(Na) діаметром 310 мм на установці «РОСТ» отримані дані зв'язку вхідних та вихідних сигналів (температура донного нагрівача – поточний діаметр монокристала), на основі яких були отримані моделі об'єкта керування для трьох інтервалів вирощування. Для кожного інтервалу ідентифікувалася модель кристалізації в двох точках. Одна із цих моделей вибиралася як номінальна P_n , інша – як збурена P . Для кожного інтервалу в підобласті, що задовольняє обмеженням по робастній стійкості (1), визначалася точка з оптимальними параметрами регулятора, що мінімізувала частотний критерій якості (2) шляхом послідовних наближень.

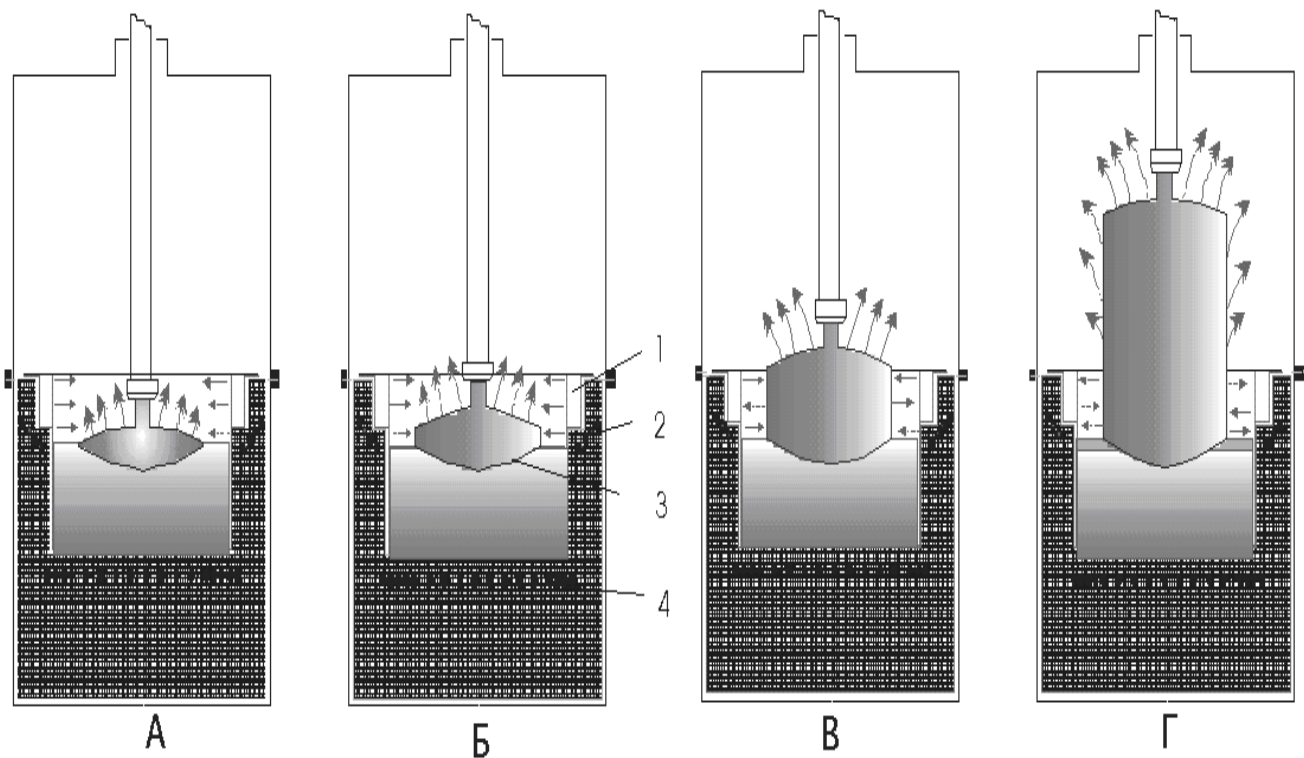


Рис. 2 Схема зміни температурних умов в установках «РОСТ» на різних стадіях росту великогабаритного кристала

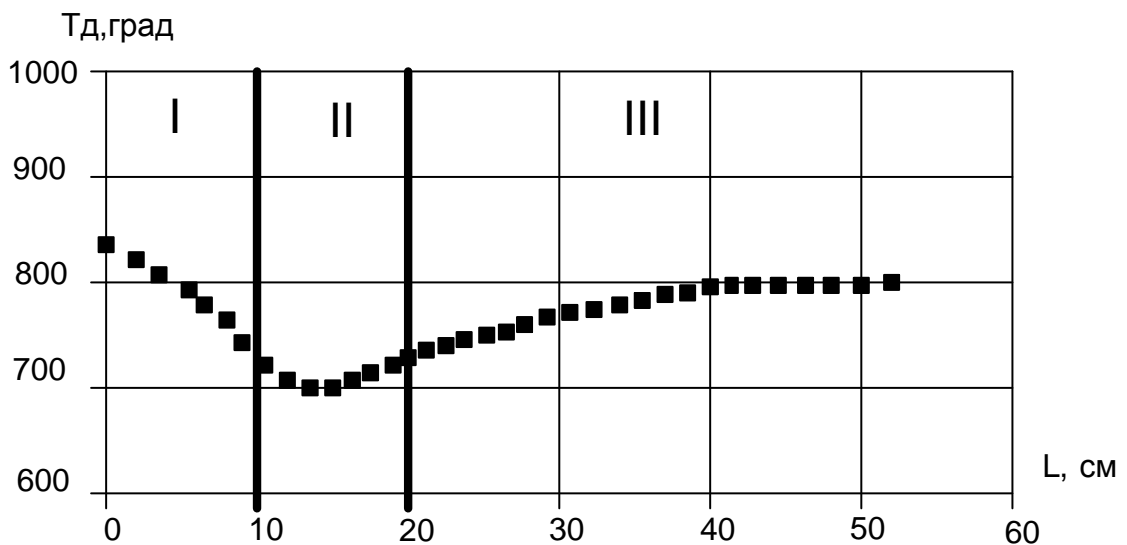


Рис. 3. Інтервали вирощування

У **третьому розділі** для розв'язання задачі забезпечення високої відмовостійкості СК кристалізацією запропоновано використання функціональних методів діагностування на основі концепції сигнатурного моніторингу керуючої програми мікроконтролера (МК). Реалізація функціонального діагностування зроблена методом контрольних точок (КТ), що полягає у введенні в керуючу програму КТ C_i (рис. 4), у яких проводиться:

- обчислення сигнатури пройденої ділянки (сегмента) програми;
- порівняння отриманої сигнатури з еталонною;

– відкат програми до попередньої контрольної точки й відновлення її стану у випадку виявлення збою;

– збереження поточного стану керуючої програми й продовження виконання при відсутності збою.

У якості сигнатури запропоновано використовувати час виконання ділянки.

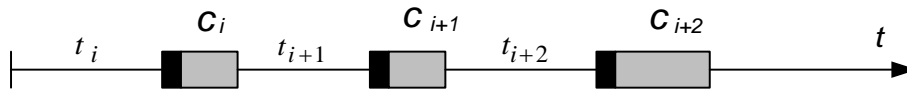


Рис. 4. Метод контрольних точок

Уведене поняття вартості КТ як часових витрат, необхідних для реалізації її функцій. Для аналізу ефективності розміщення КТ застосований коефіцієнт втрат

$$R = \frac{\bar{T} - t}{t} = \frac{\bar{T}}{t} - 1.$$

Виходячи з технічних характеристик МК, застосованих у багатопроекторній системі керування вирощуванням, визначені можливі розміри стану керуючої програми. Розглянуті наступні випадки:

– стан програми МК у будь-який теперішній момент часу не перевищує деякої величини s_0 , тобто вартість уведення контрольних точок \bar{c} , не змінюється з часом;

– керуюча програми МК має два можливі розміри стану, s_1 і s_2 , таких що $s_1 < s_2$ й вартість уведення контрольної точки при стані $s_1 - c_1$, $s_2 - c_2$. Вартості точок були визначені виходячи з технічних характеристик контролерів, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики контролерів

Тип	ОЗП (б)	ПЗП (Кб)	ЕЕПРОМ (б)	Регістрів
Atmega128	4096	128	4096	32
Atmega162	1024	16	512	32

Інтервал між КТ впливає на час виконання програми. З одного боку, розміщення більшої кількості контрольних точок і скорочення інтервалу між контрольними точками зменшує час відновлення після відмов. З іншого боку, КТ мають пов'язану з ними «вартість» (втрати продуктивності), тому, вставляючи більше КТ, ми збільшуємо їхню загальну вартість і час виконання програми. Співвідношення між збільшенням часу виконання керуючої програми й зменшенням часу відновлення після помилок приводить до

оптимальної стратегії розміщення КТ, яка оптимізує продуктивність. Для випадку з фіксованою вартістю контрольної точки був визначений оптимальний інтервал \tilde{t}

$$\tilde{t} \cong \sqrt{\frac{2\bar{c}}{\lambda}},$$

де \bar{c} – вартість контрольної точки, λ – інтенсивність відмов у системі керування. Для випадку зі змінюваною вартістю контрольної точки алгоритм динамічного розміщення контрольних точок полягає в наступному. Попередньо визначається два періоди часу t_1 й t_2 , таких, що $t_1 < t_2$. Контрольну точку поміщають у момент часу t , де t – час починаючи з останньої контрольної точки, згідно з наступними правилами:

- 1) якщо $t < t_1$ не розміщає;
- 2) якщо $t_1 \leq t < t_2$ й розмір стану s_1 , поміщає контрольну точку в t ;
- 3) якщо $t = t_2$, поміщає контрольну точку в t . Вартість контрольної точки – c_2 . Середній коефіцієнт втрат для цього випадку:

$$R = \frac{e^{\lambda t_1} + \frac{\lambda p_2}{\lambda - \mu_2} (e^{\lambda t_2} - e^{\lambda t_1 + \mu_2 (t_2 - t_1)}) - 1}{\lambda (t_1 + \frac{e^{\mu_2} (t_2 - t_1) - 1}{\mu_2} p_2)} + \frac{(1 - p_2)c_1 + p_2 c_2}{t_1 + \frac{e^{\mu_2} (t_2 - t_1) - 1}{\mu_2} p_2},$$

$$p_2 = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} \times \frac{e^{\mu_2 t_1} - e^{-\mu_1 t_1}}{e^{\mu_2 t_2} - e^{-\mu_1 t_1}},$$

де c_1, c_2 – вартості контрольних точок, μ_1, μ_2 – частоти покидання вартостей згідно з ланцюгом Маркова із двома станами. Таким чином, маючи $\lambda, \mu_1, \mu_2, c_1, c_2$ можна одержати чисельні значення t_1 і t_2 й мінімізувати співвідношення втрат R .

Інтенсивності виявлених небезпечних відмов для функціональних підсистем СК вирощуванням великогабаритних скінтіляційних монокристалів на установці «РОСТ», і розраховані на їхній основі інтенсивності відмов наведено в таблиці 2.

На рис. 5 наведена структурна схема діагностичного ядра системи керування установкою «РОСТ», що реалізує описаний вище алгоритм розміщення й обробки контрольних точок, де РПМ – реєстр поточної мітки, РКМ – реєстр контрольної мітки, БК – блок керування, ЗП – запам'ятовувальний пристрій, ЛчТ - лічильник-таймер, РЕС – реєстр еталонної сигнатури, СхПр – схема порівняння.

Інтенсивність відмов для функціональних підсистем установки «РОСТ»

Підсистема	Інтенсивність виявлених небезпечних відмов, 1/г.	Інтенсивність відмов для діагностичного покриття 60%, 1/г.
Підсистема датчиків	0.0132	0.0158
Логічна підсистема	0.013	0.0156
Підсистема виконавчих елементів	0.002	0.0024

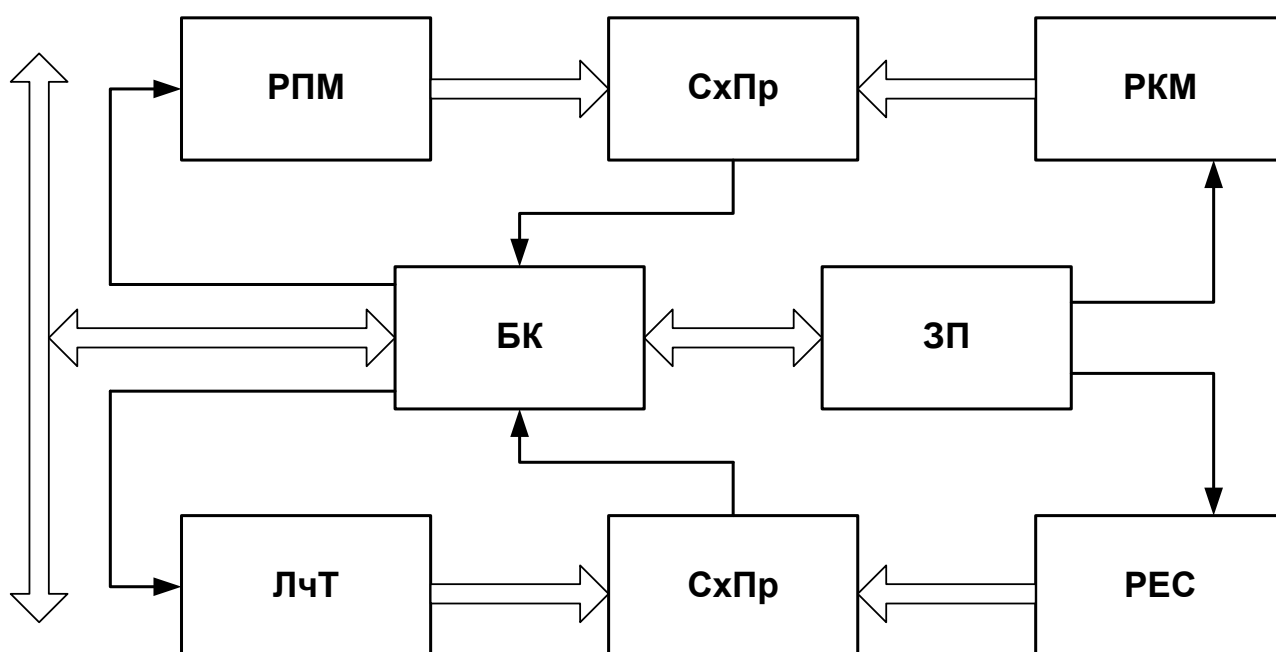


Рис. 5. Структурна схема діагностичного ядра

Четвертий розділ присвячений питанням практичної реалізації синтезу робастного регулятора заданої структури й забезпечення відмовостійкості системи керування за допомогою функціонального діагностування. Запропонована й проведена розробка нового контролера РПМФД для системи керування кристалізацією з високим рівнем відмовостійкості, структурна схема якого наведена на рис. 6, у якому для забезпечення необхідного рівня відмовостійкості використана концепція сигнатурного моніторингу. До складу контролера РПМФД входять: КП – комунікаційний порт, ПВВ – порти вводу-виводу, АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ОЗП – оперативна пам'ять, ДЯ – діагностичне ядро, ПЛ – програмна логіка, ПВ – пристрій відображення (дисплей), ПУ – пристрій введення (клавіатура).

Здобувачем розроблений програмний продукт “Монітор задач” (МЗ) для використання в системі керування вирощуванням великогабаритних

сцинтиляційних монокристалів. Програмний продукт МЗ являє собою інструмент для створення програм мікроконтролерів, що працюють у режимі реального часу, й організації функціонального контролю правильності їх виконання. Для керування виконанням завдань (сегментів) програми створюється набір системних прапорів, кожному з яких ставиться у відповідність спеціальним чином організована область оперативної пам'яті. Програма мікроконтролера створюється у вигляді набору окремих задач (сегментів), що реалізують необхідні алгоритми обробки подій і даних. Набір системних прапорів визначає собою набір подій, що вимагають обробки. МЗ надає механізм включення підпрограми в набір виконуваних завдань шляхом прив'язки завдань до системного прапора із завданням дільника частоти виконання; видалення підпрограми з набору виконуваних підпрограм і зміна параметрів запуску підпрограми. Кожному системному прапору відповідає область, яка містить описи всіх завдань, прив'язаних до цього системного прапора.

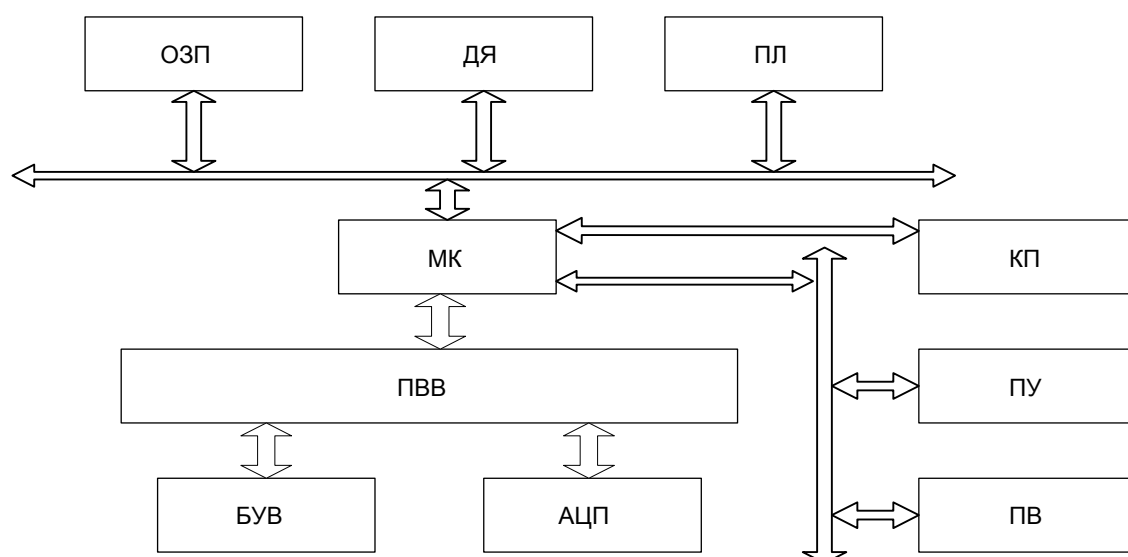


Рис 6. Структурна схема контролера РПМФД

Проведений синтез робастного регулятора для автоматизації керування вирощуванням СМК на установці «РОСТ». Ідентифікація моделі ОК проводилася основі даних вирощування монокристала CsI(Na) діаметром 310 мм на трьох інтервалах вирощування: росту кристала до виходу його з тигля, росту кристала в процесі виходу з тигля і росту кристала після виходу його з тигля до закінчення вирощування.

Для першого інтервалу вирощування номінальна передавальна функція

$$P_n = \frac{0.2246s + 1.1 \cdot 10^{-3}}{s + 5.82 \cdot 10^{-4}}$$

Збурена передавальна функція

$$P = \frac{0.3214s^2 + 0.006714s + 3.784 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.02297s + 1.11 \cdot 10^{-4}}.$$

На рис. 7–9 наведені результати синтезу робастного регулятора для системи керування з номінальною P_n (суцільна лінія) та збуреною P передатними функціями об'єкта керування. Оптимальні параметри ПІ регулятора для першого інтервалу вирощування $K_p = 0.67$, $T_i = 150$. Результати синтезу показують, що на першому інтервалі вирощування в системі керування з оптимальними параметрами ПІ регулятора перерегулювання не перевищує 22% і якісні показники цілком прийнятні для системи керування вирощуванням. Низькочастотні збурювання й високочастотні шуми добре пригнічуються.

Значення запасів по фазі Pm наступні:

- для СК з номінальною передавальною функцією $Pm = 144.51$,
- для СК з обуреною передавальною функцією $Pm = 118.56$.

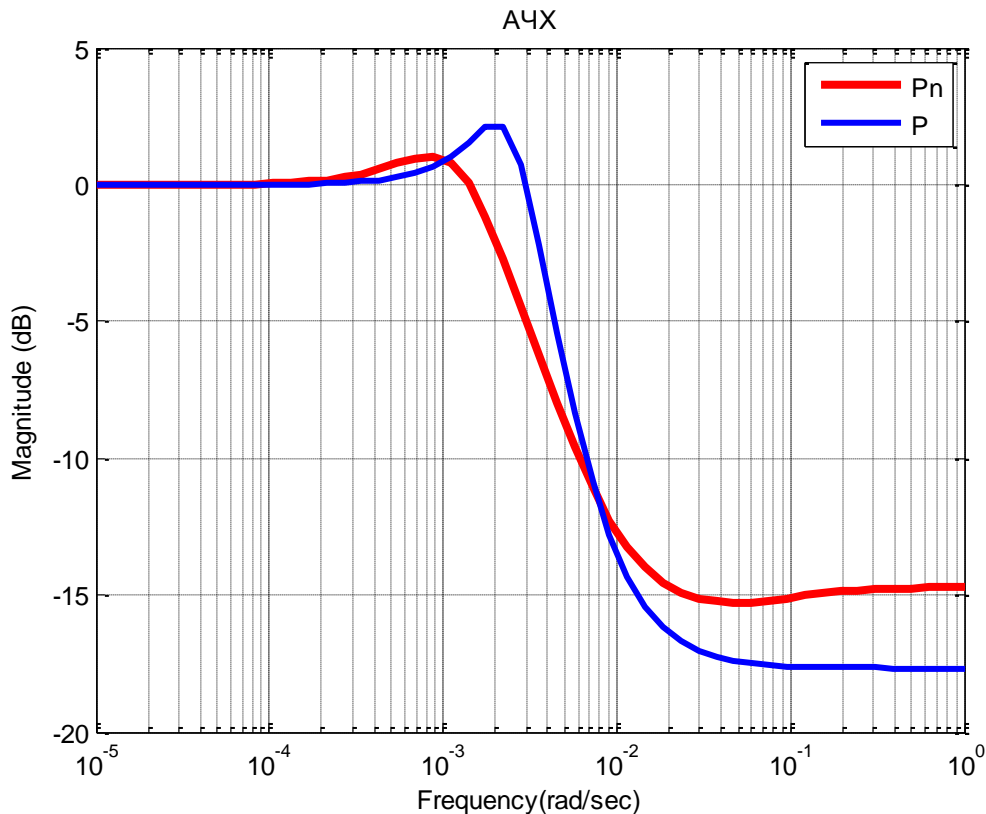


Рис. 7. АЧХ функції додаткової чутливості замкненої системи з P_n і P

Для другого інтервалу вирощування номінальна передавальна функція

$$P_n = \frac{0.3561s^2 + 0.00572s + 1.285 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.02228s + 1.133 \cdot 10^{-5}}.$$

Збурена передавальна функція

$$P = \frac{0.4459s^2 + 0.006584s + 1.651 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.03022s + 7.427 \cdot 10^{-7}}$$

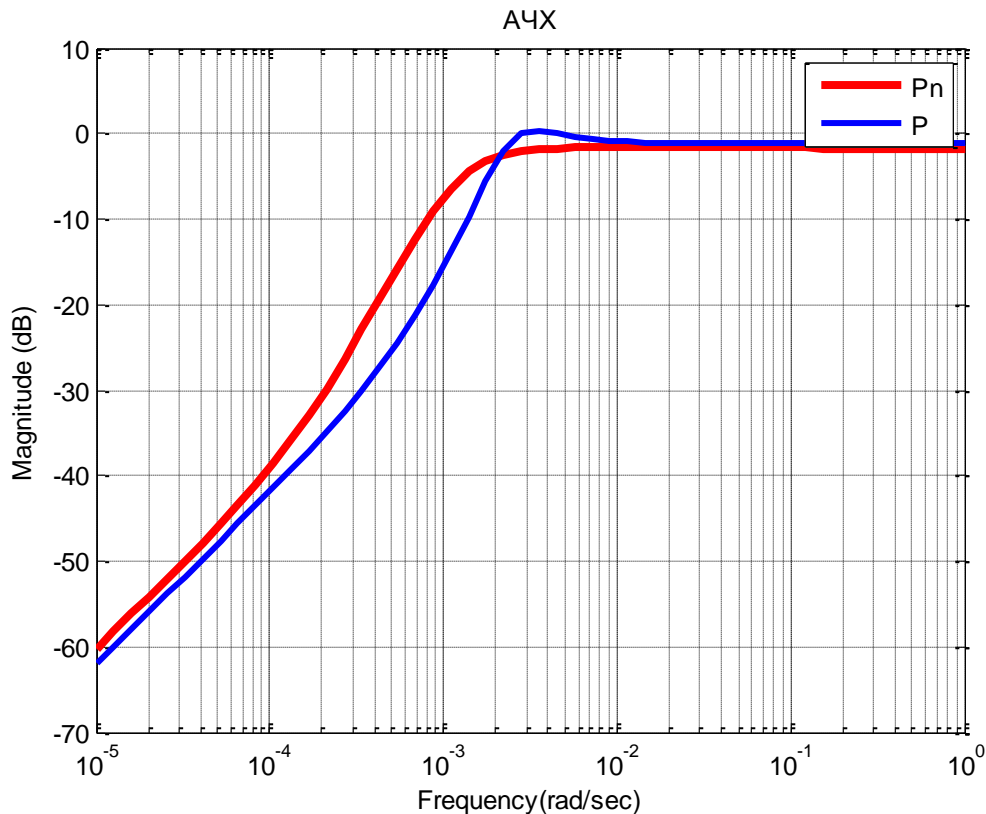


Рис. 8. АЧХ функції чутливості системи з P_n і P

Оптимальні параметри ПІ регулятора для другого інтервалу вирошування $K_p = 1.72$, $T_i = 130$ с.

Для третього інтервалу вирошування отримана наступна номінальна передавальна функція

$$P_n = \frac{0.5083s^2 + 0.0011662s + 2.184 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.008183s - 4.577 \cdot 10^{-6}}$$

Збурена передавальна функція

$$P = \frac{0.3844s^3 + 0.008686s^2 + 5.839 \cdot 10^{-5}s + 9.976 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.01739s^2 + 8.002 \cdot 10^{-5}s + 6.121 \cdot 10^{-8}}$$

Практичні результати щодо параметрів монокристалів, отримані при експлуатації синтезованого регулятора на установці «РОСТ» протягом 2010 року, наведені в таблиці 3.

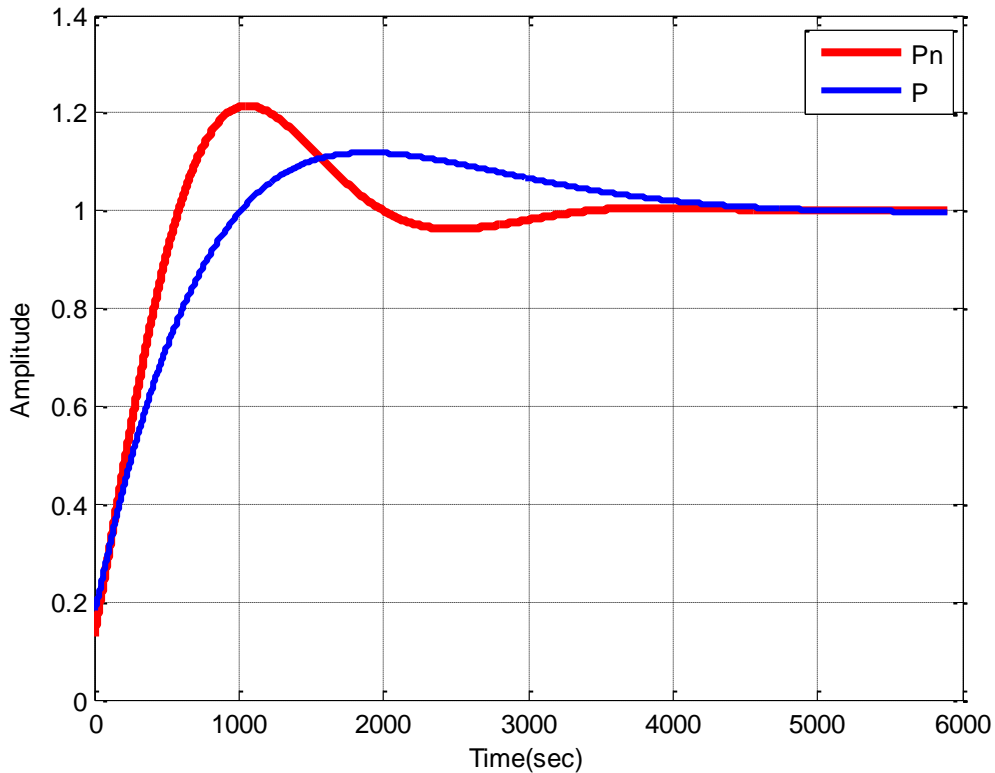


Рис. 9. Графіки перехідних процесів для замкнених систем з P_n і P

Оптимальні параметри ПІ регулятора для третього інтервалу вирощування $K_p = 1.04$, $T_i = 100$ с.

Таблиця 3

Практичні результати вирощувань

	Точність підтримки діаметра	Максимальне відхилення діаметра	Інтенсивність збоїв, 1/ч.	Інтенсивність відмов, 1/міс.
До оптимізації	3%	4%	1/500	1/3
Після оптимізації	1.7-1.8%	2.1-2.5%	1/1500	1/12

У додатках наведені фрагменти програмного коду «Монітора задач», експериментальні дані процесу вирощування використані для ідентифікації ОК у середовищі MATLAB, і матеріали щодо впровадження результатів дисертаційної роботи

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі синтезу робастного регулятора заданої структури для систем керування вирощуванням великогабаритних скінтіляційних монокристалів на основі методу норми H_∞ . Основні результати роботи полягають в наступному.

1. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку автоматизації процесів керування вирощуванням СМК і обґрунтована необхідність розробки робастного підходу до оптимізації процесу керування кристалізацією, що дозволяє суттєво вдосконалити систему керування та якість скінтіляторів.

2. Розвинуті математичні моделі стохастичного процесу кристалізації, представлені різницевиими рівняннями з дискретним часом, що дозволяє в промислових умовах ідентифікувати об'єкт керування на основі аналізу вхідних та вихідних даних процесу вирощування в режимі нормальної експлуатації.

3. Розроблені методи синтезу робастного регулятора заданої структури на основі методу H_∞ оптимізації, що дозволяє забезпечити стійкість системи керування на кожному інтервалі часу вирощування кристала.

4. Сформульований частотний критерій якості керування процесом кристалізації, визначений як зважена сума квадратів помилок між заданими й обчисленими значеннями модуля границі й додаткового модуля границі як функцій, відповідно, номінальної чутливості й номінальної додаткової чутливості системи керування, введення експертних оцінок для заданих значень параметрів критерію дозволяє розв'язати завдання визначення мінімуму частотного критерію якості.

5. Розроблена структурна схема діагностичного ядра, що реалізує функціональне діагностування багатопроцесорної системи керування на основі концепції сигнатурного моніторингу, алгоритмів оптимального розміщення контрольних точок і відновлення працездатності системи у випадку появи несправностей і збоїв.

6. Розвинутий алгоритм введення контрольних точок у керуючу програму з урахуванням обмежень для програм реального часу, розвинені алгоритми розміщення контрольних точок для програм з фіксованим і динамічно мінливим розміром стану керуючої програми реального часу мікроконтролера, що дозволяє підвищити ефективність функціонального діагностування в СК вирощуванням СМК.

7. Синтезований робастний ПІ-регулятор для системи керування вирощуванням скінтіляційних монокристалів, практична експлуатація якого на різних інтервалах кристалізації показала, що оптимізація настроювання ПІ-регулятора на основі робастного підходу дозволило збільшити точність стабілізації діаметра вирощуваного СМК і поліпшити якість монокристалів за рахунок стабілізації швидкості росту;

8. Запропоновано спосіб вирощування монокристалів із застосуванням датчика рівня розплаву, фоновим підживленням розплаву, квазібезперервним

втягуванням кристала й обґрунтована ефективність його застосування для керування процесами вирощування СМК.

9. Результати впроваджені в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тавровский И. И. Цифровой программный регулятор / И. И. Тавровский, В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, Н. И. Стрельников, Л. И. Герасимчук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2000. – № 80. – С. 7–8.

Здобувач розробив програмну та функціональну структуру цифрового програмного регулятора для системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів.

2. Тавровский И. И. Развитие систем управления процессами получения крупногабаритных монокристаллов из расплава / В. С. Суздаль, В. Н. Звягинцев, Л. И. Герасимчук, И. И. Тавровский, Н. И. Стрельников, Артеменко М.П. // Радиоэлектроника и информатика. – Харків: ХТУРЕ, 2001. – №4(17). – С. 91–95.

Здобувач провів аналіз існуючих систем керування, а також напрямків їх розвитку.

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

Здобувач розробив алгоритм функціонального тестування регулятора для системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів.

4. Тавровский И. И. Алгоритм настройки коэффициентов ПИД-регулятора привода движения / Ю. А. Раисов, В. С. Суздаль, И. И. Тавровский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – №12. – С. 411–412.

Здобувач розробив алгоритм отримання коефіцієнтів ПИД- регулятора в режимі реального часу.

5. Тавровский И. И. Управление нестационарным процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов из расплава / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, Л. И. Герасимчук, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 2007. – №4 (66). – С.77–82.

Здобувач обґрунтував вибір класу моделей для опису процесу кристалізації як об'єкта керування і провів їх оцінювання.

6. Тавровский И. И. Алгоритм адаптации системы управления процессом выращивания крупногабаритных сцинтилляционных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, Л. И. Герасимчук, И. И. Тавровский, Л. В. Дербунович // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №36. – С.

89–98.

Здобувач запропонував алгоритм адаптації для системи керування процесом вирощування великогабаритних монокристалів.

7. Тавровский И. И. Отказоустойчивая система управления процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов / Л. В. Дербунович, М. А. Бережная, В. С. Суздаль, Л. И. Герасимчук, И. И. Тавровский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №37. – С. 9–18.

Здобувач провів параметричне оцінювання об'єкту керування і чисельне моделювання системи керування процесом вирощування.

8. Тавровский И. И. Адаптивное управление выращиванием сцинтилляционных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, Л. И. Герасимчук, И. И. Тавровский // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – Кременчук: КУЕІТУ, 2008. – №2 (20). – С. 255–259.

Здобувач запропонував процедуру динамічної зміни параметрів регулювання в процесі росту монокристала.

9. Тавровский И. И. Диагностическое обеспечение системы управления процессом выращивания монокристаллов / Л. В. Дербунович, В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, И. И. Тавровский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №30. – С. 536–537.

Здобувач провів аналіз інтенсивності відмов та збоїв в системі керування вирощуванням монокристалів.

10. Тавровский И. И. Адаптивное управление выращиванием сцинтилляционных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, Л. И. Герасимчук, О. В. Соколов, И. И. Тавровский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 2008. – №2. – С. 36–40.

Здобувач обґрунтував метод та здійснив параметричну оцінку моделі об'єкта керування.

11. Тавровский И. И. Параметрическая идентификация VARMAX моделей процесса кристаллизации крупногабаритных монокристаллов / В. С. Суздаль, Ю. М. Епифанов, А. В. Соколов, И. И. Тавровский // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – Кременчук: КУЕІТУ, 2009. – №4 (26). – С. 23–29.

Здобувач провів параметричну ідентифікацію VARMAX моделей процесу кристалізації.

12. Тавровский И. И. ∞ оптимизация ПИД управления выращиванием крупногабаритных монокристаллов / В. С. Суздаль, А. В. Соколов, И. И. Тавровский // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків. ПП «Технологічний Центр», 2010. – №2/5 (44). – С. 4-7.

Здобувач запропонував частотний критерій якості ПИД керування процесом кристалізації.

13. Тавровский И. И. Синтез робастных регуляторов пониженного порядка для управления процессами кристаллизации / В. С. Суздаль, Л. В. Дербунович, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 2010. – №3 (82). – С. 24–29.

Здобувач розробив метод синтезу робастного регулятора заданої структури на базі методу H_{∞} .

14. Патент 79330 Україна. МПК (2006) С30В 15/20, С30В 15/00. Пристрій для підживлення вирощуваного монокристалу // М. П. Артеменко, В. І. Горилецький, Б. В. Гриньов, Ю. М. Епіфанов, М. І. Стрельников, В. С. Суздаль, І. І. Тавровський – № а200505340, заявл. 06.06.2005, опубл. 11.06.2007. – Бюл. № 8.

15. Патент 81196 Україна. МПК (2006) С30В 15/20. Спосіб вирощування монокристалів // Б. В. Гриньов, В. С. Суздаль, В. І. Горилецький, Л. І. Герасимчук, І. І. Тавровський, М. І. Стрельников – № а200608425, заявл. 27.07.2006, опубл. 10.12.2007. – Бюл. №20.

16. Патент 90606 Україна, МПК (2009) G06F 11/28, G06F 11/26, G06F 11/00, G01R 35/00. Пристрій функціонального діагностування пристрою регулювання росту монокристала // В. С. Суздаль, Л. В. Дербунович, Ю. М. Епіфанов, І. І. Тавровський, Ю. С. Козьмін – № а200815228, заявл. 29.12.2008, опубл. 11.05.2010. – Бюл. № 9.

17. Тавровский И. И. Комплекс технических средств для управления тепловым режимом / Л. И. Герасимчук И. И. Тавровский, В. С. Суздаль, В. Н. Звягинцев, Н. И. Стрельников // НКРК-2000: Праці ІХ національній конференції по росту кристалів. – Москва: ІК РАН, 2000. – С. 213.

Здобувач запропонував структурну та функціональну схеми системи керування вирощуванням сцинтиляційних монокристалів.

АНОТАЦІЇ

Тавровський І. І. Синтез робастного регулятора заданої структури для процесу кристалізації. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України, Харків, 2010.

Дисертація присвячена розробці методу синтезу робастного регулятора заданої структури для керування процесом кристалізації великогабаритних сцинтиляційних монокристалів, забезпеченню відмовостійкості системи керування шляхом функціонального діагностування з використанням концепції сигнатурного моніторингу, реалізованого методом контрольних точок.

Запропонована математична модель стохастичного процесу кристалізації сцинтиляційних монокристалів (СМК), яка представлена різницевиими рівняннями з дискретним часом. Розроблені математичні моделі процесів кристалізації для синтезу робастних регуляторів. Розроблений метод синтезу

робастного регулятора заданої структури, що забезпечує необхідну якість керування на різних інтервалах вирощування кристала. Одержав подальший розвиток частотний критерій якості керування процесом кристалізації. Розроблені моделі й алгоритми функціонального діагностування на основі концепції сигнатурного моніторингу для багатопроцесорних СК вирощуванням, запропонована структурна схема діагностичного ядра, що реалізує функціональне діагностування методом контрольних точок. Одержав подальший розвиток алгоритм уведення контрольних точок у керуючу програму з урахуванням обмежень для програм реального часу. Розвинені алгоритми розміщення контрольних точок для програм з фіксованим і динамічно змінним розміром стану керуючої програми реального часу мікроконтролера, що дозволяє підвищити ефективність функціонального діагностування в СК вирощуванням СМК.

Ключові слова: синтез робастного регулятора, процес кристалізації, ідентифікація об'єкта керування, H_∞ норма, функціональне діагностування, метод контрольних точок.

Тавровский И. И. Синтез робастного регулятора заданной структуры для процесса кристаллизации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, 2010.

Диссертация посвящена разработке метода синтеза робастного регулятора заданной структуры для системы управления выращиванием крупногабаритных сцинтилляционных монокристаллов на основе метода нормы H_∞ и частотных критериев качества управления.

Проведен анализ состояния и тенденций развития автоматизации процессов выращивания сцинтилляционных монокристаллов (СМК) и показана возможность широкого использования робастных алгоритмов синтеза регуляторов заданной структуры и функционального диагностирования для усовершенствования систем управления и повышения их отказоустойчивости. Задачи синтеза робастного регулятора заданной структуры сведены к задачам получения моделей процесса кристаллизации при помощи параметрической идентификации, оценки уровня неопределенности модели и применения метода нормы H_∞ для обеспечения робастной устойчивости, формулировке частотного критерия качества управления для определения оптимальных параметров регулятора с учетом ограничений по робастной устойчивости, применения сигнатурного мониторинга для функционального диагностирования, которые позволили разработать алгоритмы и методы синтеза робастного регулятора заданной структуры.

Предложен метод параметрической идентификации стохастического процесса кристаллизации СМК с помощью разностных уравнений с дискретным временем, что позволяет в промышленных условиях идентифицировать объект управления на основе данных вход-выход процесса выращивания в режиме нормальной эксплуатации. Получены математические

модели процесса кристаллизации СМК и произведена оценка уровня неопределенности модели для различных участков процесса выращивания.

Разработан метод синтеза робастного регулятора заданной структуры, обеспечивающего робастную устойчивость системы управления на различных интервалах выращивания кристалла. Предложен частотный критерий качества управления процессом кристаллизации, определенный для регулятора с заданной структурой как взвешенная сумма квадратов ошибок между заданными и вычисленными значениями модуля границы и дополнительного модуля границы как функций, соответственно, номинальной чувствительности и номинальной дополнительной чувствительности системы управления. Разработан метод получения оптимальных параметров регулятора с учетом ограничений, накладываемых условием робастной устойчивости путем введения экспертных оценок качества, что позволяет решить задачу определения минимума частотного критерия качества.

Разработаны модели и алгоритмы функционального диагностирования на основе сигнатурного мониторинга для многопроцессорных систем управления (СУ) выращиванием, предложена структурная схема диагностического ядра, реализующая функциональное диагностирование методом контрольных точек. Предложены алгоритм введения контрольных точек в управляющую программу с учетом ограничений для программ реального времени и алгоритм оптимального размещения контрольных точек для программ с фиксированным и динамически изменяющимся размером состояния управляющей программы, сформулирован критерий оптимальности размещения контрольных точек. На основе предложенных методов и алгоритмов разработано диагностическое ядро, которое позволило существенно повысить эффективность функционального диагностирования в СУ выращиванием СМК.

Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в Институте сцинтилляционных материалов НАН Украины (г. Харьков).

Ключевые слова: синтез робастного регулятора, процесс кристаллизации, идентификация объекта управления, функциональное диагностирование, метод контрольных точек.

Tavrovsky I.I. Synthesis of robust controllers with a given structure for the crystallization process. – Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of engineering science on specialty 05.13.07 – automation of control processes. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2010.

The dissertation is devoted to developing a method for the synthesis of robust regulators with given structure to control the growth of large scintillation crystals on the basis of the H_∞ norm and frequency criteria of quality control. The analysis of the status and trends of process automation growth of the large single crystals and the possibility of widespread use of robustness algorithms for controller design given the structure and functional diagnosis for the improvement of control systems and enhance their resiliency. Synthesis problem of robust controller of given structure are

reduced to the problem of obtaining models of the crystallization process by means of parametric identification, assessment of the level of uncertainty model and applying the method of H_∞ norms for robust stability, the formulation of the frequency criterion of quality control to determine the optimal controller parameters with the constraints on robust stability, use signature-based monitoring system for functional diagnosis, which allowed us to develop algorithms and methods for the synthesis of robust controller of given structure.

Keywords: Syntheses of robust controller, crystallization process, plant identification, functional diagnostic, checkpoint placement.