

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Соболев Олександр Вікторович

УДК 621.3.078.3

**СИСТЕМИ БАГАТОМІРНОГО РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ
ВИРОЩУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ГАЛОЇДНИХ МОНОКРИСТАЛІВ**

Спеціальність 05.13.03 - системи та процеси керування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано 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 технології
виращування монокристалів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Рогачов Олександр Іванович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут”, м. Харків,
професор кафедри автоматизації та керування в технічних
системах

доктор технічних наук, професор
Удовенко Сергій Григорович
Харківський національний університет радіоелектроніки,
м. Харків,
професор кафедри електронних обчислювальних машин

Захист відбудеться «24» лютого 2011 р. о 14–30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.14 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий «__» _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ліберг І.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Галоїдні монокристали (ГМК) є матеріалом для створення високоефективних сцинтиляторів, що використовують у медицині, ядерній фізиці, астрофізиці, системах безпеки та для багатьох інших промислових застосувань. На світовому ринку об'єми споживання сцинтиляційних детекторів на основі ГМК не залежно від стану світової економіки щорік зростають, однак наявність конкуренції та зростаючі вимоги до якості продукції передбачають виживання на цьому ринку тільки гравців з високоефективним виробництвом.

Одним з найбільш важливих показників ефективності виробництва ГМК є гарантована відтворюваність вирощування монокристалів з заданими властивостями та належної якості. Досягнення мети підвищення конкурентоспроможності вітчизняних детекторів на ГМК можливо шляхом вдосконалення систем керування кристалізацією. Аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку систем і процесів керування вирощуванням великогабаритних галоїдних монокристалів показує, що основними проблемами, які стоять перед розробниками систем керування (СК) ростовими установками в умовах промислового виробництва ГМК високої якості, є підвищення, з урахуванням характерних особливостей об'єкта керування (ОК), ефективності стабілізації процесу кристалізації на основі використання оптимальних законів керування. Отже, завдання пошуку ефективного методу синтезу оптимальних регуляторів для багатозв'язних процесів вирощування ГМК, що забезпечують необхідну якість керування і стійких до зміни динамічних характеристик процесу кристалізації, актуальна та визначила напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі технології вирощування монокристалів Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідницьких робіт, що фінансуються НАН України по темі: "Розробка нової системи та алгоритмів автоматизованого керування вирощуванням великогабаритних кристалів" (шифр "Темп", ДР №0103I003476); "Дослідження процесів тепло- і масопереносу при вирощуванні великогабаритних лужногалоїдних сцинтиляційних монокристалів" (шифр "Вплив", ДР №0104I006375), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів по розробці моделей процесу кристалізації та синтезу закону керування процесами вирощування ГМК.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є синтез робастних регуляторів і моделей кристалізації для систем керування вирощуванням великогабаритних галоїдних монокристалів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

– аналіз існуючих методів і систем керування вирощуванням великогабаритних ГМК та обґрунтування необхідності розробки перспективного підходу до оптимізації процесу керування кристалізацією в промислових умовах;

– оцінка збурень та рівня невизначеності в системах керування вирощуванням великогабаритних ГМК;

– розробка багатомірних математичних моделей кристалізації для систем робастного керування процесами вирощування великогабаритних ГМК;

– декомпозиція процесу вирощування великогабаритних ГМК на інтервали з квазістаціонарними тепловими умовами кристалізації;

– розробка методу синтезу робастного регулятора, що забезпечує задану якість керування для різних інтервалів вирощування кристала;

– експериментальне моделювання та практична реалізація робастної системи керування вирощуванням великогабаритних ГМК.

Об'єкт дослідження: процеси в системах керування кристалізацією ГМК.

Предмет дослідження: моделі та методи синтезу робастних систем керування процесами кристалізації ГМК.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі використані методи керування лінійними багатозв'язними об'єктами, методи частотного синтезу оптимальних регуляторів, зокрема, методи синтезу робастного керування для вибору, обґрунтування і проектування систем і алгоритмів керування процесами отримання ГМК. Дослідження та моделювання проведені з використанням теорії робастного керування, функціонального аналізу, методів теорії лінійних систем і процедури побудови робастних регуляторів на основі оптимізації. Для отримання моделей об'єкта керування були використані регресійні методи ідентифікації. Оцінка ефективності застосування розроблених методів здійснено на основі аналізу експериментальних даних, отриманих в лабораторних і виробничих умовах.

Наукова новизна отриманих результатів. Основний науковий результат дисертації полягає в обґрунтуванні та розробці нового підходу до проектування систем керування процесом кристалізації великогабаритних ГМК в умовах багатомірності, невизначеності та стохастичності ОК.

Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, полягають у наступному:

– вперше запропоновано метод керування вирощуванням великогабаритних галоїдних монокристалів, робастного по відношенню до характерних для процесів кристалізації невизначеностей, що дозволяє підвищити ефективність виробництва кристалів;

– вперше отримано математичні моделі процесу кристалізації великогабаритних ГМК в частотній області і в просторі станів на основі регресійного аналізу впливу теплових умов на діаметр зростаючого монокристала і на температуру підживлюючого розплаву, що дозволяють спростити процедуру синтезу багатомірної системи управління вирощуванням монокристалів;

– удосконалено метод синтезу робастних регуляторів за критерієм змішаної чутливості для процесів вирощування галоїдних монокристалів на різних інтервалах з різними тепловими умовами, який дозволяє враховувати особливості процесу кристалізації ГМК і забезпечувати високі динамічні показники стабілізації;

– отримав подальший розвиток метод редукції моделі процесу кристалізації з перетворенням її представлення в просторі станів до системи збалансованих координат, що дозволяє синтезувати практично реалізовані робастні регулятори зниженого порядку.

Практичне значення отриманих результатів. Практична значимість результатів роботи для галузі виробництва функціональних матеріалів обумовлена:

– підвищенням ефективності виробництва ГМК завдяки використанню розробленого підходу до керування процесом кристалізації, заснованого на методі оптимального робастного керування багатовимірними і стохастичними ОК;

– зниженням собівартості великогабаритних ГМК і збільшенням конкурентоспроможності вітчизняних монокристалів на світовому ринку.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, підтверджуються експериментальними дослідженнями і практично реалізовані при розробці алгоритмів керування, створення інформаційного і програмно-технічного забезпечення систем керування процесами отримання сцинтиляційних матеріалів на промислових установках типу «РОСТ» в ІСМА НАН України (акт від 20.01.2010 р.).

Виконання цих робіт дозволило випробувати і удосконалити в процесі виробництва основні алгоритми, програми та структуру мікроконтролерного керування процесом кристалізації. Методи проектування оптимальних СК процесами вирощування ГМК, що представлені в дисертації, доведені до рівня безпосереднього використання інженерно-технічними співробітниками для інженерного проектування засобів керування на основі мікроконтролерів. Їх практичне застосування дозволило уникнути суттєвих помилок та матеріальних втрат у процесі промислового виробництва ГМК, підвищити відтворюваність процесів кристалізації.

Отримані в дисертації результати являють собою сукупність нових знань, які дозволяють проектувати багатопроцесорні системи для керування сучасними ростовими установками в режимі реального часу.

Особистий внесок здобувача. Постановка задачі, вибір методів та аналіз результатів виконані спільно з науковим керівником. Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них: структура моделі та ідентифікація параметрів ОК, формалізація задачі керування, синтез багатовимірною стабілізуючого робастного регулятора, моделювання системи керування в середовищі MATLAB.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на конференції Crystal Materials'2005 «ICCM'2005» (Харків, 2005), 3-й міжнародній науковій конференції «Функціональна компонентна база мікро-, опто- та наноелектроніки» (Кацівелі, 2010) та 4-й міжнародній науково-практичній конференції «Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології» (Кременчук, 2010).

Публікації. За темою дисертації всього опубліковано 8 наукових статей у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і 4-х додатків. Повний обсяг роботи складає 159 сторінок. Робота містить 31 рисунок по тексту, 16 рисунків на 8 окремих сторінках, 16 таблиць по тексту, 4 додатки на 12 сторінках, список використаних літературних джерел з 103 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значимість роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку процесів керування вирощуванням великогабаритних галюїдних монокристалів з розплаву. Розглянуто особливості установок з циліндричним і з конічним тигля, на яких практично реалізовані процеси керованої кристалізації з розплаву на затравку за методом Чохральського з використанням для керування інформації про стан рівня розплаву в тиглі.

Розглянуто особливості процесу вирощування ГМК як об'єкта керування. Показано, що вирощування великогабаритних ГМК проходить у теплових умовах, що змінюються, та при наявності ряду інших неврахованих факторів, пов'язаних з неточним описом, як самого об'єкта керування, так і зовнішніх впливів на нього. Досвід практичних вирощування ГМК з використанням ПІД і прогнозних алгоритмів показує, що використання цих алгоритмів не вирішує завдання якісного керування процесом кристалізації через наявність невизначеності в описі ОК і низькою робастності цих алгоритмів, що призводить до економічних втрат при виробництві ГМК.

Обґрунтовано необхідність підвищення ефективності процесів керування кристалізацією ГМК. Для цього запропоновано розробити метод синтезу оптимальних багатомірних регуляторів для СК кристалізацією на основі принципів теорії робастного керування. Основою математичного забезпечення таких систем мають стати моделі та оптимальні алгоритми керування, розроблені з урахуванням багатомірності, нестационарності процесу кристалізації великогабаритних ГМК, рівня невизначеності ОК і характеру зовнішніх збурень

Другий розділ присвячено проблемі ідентифікації процесу кристалізації як об'єкта керування. Обґрунтовано вибір класу моделей для ідентифікації процесу вирощування, який належить до класу багатозв'язних керованих процесів.

Побудова найбільш адекватної математичної моделі фізичних процесів кристалізації здійснено в класі моделей, що описуються стохастичним різницевим рівнянням з дискретним часом $k = 0, 1, 2, \dots$, в матричній формі

$$\mathbf{A}(B) \mathbf{y}(k) = \mathbf{G}(B) \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{F}\psi(k-1) + \mathbf{D}(B) \mathbf{w}(k), \quad (1)$$

де $\mathbf{A}(B)$, $\mathbf{G}(B)$, $\mathbf{D}(B)$ – матричні поліноми ступенів m_1 , m_3 і m_2 відповідно; \mathbf{y} , \mathbf{w} , \mathbf{u} , ψ – вектори розмірності m_1 , m_2 , l_1 і l_2 ; \mathbf{F} – матриця розмірності $m \times l_2$
Матричні поліноми $\mathbf{A}(B)$, $\mathbf{G}(B)$, $\mathbf{D}(B)$ мають вигляд:

$$\mathbf{A}(B) = \mathbf{I} - \sum_{j=1}^{m_1} \mathbf{A}_j B^j,$$

$$\mathbf{G}(B) = \mathbf{I} - \sum_{j=1}^{m_3} \mathbf{G}_j B^j,$$

$$\mathbf{D}(B) = \mathbf{I} - \sum_{j=1}^{m_2} D_j B^j,$$

де B – оператор одиничної затримки, яка визначається співвідношенням $B y(k) = y(k-1)$; $w(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ – послідовність незалежних випадкових величин з нульовим математичним очікуванням і кінцевої дисперсією. Елементи матриць: A_j , G_j , D_j , F_j – дійсні числа. Клас моделей (1) включає лінійні моделі тільки щодо матриць \mathbf{A} , \mathbf{G} , \mathbf{D} , \mathbf{F} , але не обов'язково щодо вектора $y(k)$. Це означає, що розподіл ймовірностей $y(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ може бути негаусовим, навіть при гаусовім векторі $w(k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Процес вирощування великогабаритних ГМК розглядається як двовимірний об'єкт керування з двома вхідними величинами (температури донного $T_{\text{дно}}$ і бічного нагрівачів $T_{\text{бок}}$) та двома вихідними величинами (діаметр кристала D_s і температура розплаву для підживлення T_p). Основним каналом «вхід – вихід» є канал «діаметр кристала - температура донного нагрівача», при цьому процес вирощування умовно розбивається на декілька квазістаціонарних інтервалів зростання кристалів по висоті, поза межами яких теплові умови вирощування кардинальним чином відрізняються.

Структурна схема ОК, що представлена на рис.1, містить канали \mathbf{P}_{m11} , \mathbf{P}_{m12} впливу на діаметр зростаючого монокристала D_s температури донного нагрівача T_b і температури бічного нагрівача T_l , відповідно, та канали \mathbf{P}_{m21} , \mathbf{P}_{m22} впливу на температуру розплаву T_p температури бічного нагрівача і температури донного нагрівача відповідно.

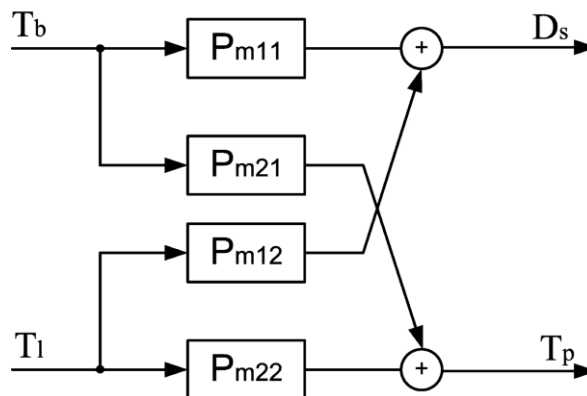


Рис.1. Структурна схема ОК

У таблиці 1 представлені параметри ARMAX моделі цих каналів для одного з інтервалів вирощування у вигляді залежності одного виходу від двох входів

$$\mathbf{A}(q)\mathbf{y}(t) = \mathbf{B1}(q)\mathbf{u}_1(t) + \mathbf{B2}(q)\mathbf{u}_2(t) + \mathbf{C}(q)\mathbf{e}(t),$$

де $A(q)$, $B1(q)$, $B2(q)$, $C(q)$ – поліноми, $y(t)$ – вектор виходу (діаметр кристала D_s і температура розплаву для підживлення T_p), $u_1(t)$ и $u_2(t)$ – входи моделі T_b и T_l , $e(t)$ – шум ОК. Процес кристалізації описується двома залежностями.

У **третьому розділі** розглянуто питання проектування робастних регуляторів для систем керування кристалізацією ГМК. Для оптимізації процесу керування запропоновано застосувати метод синтезу лінійних систем керування на основі теорії за нормою просторів Харді H_∞ . Використання H_∞ -оптимізації дозволяє мінімізувати H_∞ -норму передатної функції замкнутої системи від входів до контрольованих виходів, результатом якої є синтез стабілізуючого керування з усуненням відхилення процесу. Сформульовано вимоги до якісних показників процесу керування та досліджено збурення в системі керування кристалізацією.

Таблиця 1.

Моделі каналов ОК для інтервала вирощування

P_{m11}	$A(q) = 1 - 0.2667q^{-1} - 0.4588q^{-2} + 0.2227q^{-3}$
P_{m12}	$B2(q) = -0.7422q^{-1} - 0.2482q^{-2}$
	$B2(q) = 2.004q^{-1} - 1.137q^{-2}$
	$C(q) = 1 - 0.5136q^{-1} - 0.5014q^{-2}$
P_{m22}	$A(q) = 1 - 0.9232q^{-1} - 0.1042q^{-2}$
P_{m21}	$B1(q) = 0.5455q^{-1} - 0.45q^{-2}$
	$B2(q) = -0.3315q^{-1} + 0.2102q^{-2}$
	$C(q) = 1 - 1.407q^{-1} + 0.401q^{-2}$

Кристалізація великогабаритних ГМК супроводжується зміною характеристик теплового поля на різних стадіях вирощування. На рис. 2 наведено схему зміни температурних умов в ростовій камері. На стадії розрощування (рис. 2 А) кристал головним чином взаємодіє з розплавом і стінками тигля і незначно – з газовим середовищем ростової печі. При переході до вирощування в довжину (рис. 2 Б) верхня частина кристала активніше бере участь у теплообміні з газовим середовищем ростової печі, в результаті чого менш інтенсивним стає теплообмін розплаву з тиглем. Після того як циліндрична частина кристала почне виступати над верхньою кромкою тигля (рис. 2 В, Г), передача тепла газовому середовищі стає інтенсивнішою за інші

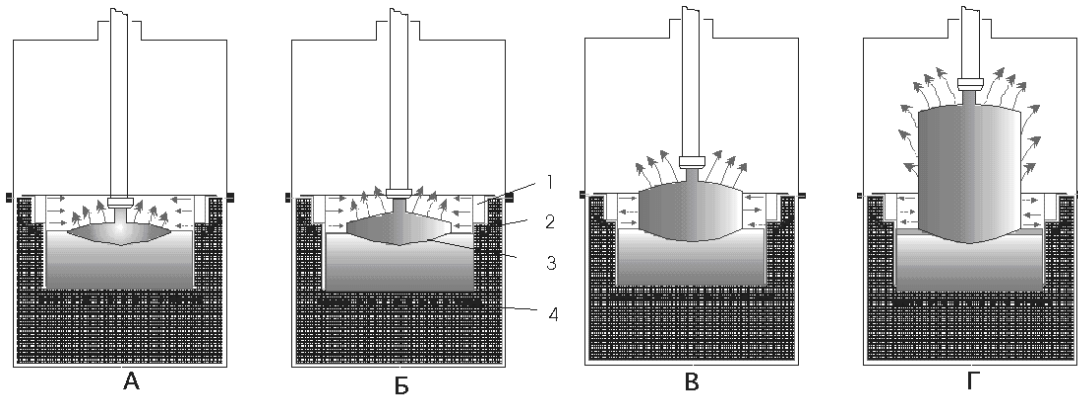


Рис. 2. Схема зміни температурних умов в установках "РОСТ" на різних стадіях росту великогабаритного кристала: А – розтопування; Б – початок зростання в довжину; В – ріст у довжину; Г – завершення вирощування.

складові теплообміну. Всі ці процеси призводять до постійної зміни у часі теплових умов зростання ГМК з розплаву.

Таким чином, вирощування великогабаритних ГМК проходить у теплових умовах, що змінюються, і при наявності ряду інших неврахованих факторів, пов'язаних з неточним описом, як самого об'єкта, так і зовнішніх впливів на нього. У реальних умовах виробництва великогабаритних ГМК можна оцінити тільки верхню межу відхилення передатних функцій або частотних характеристик ОК від номінальних, без точного визначення, чим і в якій мірі ці відхилення викликані.

Зазначена неструктурна невизначеність збуреного об'єкта $\mathbf{T}(s)$ щодо номінального об'єкта $\mathbf{T}_n(s)$ має вигляд:

– адитивної невизначеності

$$\mathbf{T}(s) - \mathbf{T}_n(s) = \Delta_a(s),$$

– мультиплікативної невизначеності

$$\mathbf{T}(s) - \mathbf{T}_n(s) = \mathbf{T}_n(s)\Delta_m(s),$$

де Δ_a, Δ_m – невизначеності, щодо яких передбачається, що число коренів праворуч для $\mathbf{T}(s)$ и $\mathbf{T}_n(s)$ однакове, $\|\Delta_a(s)\|_\infty < \infty$, $\|\Delta_m(s)\|_\infty < \infty$, $\mathbf{T}_n(s)$ – правильна раціональна передатна матриця.

Строго правильна раціональна передатна матриця $\mathbf{K}(s)$ робастного регулятора повинна забезпечувати стійкість замкнутої системи. Відповідно до критерію Найквіста для стійкої системи графік $\mathbf{T}(j\omega)\mathbf{K}(j\omega)$ не повинен проходити або охоплювати точку $(-1, j0)$, тобто достатньою умовою стійкості системи є $\|\mathbf{TK}\|_\infty < 1$.

Умову робастності до збурень системи, що розглядається, можна виразити наступними нерівностями:

$$\left\| \begin{array}{l} (\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} \\ (\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} \Delta_a \mathbf{K} \\ (\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} \mathbf{T}_n \Delta_m \mathbf{K} \end{array} \right\|_{\infty} \leq 1, \quad (2)$$

де $(\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} = \mathbf{S}$ функція чутливості або передатна функція похибки, $(\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} \mathbf{T}_n \mathbf{K} = \mathbf{H}$ доповнююча функція чутливості або передатна функція замкнутої системи, $(\mathbf{I} + \mathbf{T}_n \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K} = \mathbf{R}$ функція чутливості керування.

Вибір регулятора \mathbf{K} для виконання всіх трьох вимог в (2) при великих значеннях $\|\Delta_a(s)\|_{\infty}$, $\|\Delta_m(s)\|_{\infty}$ може виявитися суперечливим. Тому при синтезі робастного регулятора використовується підхід, який базується на частотних вимогах до системи, тобто раціонально вимагати виконання нерівностей (2) кожного у своєму частотному діапазоні: перша нерівність повинна працювати в низькочастотній області (до частоти зрізу), а друга і третя нерівності – в околиці частоти зрізу і правіше її. Це відповідає загальним принципам застосування методу змішаної чутливості (рис.3).

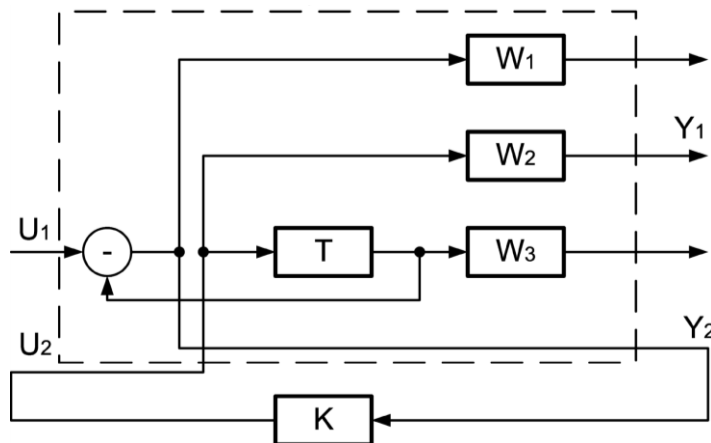


Рис. 3. До синтезу системи методом змішаної чутливості

У методі змішаної чутливості розглядаються частотні вагові матриці $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \mathbf{W}_3$, що забезпечують необхідне частотне розділення. При цьому існуюча система розширюється за рахунок додаткових фазових координат, що входять до вагових матриць.

Вимоги до системи щодо забезпечення робастної стійкості зводяться, на підставі виразу (2), до обмеження функції вартості методу змішаної чутливості:

$$\|\mathbf{H}_{y1u1}\|_{\infty} \leq 1,$$

$$\text{де } \mathbf{H}_{y1u1} = [\mathbf{S}\mathbf{W}_1 \quad \mathbf{R}\mathbf{W}_2 \quad \mathbf{H}\mathbf{W}_3]^T.$$

У таблиці 2 наведено основні збурення, що діють в СК кристалізацією ГМК, на підставі яких визначаються вагові матриці.

Одним з етапів синтезу робастної системи керування є редукція моделей, яка дозволяє знижувати порядок практично реалізуємих регуляторів. Модель зниженого порядку отримують методом збалансованого відсікання, для чого необхідним є перетворення реалізації (A, B, C, D) до спеціальної системи координат, відомої як збалансовані координати.

Таблиця 2.

Основні збурення в системі керування вирощуванням ГМК

Збурення в СК	Найменування	Частота рад/сек
вхідні	Коливання температури води охолодження	0.01 – 0.05
	Підживлення розплаву твердим сировиною	0.005 – 0.01
вихідні	Періодичні коливання дзеркала розплаву в тиглі	0.5 – 1

Розроблений алгоритм синтезу робастного регулятора кристалізацією передбачає послідовну реалізацію наступних етапів:

1. Вибір вагових матриць W_1, W_3 , що регламентують умови стабілізованості та робастності одержуваної оптимізації (АЧХ W_1 повинна відображувати заборонену область в середньо і низькочастотній області розімкнутої оптимізованої АЧХ системи, АЧХ W_3 повинна відображувати вимоги до високочастотної частини АЧХ системи, де здебільшого зосереджені мультиплікативні збурення). Для вирішення цих завдань була використана наступна інформація:

- про діапазон робочих частот замкненої системи;
- про ступінь (коефіцієнт) пригнічення зовнішніх збурень;
- про найбільші значення прогнозу мультиплікативних збурень.

2. Формування опису розширеного об'єкта керування й підготовка, таким чином, об'єкта для вирішення стандартної задачі H_∞ -оптимізації.

3. Рішення стандартної задачі H_∞ -оптимізації та отримання прийнятного (за умовами стійкості) зниження порядку регулятора.

4. У разі відсутності рішення здійснюються уточнення умов у п.1 та повторне вирішення задачі.

5. Перевірка ефективності робастного регулятора на моделях об'єкта на різних інтервалах вирощування і при необхідності корекція умов, що регламентуються в п.1.

Четвертий розділ присвячений питанням синтезу та реалізації системи керування вирощуванням ГМК. Запропоновано і обгрунтовано архітектуру системи керування та функціональну схему об'єктного рівня системи керування промисловою установкою "РОСТ", що реалізує метод робастного (по відношенню до невизначеностей) керування (рис.4). Тепловий режим вирощування ГМК задається регуляторами температури донного нагрівача

РТД і бічного нагрівача РТБ. Блок БПК забезпечує обертання і лінійне переміщення кристалоутримувача. Підживлення розплавом, що необхідне для вирощування великогабаритних монокристалів, проходить через кільцеву порожнину тигля (КПТ), і забезпечується блоком підживлення БП. Для вимірювання рівня розплаву в тиглі використано рівнемір УР.

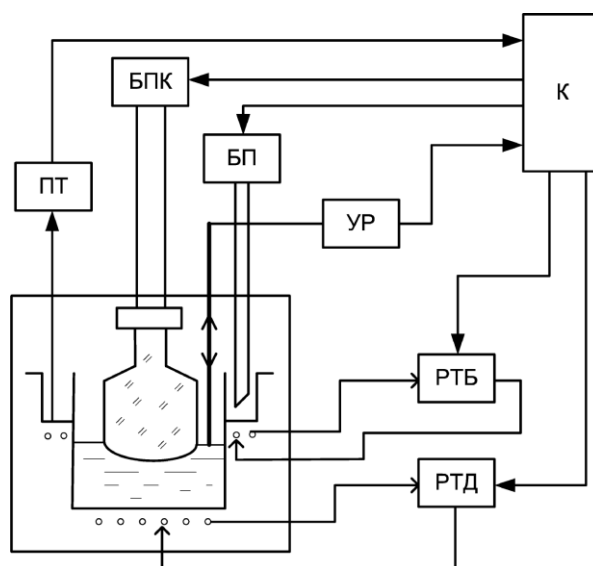


Рис.4. Функціональна схема системи керування процесом вирощування ГМК з циліндричного тигля

Відомо, що після переходу на ріст у довжину, зростаючий кристал починає активно впливати на температуру розплаву в кільцевій порожнині, що призводить до зміни форми фронту кристалізації і, як наслідок, до зміни обсягу розплаву в тиглі. Ці зміни сприяють зростанню похибки вимірювання діаметра кристала, що знижує якість вирощеного монокристала. Крім того, зміни температури розплаву в кільцевій порожнині впливають на інтенсивність випаровування активатора з неї, що призводить до неоднорідності розподілу активатора за обсягом кристала, тобто до погіршення його якості. Саме ці причини вимагають введення контролю та стабілізації температури кільцевої порожнини. Контроль температури КПТ здійснюється перетворювачем температури ПТ. Контролер К керує процесом вирощування, стабілізуючи діаметр кристала і температуру кільцевої ємності, для чого на основі вимірювання діаметра зростаючого монокристала і температури КПТ керує (за алгоритмом, запропонованим в роботі) тепловими умовами зростання, змінюючи уставки регуляторів температури РТБ та РТД.

Проведено синтез робастних стабілізуючих регуляторів для кожного інтервалу вирощування, що відповідає певним тепловим умовам вирощування, з використанням процедури `hinfort` середовища MATLAB, що здійснює γ -ітерації для розрахунку оптимального регулятора за наступним обмеженням:

$$\|\gamma H_{y1u1}(\gamma_a); H_{y1u1}\| < 1, \quad (3)$$

де γ_a – індекс вихідних каналів функції вартості. Згідно з (3) визначається максимальне значення γ , при якому рішення задачі існує.

Для двохвимірного ОК (табл.1) в роботі синтезовано оптимальний регулятор 8-го порядку. Його граміан $g = \text{diag}(4.9984; 3.7427; 2.9230; 2.4533; 1.3035; 0.9971; 0.8523; 0.0883)$, тобто можна виключити 8-й стан, як несуттєвий. На рис. 5 наведено графіки сингулярних величин замкненої системи керування з редукованим регулятором 7-го порядку, номінальним ОК і зворотною ваговою функцією I/W_3 . На рис.6 наведено графіки сингулярних величин функції чутливості тієї ж системи та зворотної вагової функції I/W_1 .

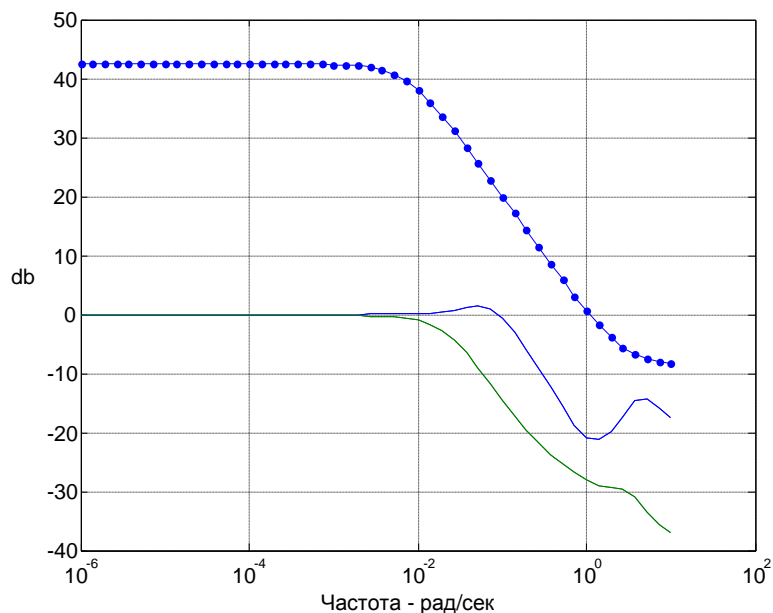


Рис.5. Частотна характеристика замкненої системи і обмежуюча частотна функція I/W_3

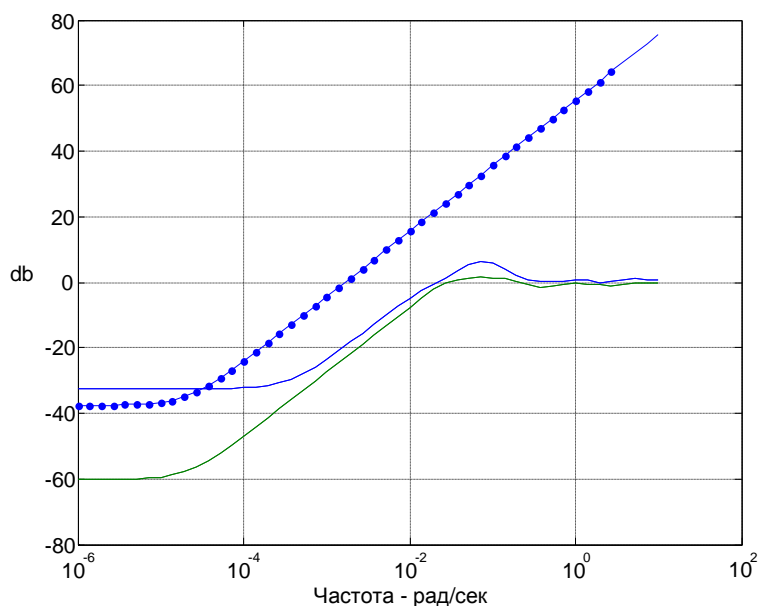


Рис.6. Функція чутливості системи та обмежуюча частотна функція I/W_1

На рис.7 наведено графіки перехідних процесів при ступінчатій зміні завдання на кожному вході номінальної замкненої СК при $\gamma_{onm}=8.5625$. На рис.8 наведено графіки перехідних процесів при ступінчатій зміні завдання на кожному вході збуреної замкненої СК. Очевидно, що розглянуті процеси є стабілізованими, а взаємний вплив каналів можна вважати несуттєвим.

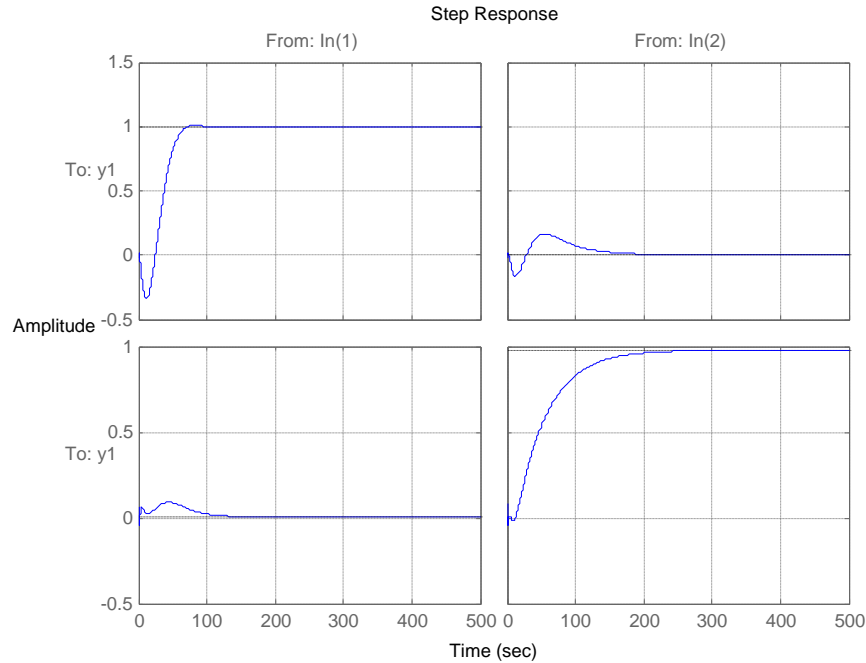


Рис.7. Перехідні процеси в номінальній замкненій СК

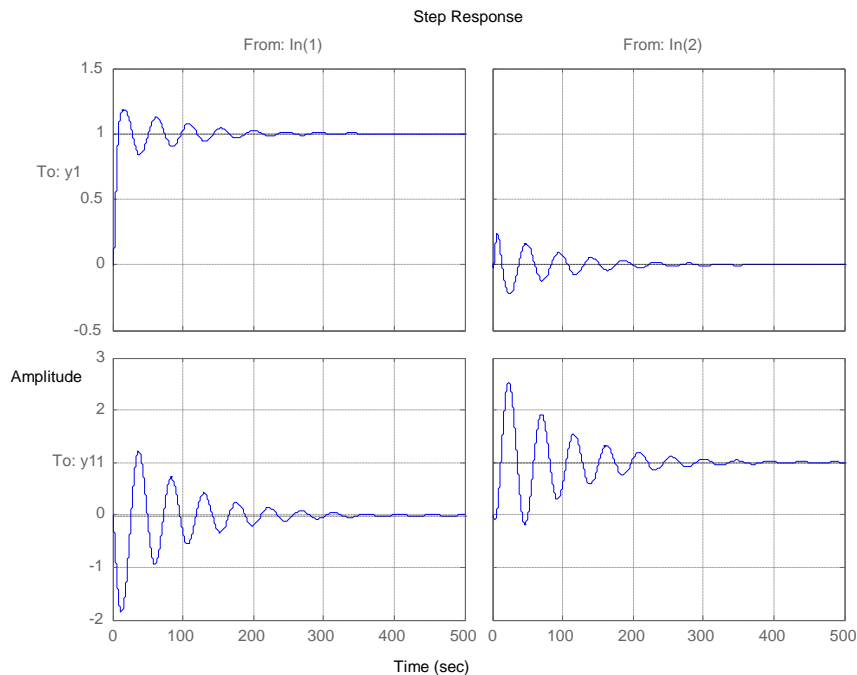


Рис.8. Перехідні процеси в збуреній замкненій СК

Таким чином, система керування наприкінці інтервалу вирощування із збуреним об'єктом керування зберігає стійкість і необхідну якість керування кристалізацією.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності систем керування процесами виробництва великогабаритних ГМК на основі синтезу робастних багатозв'язних систем керування процесами виробництва з урахуванням багатомірності та стохастичності ОК.

Дисертаційна робота є результатом теоретичного узагальнення систематизованих модельних та експериментальних досліджень процесів виробництва ГМК.

Основні результати досліджень:

- на основі аналізу стану систем та процесів керування виробництвом великогабаритних ГМК обґрунтована необхідність розробки нового підходу до керування виробництвом ГМК в промислових умовах – синтезу робастних по відношенню до невизначеностей ОК багатомірних регуляторів;

- розроблені багатомірні математичні моделі кристалізації для систем робастного керування процесами вирощування великогабаритних ГМК;

- проведена оцінка істотних збурень, що діють в системі керування вирощуванням ГМК, отримані оцінки рівня невизначеностей, що властиві процесам кристалізації як ОК;

- проведена декомпозиція процесу вирощування великогабаритних ГМК на інтервали з квазістаціонарними тепловими умовами кристалізації;

- проведено синтез робастних регуляторів за критерієм змішаної чутливості для процесів вирощування галоїдних монокристалів на різних інтервалах з різними тепловими умовами, який дозволяє враховувати особливості процесу кристалізації ГМК і забезпечувати високі динамічні показники системи стабілізації;

- результати моделювання та дослідної експлуатації свідчать про працездатність і ефективність створених багатомірних робастних систем керування вирощуванням великогабаритних ГМК, що дозволяє рекомендувати розроблені концепції, моделі, методи для проектування систем керування процесами виробництва.

Результати впровадженні на установках «РОСТ» в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України.

СПИСОК ПРАЦЬ, ЩО ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Соболев А.В. Моделирование динамических систем на основе клеточных автоматов / Л.В. Дербунович, В.С. Суздаль, А.В. Соболев, // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – №7. – С. 52–57.

Здобувач провів моделювання обтікання розплавом перешкоди.

2. Соболев А.В. Развитие алгоритмы в системах управления выращиванием крупногабаритных щелочно-галоидных монокристаллов / Л.В. Дербунович, В.С. Суздаль, А.В. Соболев, // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – №10. – С. 76–84.

Здобувач обґрунтував вибір оптимальної системи для вирощуванням великогабаритних лужно-галоїдних монокристалів.

3. Соболев А.В. 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.

4. Соболев А.В. Идентификация модели объекта управления при выращивании скнтилляционных монокристаллов / В.С. Суздаль, О.В. Соболев, С.Н. Стрельников // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. – 2008. – №2(20). – С.248-250.

Здобувач обґрунтував метод ідентифікації об'єкта керування.

5. Соболев А.В. Адаптивное управление выращиванием скнтилляционных монокристаллов / В.С. Суздаль, Ю.М. Епифанов, Л.И. Герасимчук, А.В. Соболев, И.И. Тавровский // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – №2. – С.36-40.

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

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

Здобувач провів параметричну ідентифікацію VARMAX моделей.

7. Соболев А.В. Проектирование многомерной робастной системы управления процессами кристаллизации / Суздаль В.С., Соболев А.В., Епифанов Ю.М. // Нові технології / Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. - 2010. - №1(27). - С.151-157.

Здобувач провів синтез робастної системи методом виборчої чутливості.

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

Здобувач провів порівняльний синтез робастного стабілізуючого регулятора для процесів кристалізації.

АНОТАЦІЇ

Соболев О.В. Системи багатомірного робастного керування процесами вирощування великогабаритних галоїдних монокристалів. - Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – системи і процеси керування. Інститут скнтилляційних матеріалів НАН України, Харків, 2011.

Дисертація присвячена розробці систем керування ростом великогабаритних галоїдних монокристалів.

У дисертації обґрунтовано мету та актуальність напрямку дослідження, проведено огляд застосовуваних систем керування ростом галоїдних монокристалів, показані недоліки існуючих систем. Показано переваги робастних методів синтезу регуляторів для систем керування кристалізацією.

Розглянуті питання ідентифікації процесу вирощування як об'єкта керування, вибраний клас моделей та їх структура. Обґрунтована декомпозиція процесу вирощування на квазістаціонарні інтервали, для кожного інтервалу отримана модель, перевірено її адекватність.

Проведено синтез робастних регуляторів методом змішаної чутливості на основі обчислення H_∞ -норм, обґрунтовано вибір функції вартості. Розглянуто процедуру отримання розширеного об'єкта управління для синтезу робастного регулятора з необхідними якостями.

Практична реалізація розроблених процедур і методів керування в промисловому виробництві ГМК дозволила підвищити якість продукції підприємства-виробника.

Ключові слова: синтез систем керування, моделювання систем керування, синтез робастного регулятора, ідентифікація об'єкта керування, H_∞ -норма.

Соболев А.В. Системы многомерного робастного управления процессами выращивания крупногабаритных галоидных монокристаллов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 – системы и процессы управления. Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке систем управления ростом крупногабаритных галоидных монокристаллов.

В диссертации обоснованы цель и актуальность направления исследования, проведен обзор применяемых систем управления ростом галоидных монокристаллов, отмечены недостатки существующих систем. Показаны преимущества робастных методов синтеза регуляторов для систем управления кристаллизацией.

Основными особенностями процессов выращивания крупногабаритных галоидных монокристаллов являются многомерность, нестационарность, присутствие широкого класса производственных возмущений, действующих на объект, наличие неопределенностей.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы идентификации процесса роста как объекта управления, выбраны класс моделей и их структура. Обоснована декомпозиция процесса выращивания на квазистационарные временные интервалы, при этом для каждого интервала получены модели процесса кристаллизации и проверена их адекватность.

Предложенный в работе подход к синтезу робастных регуляторов основан на использовании метода смешанной чувствительности, предполагающего необходимость вычисления H_∞ -норм и выбор функции стоимости. Рассмотрена процедура получения расширенного объекта управления для синтеза робастного регулятора с заданными показателями качества. Разработана и приведена методика выбора весовых матриц с учетом возмущений, действующих на объект управления, и наличия неструктурной неопределенности в модели объекта управления, которые участвуют в формировании

передаточной матрицы расширенного объекта управления. Приведен алгоритм синтеза робастных регуляторов для каждого временного интервала роста галоидного монокристалла.

Показана целесообразность редукции исходной модели объекта управления и модели регулятора методом сбалансированного отсечения с преобразованием реализации в пространстве состояний к системе сбалансированных координат, что позволяет получить практически реализуемые робастные регуляторы пониженного порядка.

В работе предложена функциональная схема системы управления процессом выращивания галоидных монокристаллов. В качестве примера приведен синтез робастных регуляторов для системы выращивания с цилиндрическим тиглем. Проведено моделирование работы системы управления выращиванием монокристаллов на различных временных интервалах выращивания, которое подтвердило возможность промышленного применения предлагаемой методики.

Ключевые слова: синтез систем управления, моделирование систем управления, синтез робастного регулятора, идентификация объекта управления, H_∞ -норма.

Sobolev O.V. The multidimensional systems of robust control process growing large-size halide crystals. – Script. Candidate's thesis. Specialization 05.13.03 - Control Systems and Process. Institute for Single Crystals of NAS of Ukraine, Kharkiv, 2011.

The dissertation devoted to the development of control systems large-size growth halide crystals.

The dissertation proved objective, the relevance of research direction, a review of applicable systems, of control the growth halide crystals, shows the shortcomings of existing systems. Shown the advantages of robust methods for the synthesis of regulators for systems management crystallization.

The problems of identification of the growth process as a control object, selected class of models and their structure. Unsubstantiated decomposition process of growing in the quasi-stationary time intervals for each interval was obtained model, tested its verification.

The synthesis of robust controllers using mixed-sensitivity based on the computation of H_∞ -norms, justified the choice of the cost function. A procedure for obtaining an extended facility management for the synthesis of robust controllers with the required qualities. A method for selecting weighting matrices, taking into account the perturbations acting on the object control and availability of unstructured uncertainties in the model of control object, which are involved in the formation of the transfer matrix of an extended control object.

Practical realization of the developed procedures and control methods in industrial production of HMC allowed to increase quality on the manufacturer.

Keywords: the synthesis control system, the modeling of control systems, the synthesis of robust controller, the identification control object, H_∞ -norm.

Формат 60x84 /16 Ум. друк. арк. 0.9. Тир.100 прим. Зам. № 030-11.
Підписано до друку 01.11.10. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у СПД ФО Бровін О.В.
61022, м. Харків, майдан Свободи, 7, корп.1, к.19. Т. 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК № 3587 від 23.09.09 р.