

На правах рукописи

Лобацевич Константин Львович

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СКОРОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
МОНОКРИСТАЛЛОВ ЛЕЙКОСАПФИРА ПО МЕТОДУ КИРОПУЛОСА
ВВЕДЕНИЕМ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПО СКОРОСТИ
ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ МОНОКРИСТАЛЛА

Специальность 05.13.06– Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент
Юдин Алексей Викторович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Хрящев Юрий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент
Кизимов Алексей Тимофеевич

Ведущая организация

ОАО "Рыбинский завод
приборостроения", г. Рыбинск

Защита состоится 29 декабря 2010 года на заседании диссертационного совета Д 212.210.04 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьева»

Автореферат разослан «29» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Конюхов Б. М.

Актуальность работы

Одним из перспективных направлений энергосберегающих технологий является замена традиционных ламп накаливания на источники освещения на основе сверхъярких светодиодов. Основой для их производства служат подложки, изготавливаемые из монокристаллов лейкосапфира. Одним из методов выращивания таких монокристаллов является метод Киропулоса. При этом качество монокристалла зависит от стабильности скорости кристаллизации при выращивании монокристаллов. Нарушение стабильности приводит к ухудшению качества получаемого монокристалла вплоть до получения поликристаллической були вместо монокристалла. Скорость кристаллизации зависит от температурного градиента фронта кристаллизации, управляя которым можно управлять скоростью кристаллизации.

Метод выращивания и конструкция ростовой установки накладывают ограничения на визуальное наблюдение за процессом роста, поэтому невозможно применить системы управления, основанные на системах технического зрения. При этом измерение температуры фронта кристаллизации так же наталкивается на ряд проблем, главная из которых – невозможность измерения необходимой температуры (порядка 2000 °С) с необходимой стабильностью (порядка 0,1 °С). В связи с этим управление ростом монокристалла возможно только на основе косвенных параметров. На существующих ростовых установках имеется датчик веса, показания которого обычно калибруются в килограммах, с помощью которого измеряется масса растущего монокристалла, при этом косвенным параметром скорости кристаллизации является скорость изменения массы монокристалла.

Существующие системы управления ростовыми установками для выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса не имеют обратной связи по скорости изменения массы монокристалла. Следует отметить, что в процессе управления ростом монокристалла не допускаются резкие воздействия на объект управления, так как они приводят к нарушению структуры монокристалла, поэтому необходимо формирование управляющих воздействий на основе прогнозирования роста монокристалла. Таким образом, для устранения недостатков существующих систем автоматического регулирования требуется, во-первых, замкнуть управление, причём сделать это можно только по косвенному параметру, а во-вторых, сделать систему автоматического управления прогнозирующей.

Цель работы

Повышение стабильности скорости роста монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса.

В данной работе решаются следующие задачи:

1) анализ существующих систем управления ростовыми установками, а так же факторов, влияющих на скорость кристаллизации;

2) разработка системы анализа экспериментальных данных, в том числе разработка алгоритмов вычисления косвенных параметров процесса, определение границы перехода между стадиями роста, определение критерия нахождения системы в состоянии залипания;

3) создание прогнозирующей модели процесса роста монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса и разработка оптимального регулятора на её основе.

Методы исследований

В работе использованы: методы нечёткого логического вывода, методы статистического анализа, численные методы моделирования.

Научная новизна

1) разработана прогнозирующая модель на основе нечёткой модели процесса роста цилиндрической части монокристаллов, а так же определён горизонт прогнозирования;

2) разработан оптимальный регулятор на основе прогнозирующей модели;

3) разработан критерий оценки принадлежности теплового узла к нечёткому кластеру энергетических параметров;

4) разработан алгоритм вычисления скорости изменения технологического параметра с контролем допустимых значений (алгоритм выделения линейных интервалов кусочно-линейной функции), а так же разработан алгоритм определения залипаний на основе оценки нахождения текущей скорости изменения массы монокристалла в допустимом диапазоне.

Практическая ценность

Практическая ценность диссертационной работы состоит в возможности использования в составе систем автоматического управления роста монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса предложенных в данной работе:

1) алгоритма устранения возмущений в виде провалов и сдвигов в данных о массе монокристалла;

2) алгоритма определения залипания 1-го и 2-го рода;

3) алгоритма коррекции тока на нагревателе;

4) прогнозирующей модели процесса роста цилиндрической части монокристалла;

5) структуры прогнозирующего регулятора со скользящим горизонтом прогнозирования;

6) алгоритма выбора необходимой программы разращивания конуса на основе анализа принадлежности к нечёткому кластеру энергетических параметров;

7) разработанного программного обеспечения для анализа данных ростовых процессов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии ООО «Рыбинские Кристаллы» (г. Рыбинск), ООО «Минерал» (г. Александров).

Апробация работы

Материалы диссертационной работы представлены в докладах и конференциях: «XXXIV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ» (2008 г.), «Управление скоростью кристаллизации в процессе выращивания конструкционного сапфира», «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования», (2008 г., Вологда) «Алгоритм определения залипания монокристаллов сапфира», «Теория и практика системного анализа» (2010 г, Рыбинск) «Анализ системы расплав-кристалл при выращивании монокристалла сапфира с помощью аппарата нечёткой логики».

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) нечёткая модель процесса выращивания, основанная на анализе архивных данных технологических процессов;
- 2) прогнозирующая модель на основе нечёткой модели процесса и структура прогнозирующего регулятора на её основе, обеспечивающего безударное управление процессом роста при воздействии возмущений на датчик веса;
- 3) критерий нахождения системы расплав-кристалл в состоянии залипания;
- 4) критерий оценки принадлежности теплового узла к нечёткому кластеру энергетических параметров.

Публикации

По результатам работы опубликовано 5 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка из 100 источников и двух приложений. Содержит 130 страниц основного текста, 2 таблицы, 57 рисунков.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведён анализ особенностей технологического процесса выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса. Данный метод относится к методам с неограниченным объёмом расплава, так как всё исходное сырьё перед выращиванием расплавляется. Он заключается в том, что выращивание осуществляется в самом расплаве (вглубь расплава)

путём плавного снижения температуры. Во время роста монокристалл занимает практически весь объём тигля. Наиболее существенным недостатком данного метода выращивания монокристаллов является нестабильность скорости кристаллизации, так как в процессе роста с изменением массы расплава и кристалла изменяется и теплообмен. Скорость кристаллизации прямо пропорциональна температурному градиенту на фронте кристаллизации. Отсюда следует, что для получения заданной стабильной скорости кристаллизации необходимо управление температурным градиентом фронта кристаллизации.

Температурный градиент зависит от множества факторов, главными из которых являются скорость изменения напряжения на нагревателе, скорость вытягивания монокристалла из расплава, а так же температуры воды в различных контурах охлаждения. Рассматриваемые процессы выращивания проводятся при стабилизированной температуре воды, отклонение которой обычно составляет не более $\pm 0,5$ °С. Таким образом, управление температурным градиентом возможно путём управления скоростью изменения напряжения и скоростью вытягивания.

Анализ конструкции ростовой установки показывает невозможность визуального наблюдения за фронтом кристаллизации. Это связано с характером роста монокристалла, так как монокристалл занимает практически весь объём тигля и при этом фронт кристаллизации находится в расплаве, а так же с наличием экрана-пробки.

Измерение температур фронта кристаллизации так же не представляется возможным. Использование термопар и терморезисторов ограничено их рабочим диапазоном температур, а использование бесконтактных способов измерения температуры с применением пирометров и тепловизоров ограничено наличием экрана-пробки, практически полностью закрывающего расплав.

Так как невозможно визуальное наблюдение и измерение температур фронта кристаллизации, то необходимо использование косвенного параметра, который бы характеризовал скорость кристаллизации. Единственным информационным каналом, по которому можно косвенно судить о состоянии монокристалла, является датчик веса, откалиброванный в килограммах и показывающий массу растущего монокристалла. Масса монокристалла в текущий момент времени зависит от скорости кристаллизации и от площади фронта кристаллизации. С учётом того, что площадь фронта кристаллизации изменяется достаточно медленно, скорость изменения массы монокристалла является косвенным параметром, характеризующим скорость кристаллизации.

В процессе роста монокристалла выделено несколько стадий: стадия выполнения перетяжек, производимая непосредственно оператором вручную, а так же стадия роста монокристалла, состоящая из разращивания конуса, выращивания цилиндрической части монокристалла и стадии доразрачивания. В

данной работе рассматриваются стадии разрачивания конуса и выращивания цилиндрической части монокристалла.

Анализ направления исследований и разработок показывает, что основными направлениями являются моделирование температурного поля ростовой установки и вычисление оптимальных режимов выращивания на основе данных моделей. При этом не производится исследований, связанных с алгоритмами управления данным технологическим процессом.

Во второй главе производится анализ существующих систем управления. В результате анализа определено, что существующие системы управления обладают рядом существенных недостатков:

- большинство систем управления являются разомкнутыми и не имеют обратной связи по скорости изменения массы монокристалла;
- в существующих системах управления не учитываются данные предыдущих проведённых ростовых процессов;
- отсутствует прогнозирование роста монокристалла.

В процессе управления ростом монокристалла не допускаются резкие воздействия на объект управления, так как они приводят к нарушению структуры монокристалла. Классические системы управления на основе ПИД-регулирования не способны к такому управлению, так как в таких системах возмущение по входу регулятора приводит к пропорциональному изменению выхода регулятора, и, соответственно, в случае сильных возмущений будут возникать резкие воздействия на объект управления.

В результате анализа возмущений, действующих на датчик веса, данные возмущения разделены на 2 группы:

- возмущения, связанные с конструктивными особенностями ростовых установок;
- возмущения, связанные непосредственно с процессом роста.

К возмущениям, связанным с конструктивными особенностями, относятся:

- постоянный шум, присутствующий в сигнале тензодатчика;
- задевания и трения штока или монокристалла об экран-пробку;
- возмущения, связанные с системой водяного охлаждения.

Для подавления постоянного шума успешно используются фильтры на основе алгоритма «скользящее среднее», с временными воротами равными 1 минуте. Возмущения, причиной которых является задевание и трение штока или монокристалла, являются случайными и их влияние не может быть снижено с помощью обработки сигнала датчика веса. Причины таких возмущений необходимо устранять путём центровки штока до начала процесса роста.

К возмущениям, связанным непосредственно с процессом роста, относятся:

- возмущения в виде «сдвигов» сигнала;
- возмущения в виде «провалов» сигнала;

- возмущения от залипания монокристалла (прилипания к стенкам тигля). Возмущения в виде «сдвигов» сигнала отличаются от возмущений в виде «провалов» тем, что «провалы» являются краткосрочными отклонениями, время их длительности составляет не более 3 минут. Наиболее часто встречающиеся «сдвиги» имеют величину до 100 г, при этом так же встречаются «сдвиги» с амплитудой до 700 г, такие «сдвиги» говорят о нарушении технологического процесса. Возмущения от залипания монокристалла можно разбить на возмущения 1-го рода, вызванные трением монокристалла о стенки тигля (рис. 1 а)), и 2-го рода, вызванные прилипанием монокристалла к стенкам тигля, при котором монокристалл перестаёт двигаться относительно тигля (рис. 1 б)).

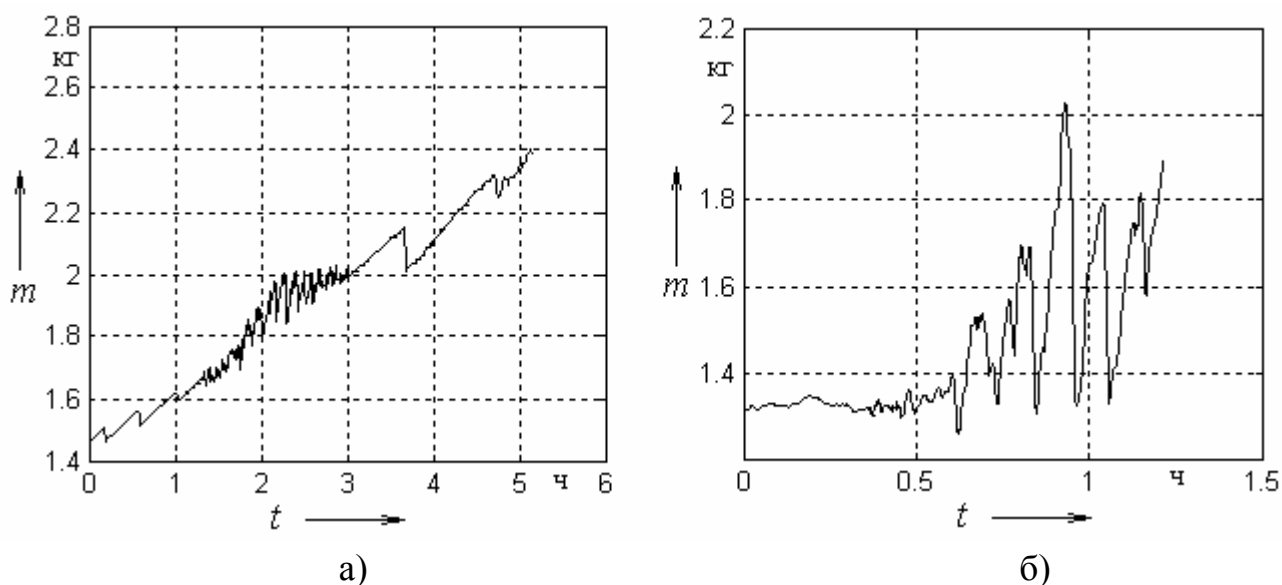


Рис. 1. Зависимость массы от времени, характеризующая
а) – залипание 1-го рода и б) – залипание 2-го рода

Для уменьшения влияния возмущений на расчёт скорости изменения массы предложены специальные алгоритмы. Алгоритм устранения возмущений в виде «сдвигов» и «провалов», основанный на измерении отклонения текущей массы монокристалла, позволяет устранять «сдвиги» и «провалы». Данный алгоритм имеет 2 параметра – время расчёта скорости изменения массы и порог отклонения. При применении алгоритма к имеющимся данным установлено, что для эффективного устранения сдвигов и провалов порог отклонения целесообразно принять равным 5 г/час.

Алгоритм обнаружения залипаний 1-го рода основан на контроле отклонения дисперсии сигнала датчика относительно нормальной дисперсии сигнала на данном процессе. При этом если отклонение дисперсии составляет больше 10 % от нормальной дисперсии сигнала для данного процесса, то это значит, что произошло залипание 1-го рода.

Алгоритм определения залипания 2-го рода основан на контроле вхождения текущей скорости изменения массы в диапазон скоростей. При этом если текущая скорость превышает допустимый диапазон, то это значит, что имеет место залипание 2-го рода.

Для вычисления текущей скорости изменения массы разработан алгоритм аппроксимации кусочно-линейной функцией с динамическим определением интервалов. Параметрами данного алгоритма является время расчёта скорости и порог превышения прогнозируемой массы монокристалла. При настройке алгоритма для расчёта скорости изменения массы имеющихся данных время расчёта было определено равным 10 минут, а порог рассогласования – равным 10 г.

При анализе непосредственно объекта управления определено, что он является существенно нелинейным. Несмотря на то, что в 90 % случаев оператор не в состоянии сформулировать какой-либо точный количественный критерий, операторам и технологам на основе своего опыта удаётся успешно управлять технологическим процессом, не прибегая при этом к каким-либо сложным математическим формулам, объектам, структурам и инструментам. Такое положение дел наталкивает на использование принципиально иного инструмента идентификации нелинейных систем, а именно использования математического аппарата нечёткой логики.

Оценивая возможности данного инструмента для решения задачи построения системы автоматического управления технологическим процессом выращивания монокристалла лейкосапфира можно выделить следующие особенности аппарата нечёткой логики:

1) Согласно теореме о нечёткой аппроксимации, доказанной Б. Коско, любая математическая система может быть аппроксимирована системой на основе математического аппарата нечёткой логики. Таким образом, в принципе может быть получена модель любого нелинейного объекта управления, в том числе объекта управления для системы автоматического управления ростом монокристалла сапфира как частный случай.

2) Идентификация нелинейных систем с помощью аппарата нечёткой логики обходится без использования интегрального и дифференциального исчисления, традиционно применяемого при создании систем управления и при идентификации систем.

Обобщая преимущества данного инструмента, можно сделать вывод, что использование математического аппарата нечёткой логики для проектирования системы автоматического управления выращиванием монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса наиболее эффективно по сравнению с традиционными методами. При этом нечёткая модель процесса является основой для прогнозирующего регулятора, входящего в структуру системы

управления ростовой установкой. Предложенная структура системы автоматического управления представлена на рис. 2.

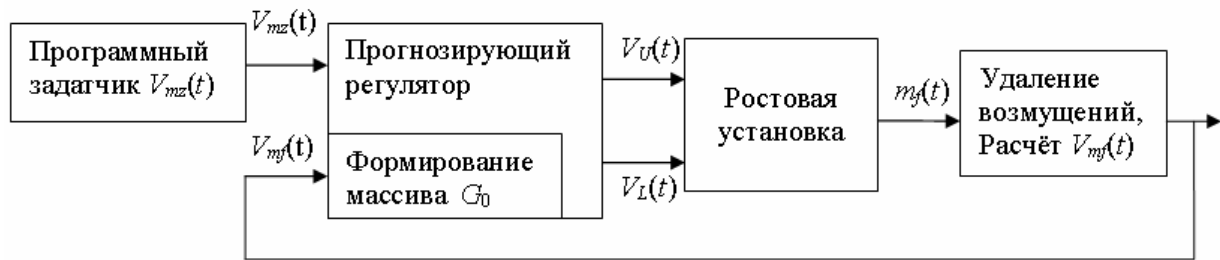


Рис. 2. Структура системы автоматического управления с прогнозирующим регулятором

В данной структуре $m_f(t)$ – фактическая масса, $V_{mf}(t)$ – рассчитанная скорость изменения массы, $V_{mz}(t)$ – задаваемая траектория скорости изменения массы на горизонте прогнозирования, $V_U(t)$ – скорость изменения напряжения, $V_L(t)$ – скорость вытягивания монокристалла, G_0 – массив начальных условий (содержит начальные скорости изменения напряжения, изменения массы, вытягивания, а также массу монокристалла на момент расчёта).

В третьей главе описана разработка математической модели роста монокристалла лейкосапфира. На основе классификации математических моделей произведено выделение отличительных признаков данной модели, таких как:

- нелинейность;
- функциональная модель, а конкретнее модель в виде «чёрного ящика»;
- модель вида «много входов – один выход»;
- модель на основе аппарата нечёткой логики.

При анализе технологического процесса выделено несколько стадий роста монокристалла, в частности стадия разращивания конуса и стадия роста цилиндрической части. Таким образом, разработанная модель представляет собой не один «чёрный ящик», а совокупность нескольких «чёрных ящиков» – подмоделей, которые на основании определённого критерия переключаются с одного на другой. При этом необходимо выявить характерные черты стадий роста конуса и цилиндра, и определить критерий разделения на данные стадии.

Конус представляет собой часть монокристалла, рост которой отличается постоянным увеличением диаметра монокристалла в достаточно широких пределах (от размера перетяжек, составляющих обычно от 20 мм до 60 мм в диаметре, до 200 мм). При этом скорость изменения массы также изменяется в широких пределах. Рост цилиндрической части монокристалла отличается незначительным изменением диаметра (не более 20 мм). Если рассматривать конус и цилиндр в качестве экранов, мешающих отведению тепла от расплава, то очевидно, что они будут по-разному влиять на температурное поле.

Критерием разделения на конус и цилиндр предложен статистический критерий разделения на основе массы монокристалла. На основании данного критерия можно утверждать, что если масса монокристалла меньше $3 \pm 0,5$ кг, то с вероятностью 90% кристалл находится в стадии выращивания конуса.

В результате анализа существующих систем управления ростовыми установками обнаружено, что данные системы не обладают инструментами для анализа проведённых процессов роста, в связи с чем разработано программное обеспечение для просмотра архивов процессов и конвертирования их в файлы, пригодные для использования в *MATLAB*.

В данных, полученных при проведении процессов роста, отсутствуют данные о скорости изменения массы, скорости изменения напряжения и скорости вытягивания. Вместо этого имеются данные о массе, напряжении и относительном положении штока с монокристаллом. Для расчёта необходимых косвенных параметров разработаны алгоритмы на основе определения интервалов кусочно-линейной функции. Параметрами алгоритма являются временные ворота Δt , а так же порог рассогласования ε . При обработке данных с помощью этого алгоритма были определены следующие параметры для различных данных: для расчёта скорости изменения массы $\Delta t = 0,16$ ч, $\varepsilon = 0,01$ кг, для расчёта скорости изменения напряжения $\Delta t = 0,5$ ч, $\varepsilon = 0,0015$ В, для расчёта скорости вытягивания $\Delta t = 0,5$ ч, $\varepsilon = 0,1$ мм.

Для моделирования поведения системы расплав-кристалл на стадии роста цилиндра создана модель на основе нечёткой логики (рис. 3).

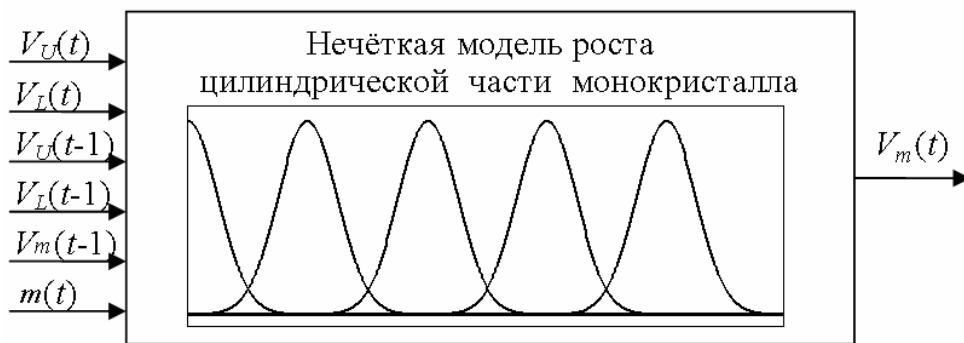


Рис. 3. Нечёткая модель роста цилиндрической части монокристалла

На вход модели подаётся массив из 6-ти значений: скорости вытягивания в текущий $V_L(t)$ и предыдущий $V_L(t-1)$ моменты времени, скорости изменения напряжения в текущий $V_U(t)$ и предыдущий $V_U(t-1)$ моменты времени, масса монокристалла на момент выполнения расчёта $m(t)$ и скорость изменения массы в предыдущий момент времени $V_m(t-1)$. Выходом модели является скорость изменения массы в текущий момент времени $V_m(t)$. Структура модели основана на нечёткой кластеризации по горному алгоритму. В результате

функции принадлежности выбраны в виде функций Гаусса. При этом каждый вход модели имеет 80 функций принадлежности. Для построения структуры модели на основе нечёткой кластеризации и обучения модели использованы наборы данных, полученные из данных проведённых технологических процессов. Полученная модель адекватно описывает 70 % процессов, при этом погрешность моделирования составляет не более 25 %. Адекватно описываются как процессы, участвовавшие в обучении, так и не участвовавшие процессы, что говорит о том, что модель с предложенной структурой способна адекватно описывать процесс роста цилиндрической части монокристалла, но для её обучения недостаточно данных.

Моделирование роста монокристалла на стадии разращивания конуса на основе нечёткой логики привело к тому, что не было получено ни одной нечёткой модели, которая бы адекватно работала на данных имеющихся процессов. В качестве пути решения этой задачи предложено использовать модель, основанную на физических процессах, которая включает в себя модель термического процесса и модель роста монокристалла в зависимости от степени переохлаждения. Построение данных моделей наталкивается на сложность измерения температуры, что на данный момент не предусмотрено конструкцией ростовых установок. Вместо этого целесообразно использовать набор программ разращивания, выбираемых на основе начальных условий. В качестве начальных условий для модели разращивания конуса предложена точка $(U_H; P_H)$ (напряжение и активная мощность на нагревателе), определяемая в конце стадии перетяжек. Совокупность таких точек для имеющихся процессов (рис. 4) лежит в пределах от 8,6 В до 9,8 В по напряжению и от 44 кВт до 52 кВт по мощности. На основе анализа принадлежности текущей точки к тому или иному кластеру энергетических параметров выбирается необходимая программа разращивания конуса.

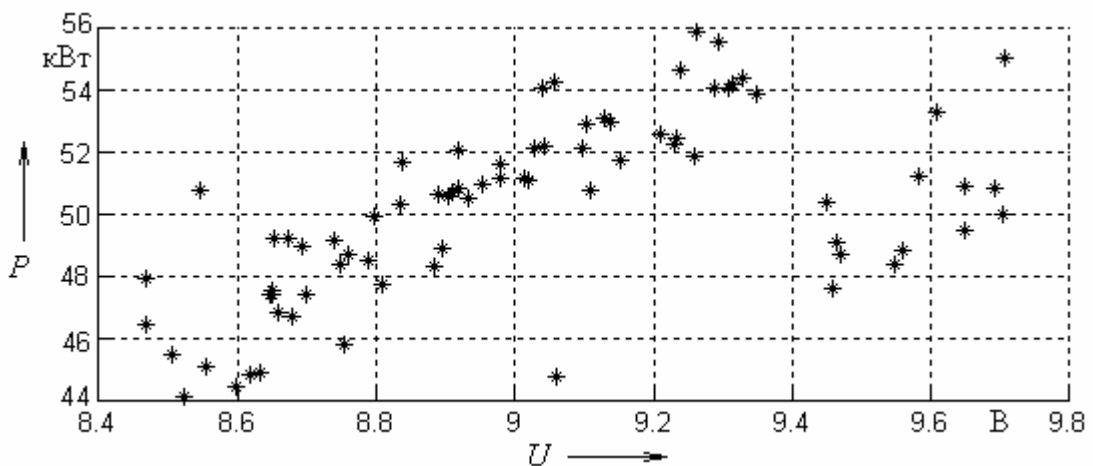


Рис. 4. Совокупность точек $(U_H; P_H)$ для разных процессов

В процессе анализа энергетических параметров обнаружены отклонения тока, вызываемые изменением сопротивления нагревателя. Данные изменения выделены в 2 группы: обратимые и необратимые изменения. Для коррекции напряжения на нагревателе при возникновении отклонений тока нагревателя, связанных с изменением его сопротивления предложено корректирующее звено, основанное на 2-х алгоритмах: алгоритме обнаружения отклонения и алгоритме расчёта корректирующего воздействия.

В четвёртой главе описана прогнозирующая модель роста цилиндрической части монокристалла лейкосапфира, построенная на основе нечёткой модели процесса роста цилиндрической части монокристалла. Для создания прогнозирующей модели на основе анализа скорости изменения массы монокристалла определён горизонт прогнозирования, который выбран равным 2-м часам, или 12-ти отсчётам с периодом дискретизации 10 минут. На основе входных массивов начальных условий и управления модель формирует выходной массив из 12-ти значений скорости изменения массы за 12 отсчётов. Погрешность прогнозирования при этом составила не более 25 %.

Для управления процессом роста на основе прогнозирующей модели создан регулятор, функциональная схема которого показана на рис. 5 (для горизонта прогнозирования в 12 отсчётов).

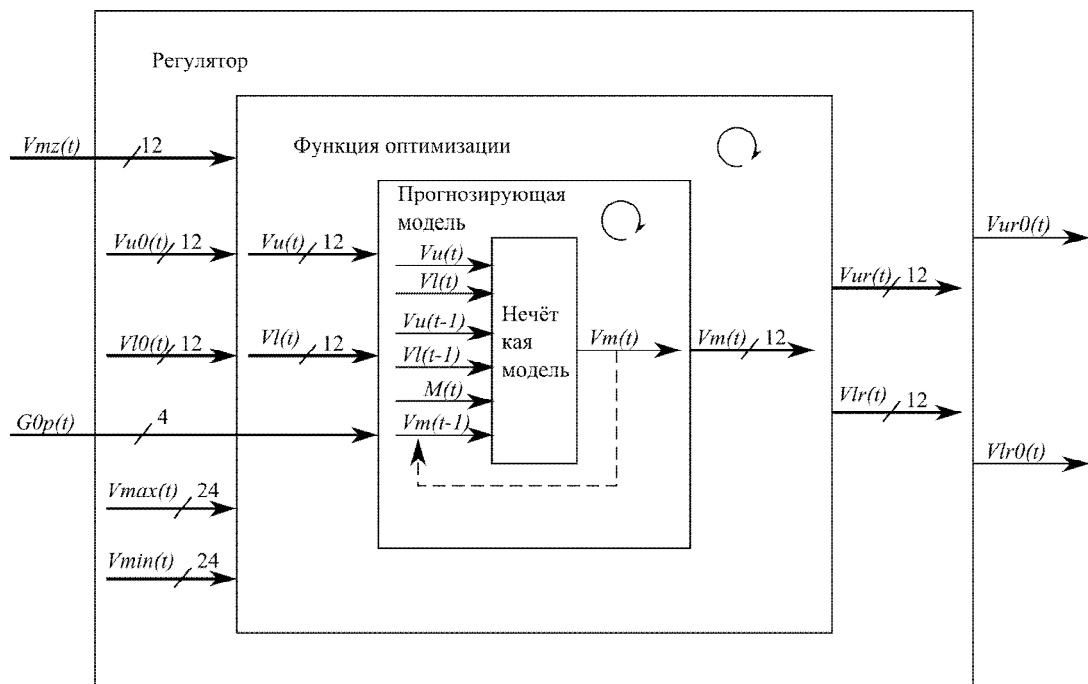


Рис. 5. Схема прогнозирующего регулятора

Здесь $V_{mz}(t)$ – массив желаемой траектории скорости изменения массы, $G0p(t)$ – массив начальных условий (для нечёткой модели, содержит скорости изменения параметров в предыдущий момент времени, а так же массу монокристалла на момент выполнения расчёта). Из данного массива внутри

регулятора формируются массивы начальных значений скорости вытягивания и скорости изменения напряжения $Vl_0(t)$ и $Vu_0(t)$ соответственно, а так же массивы задания граничных значений для расчёта $Vmax(t)$ и $Vmin(t)$. Функция оптимизации вызывает прогнозирующую модель и передаёт в неё скорости вытягивания $Vl(t)$ и скорости изменения напряжения $Vu(t)$. Прогнозирующая модель формирует траекторию скорости изменения массы $Vm(t)$, которая на основе критерия оптимума оценивается функцией оптимизации. Когда критерий выполняется, то функция оптимизации возвращает в регулятор рассчитанное оптимальное управление скоростью вытягивания $Vlr(t)$ и скоростью изменения напряжения $Vur(t)$. Из данных массивов регулятор выбирает значения скорости вытягивания $Vlr_0(t)$ и скорости изменения напряжения $Vur_0(t)$, соответствующие первому отсчёту, и передаёт их на объект управления. После чего сдвигается горизонт и расчёт повторяется.

В качестве критерия оптимума предложен критерий минимума суммы квадратов отклонений задаваемой и прогнозируемой траекторий скорости изменения массы. В случае, когда критерий для формируемого управления минимален, это значит, что прогнозируемая траектория скорости изменения массы наиболее близка к задаваемой, при этом достигается наиболее возможная стабильность скорости изменения массы. Моделирование работы регулятора на основе данных проведённых процессов показывает, что такой регулятор обеспечивает необходимое прогнозирующее управление скоростью кристаллизации, при этом повышается стабильность скорости кристаллизации по сравнению с процессами под управлением существующих систем автоматического регулирования. Однако следует отметить, что существуют случаи, когда предложенный регулятор не способен формировать адекватное управление. Такими случаями являются, например, выход используемых для управления скоростей изменения какого-либо параметра за пределы установленного диапазона. В таком случае управление должно быть переключено с прогнозирующего регулятора на другой вид управления, например, на управление на основе разделения параметров.

Заключение

1) Проведенный анализ существующих промышленных ростовых установок показал отсутствие автоматизированных систем управления ростом монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса, что связано со сложностью структуры объекта управления. Конструкционные ограничения, присущие данным установкам, не позволяют наблюдать ни форму фронта кристаллизации, ни диаметр выращиваемого монокристалла. В связи с этим управление ростом монокристалла возможно только на основе косвенного

параметра, в качестве которого предложена скорость изменения массы монокристалла.

2) Анализ имеющихся данных об изменении массы монокристалла в процессе роста позволил выявить большое количество возмущений, препятствующих построению адекватной модели процесса. Для снижения влияния возмущений был разработан ряд алгоритмов предварительной обработки информации: алгоритмы вычисления скорости изменения напряжения, скорости вытягивания, скорости изменения массы; алгоритм удаления «сдвигов» и «провалов» массы, а также алгоритмы определения залипания, использование которых позволяет существенно сократить время обнаружения залипания, а, следовательно, и повышает вероятность его устранения.

3) Существенное различие в стадиях роста требует разделения процесса управления на несколько стадий на основе разработанного статистического критерия. Для управления на стадии разращивания конуса разработана модель, представляющая собой набор программ разращивания, выбираемых на основе начальных условий: напряжения и мощности на нагревателе, определяемых в конце стадии перетяжек.

4) Для управления ростом цилиндрической части монокристалла с учетом недопустимости резких управляющих воздействий необходимо применение прогнозирующего управления. Для решения этой задачи разработана модель роста цилиндрической части монокристалла. Для создания модели, с учетом существенной нелинейности объекта управления, был выбран математический аппарат нечёткой логики. Созданная нечёткая модель роста содержит 6 входов и 1 выход, более 80 функций принадлежности. Для ее обучения использованы данные с более чем 60 процессов.

5) На основе нечёткой модели роста цилиндрической части монокристалла лейкосапфира создана прогнозирующая модель, которая позволяет рассчитать рост монокристалла на заданном горизонте прогнозирования.

6) На основе прогнозирующей модели разработан оптимальный регулятор. В основу оптимального регулятора скорости роста монокристаллов положен принцип оценки отклонения прогнозируемой траектории, полученной от прогнозирующей модели, от желаемой, задаваемой технологом. В качестве критерия оптимизации предложен критерий минимума квадрата отклонения желаемой траектории от заданной.

7) Разработанные модели и алгоритмы позволили решить поставленную в данной работе цель, а именно повысить стабильность скорости кристаллизации монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса. Применение разработанных алгоритмов и моделей позволило повысить стабильность скорости кристаллизации не менее чем на 20 процентов.

Список публикации по теме диссертации**Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1) **Лобацевич, К. Л.** Объединённая модель электротермического процесса. [Текст]. / К. Л. Лобацевич, А. В. Юдин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьёва. Рыбинск, 2010 г. – № 1 (16).– С. 157 – 162;

2) **Юдин, А. В.** Беспойсковая адаптивная система стабилизации скорости кристаллизации монокристаллов. [Текст]/ А. В. Юдин, К. Л. Лобацевич, // Автоматизация и современные технологии. – М: Машиностроение, 2010 г. – № 11 .– С. 23 – 26;

Прочие публикации

3) **Лобацевич, К. Л.** Управление скоростью кристаллизации в процессе выращивания конструкционного сапфира [Текст] / К. Л. Лобацевич // Материалы конференции «XXXIV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ». – М., 2008 г. – С. 72;

4) **Лобацевич, К. Л.** Алгоритм определения залипания монокристаллов сапфира [Текст] / К. Л. Лобацевич // Материалы конференции «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надёжность машин, приборов и оборудования». Вологда. – 2008 г. – С. 10 – 11;

5) **Лобацевич, К. Л.** Анализ системы расплав-кристалл при выращивании монокристалла сапфира с помощью аппарата нечёткой логики [Текст] / К. Л. Лобацевич // Материалы конференции «Теория и практика системного анализа». Рыбинск. – 2010 г. – С. 164 – 168.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 29.11.2010.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 2. Тираж 100. Заказ 153.

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П. А. Соловьёва
(РГАТА имени П. А. Соловьёва)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТА имени П. А. Соловьёва
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53