

НА ЛОУ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

УДК 621.513.7

ИВАНОВ

Леонид Леонидович

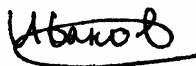
**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ
ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ
УПРАВЛЯЕМОГО ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.13.01

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2003

Научный руководитель: доктор технических наук, академик РАЕН,
профессор ПУПКОВ Константин Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор КРАВЧЕНКО Виктор Алексеевич,
Московский государственный институт электроники и математики

Ведущая организация: доктор технических наук,
профессор ИВАНОВ Л.П.,
Исследование и применение методов идентификации и оптимизации в задаче управляемого вакуумного нагрева. С.А. Векшинского

У 1661310

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

заседа
енном
кв. 2-

Э. Бауман

Иванов В.А.

Б-ка МГТУ им. Н.Э. Баумана



1661310
Иванов Л.П. Исследование и

Актуальность работы. Технология ионноплазменного напыления (ИПН) характеризуется широкой практической областью применения, в частности, развитие нанотехнологий было бы невозможно без применения ИПН. Разработка и синтез наноструктурных материалов с новыми или значительно улучшенными свойствами становится одной из приоритетных современных задач. Развитие этой технологии требует совершенствования методов получения качественных покрытий, в том числе путем применения интеллектуальных технологий при создании системы автоматического управления (САУ) технологическим процессом (ТП) ИПН.

На текущий момент существует ряд проблем с получением качественных покрытий, что связано с ограничениями технологического оборудования, высокой его стоимостью, а так же с несовершенством применяемых САУ.

Современные тенденции получения тонкопленочных покрытий предполагают уменьшение толщины (10 – 100 нм), увеличение количества (10 – 30) промежуточных слоев, создание многокомпонентных и наноразмерных (1 – 10 нм) пленок.

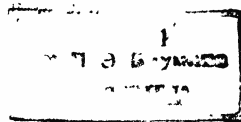
Ключевыми задачами синтеза САУ являются построение математического описания ТП ИПН, как объекта управления, и управление ТП ИПН.

Проблемы синтеза САУ ТП ИПН состоят в сложности математического описания ТП. Для ТП ИПН не существует универсальной структуры модели, математическое описание, полученное для одного типа оборудования может кардинально отличаться для оборудования другого типа. Поэтому важной задачей является создание алгоритмов построения математического описания ТП ИПН как объекта управления, позволяющих строить адекватные модели с учетом имеющегося технологического оборудования и среды функционирования.

В задаче управления ТП ИПН можно выделить проблемы выбора технологического режима, стабилизации динамических параметров ТП ИПН и перевода динамической системы между заданными технологическими режимами. Каждая из этих проблем является важной задачей, и от ее решения во многом зависит качество готовой продукции.

Цель работы – разработка алгоритмического обеспечения САУ ТП ИПН для построения математического описания ТП ИПН, и повышения производительности системы управления ТП ИПН.

Эту цель предлагается достигать путем использования нового формализованного подхода к проблеме построения модели ТП ИПН и улучшения динамических параметров газовой системы, при помощи применения алгоритмов идентификации и оптимального управления. В соответствии с поставленной целью основными *задачами работы* являются:



- Исследование ТП ИПН как объекта управления: выделение основных факторов влияющих на ТП ИПН, исследование особенностей ТП ИПН, выбор структуры САУ ТП ИПН.
- Разработка и исследование методов математического описания ТП ИПН как объекта управления. Разработка алгоритма построения модели ТП ИПН.
- Исследование методов оптимального управления динамическими параметрами ТП ИПН для задачи перевода между заданными технологическими режимами. Исследование алгоритмов на примере вакуумной системы установки ИПН.

Методическая основа исследования. Теоретической основой исследования являются методы математической статистики, теории оптимального управления, теории идентификации и теории тонких пленок.

Научная новизна и практическая ценность работы. На основе анализа и систематизации научных достижений в таких областях, как теория автоматического управления, информатика, вычислительная математика, статистика, физика и технология производства тонких пленок, сформирован комплексный формализованный подход к решению задачи построения математического описания ТП ИПН и апробировано решение задачи регулирования динамических параметров ТП с помощью одного из методов оптимального управления.

В ходе выполнения работы получены следующие теоретические и практические результаты:

1. Разработан новый алгоритм «Пороговый алгоритм К-сложности» построения модели ТП ИПН, включающий в себя достоинства итерационных и комбинаторных алгоритмов метода группового учета аргумента (МГУА).
2. Предложен новый вид пороговых функционалов, позволяющий производить селекцию базисных элементов с учетом набора лучших структур моделей на текущем шаге.
3. Усовершенствована система управления установкой ИПН многокомпонентных износостойких покрытий за счет внедрения алгоритмов оптимального управления газовой системой.

Реализация и внедрение результатов.

Разработанные в рамках настоящей работы алгоритмы, электрические схемы и программное обеспечение внедрены в научно-исследовательской лаборатории кафедры МТ11 (электронные технологии и машиностроение) МГТУ им. Н.Э. Баумана и применяются в учебном процессе, а также созданные алгоритмы используются в ОАО ЦНИТИ «Техномаш» при разработке технологического оборудования для формирования поверхностей с заданными свойствами на основе вакуумных методов нанесения тонких пленок.

Апробация работы. Материалы теоретических исследований были представлены на трех научно-технических конференциях, а также на семинарах «Интеллектуальные системы», регулярно проводимых кафедрой ИУ–1 МГТУ им. Н.Э. Баумана и на семинаре кафедры МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана. По результатам проведенных исследований опубликовано 3 научных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 94 наименований и 2 приложений. Основная часть работы составляет 209 страниц машинописного текста, и содержит 6 таблиц и 50 рисунков. Общий объем приложений – 20 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

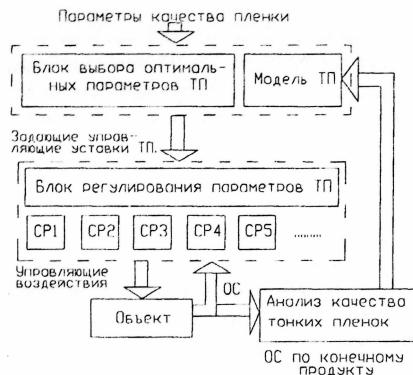
Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, обоснована практическая ценность и научная новизна исследований. Приведены сведения о широкой области применения технологии ИПН и показаны современные тенденции развития практических приложений.

Первая глава содержит постановку задачи построения системы автоматического управления технологическим процессом ионноплазменного напыления. Рассмотрены проблемы, связанные с влиянием параметров внешней среды и с особенностями технологического оборудования установки на готовую продукцию. Выделены основные параметры, влияющие на качество готовой продукции. Представлена структурная схема САУ ТП ИПН.

Процесс ИПН является сложной нелинейной динамической системой, работу которой определяет множество параметров. Большое влияние на качество готовой продукции оказывают внешние факторы, такие как параметры применяемого оборудования, основы, на которые наносятся тонкопленочные покрытия, квалификация обслуживающего персонала и параметры производственного помещения, в которых производится технологический цикл. ТП имеет большую сложность описания, связанную с недостатком теоретической проработкой теории тонких пленок. Поэтому процент выхода готовой продукции часто бывает низким. И для его повышения необходимо создание нового технологического оборудования, оснащенного современными алгоритмами теории управления.

Синтез САУ ТП ИПН осложнен современным уровнем развития технологического оборудования и высокой его стоимостью. При практической реализации в реальном времени удается контролировать только часть технологических параметров и показателей качества тонкопленочных покрытий. Полноценный анализ изделия возможен только после окончания ТП.

Вследствие этих проблем реализация управления ТП ИПН как единой динамической системой в реальном времени в современных условиях представляется невозможной. Для построения САУ производится декомпозиция объекта на независимые системы. Структура САУ ТП ИПН в данной работе рассматривается как система управления, представленная в виде композиции систем регулирования (СР).



Выбор параметров технологического процесса (уставок) и выработка управляющих воздействий разделен во времени.

На первом этапе при наличии информации о желаемом качестве конечной продукции, на основе математической модели, выбирается технологический режим, характеризующийся некоторыми постоянными технологическими параметрами. Особенностью математической модели ТП является то, что она не описывает полную динамику системы. В модели учитываются изменения параметров качества пленки в зависимости от стационарных или линейно изменяемых значений параметров технологического процесса. Полное динамическое описание всего процесса в реальном времени получить невозможно из-за недостаточного развития контролирующего технологического оборудования.

На втором этапе производится стабилизация заданных технологических параметров, которые являются динамическими величинами. Для этого объект разделяется на независимые подсистемы и для каждой подсистемы синтезируется своя СР. Для реализации СР используются как классические методы теории регулирования, так и современные методы теории автоматического управления. Использование композиции СР позволяет стабилизировать параметры ТП без наличия полного динамического описания ТП. Для получения высококачественных тонкопленочных покрытий необходимо улучшение показателей качества работы системы. Применение методов теории оптимального управления позволяет улучшить динамические свойства системы и, как следствие, показатели качества без приобретения нового дорогостоящего вакуумного оборудования.

На третьем этапе, после окончания ТП ИПН, производится анализ покрытий в лабораторных условиях. Если качество пленки не удовлетворяет заданным требованиям, то производится корректировка модели технологического процесса с учетом новых экспериментальных данных, технологических параметров и информации о внешней среде.

Вторая глава посвящена исследованию методов получения математической модели на основе экспериментальных данных. Предложен алгоритм построения математического описания ТП ИПН.

Проведен краткий анализ имеющихся методов идентификации, и для построения модели ТП ИПН выбран класс алгоритмов МГУА. Самоорганизующиеся методы МГУА позволяют эффективно решать задачи структурно-параметрической идентификации моделей сложных систем.

Исследованы основные направления развития алгоритмов МГУА и предложен новый класс методов называемый «Пороговый алгоритм МГУА К-сложности».

Структура предлагаемого метода похоже на структуру итерационного алгоритма МГУА. Однако за счет введения расширенной селекции на каждом шаге итерации и нового вида порогового функционала производится более целенаправленный перебор, по сравнению с итерационным алгоритмом, что позволяет получить более помехоустойчивую, в смысле внешних критериев, математическую модель.

Как и в других алгоритмах МГУА, в пороговом алгоритме МГУА К-сложности модель – это линейная связь между нелинейными характеристиками процесса

$$y = A^T F(y^*, z), \quad (1)$$

где y — вектор выхода описываемой системы; F — заданный вектор базисных функций; зависящий от базисных элементов; z — вектор входа описываемой системы; y^* — вектор выхода описываемой системы, взятый с запаздыванием (для случая построения модели динамического процесса); A^T — матрица коэффициентов модели. Размерности этих векторов и матрицы определяются автоматически в процессе работы алгоритма.

Важной особенностью методов МГУА является то, что при формировании вектора z может использоваться априорная информация о ТП ИПН. Если заранее известна функциональная зависимость, с которой некоторые параметры влияют на исследуемый объект, то вектор z можно дополнить элементами, состоящими из этих функциональных зависимостей.

Для селекции моделей используются классические критерии МГУА. Выборка X разделяется на три непересекающихся части A, B, C причем $W = A \cup B$. Вектора X, Y представляются в виде:

$$X = \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_W \\ X_C \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} Y_A \\ Y_B \\ Y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_W \\ Y_C \end{bmatrix},$$

тогда симметричный критерий точности записывается как

$$d^2 = d^2(A|B, B|A) = \Delta^2(A|B) + \Delta^2(B|A) = \|y_A - X_A \hat{a}_B\|^2 + \|y_B - X_B \hat{a}_A\|^2, \quad (2)$$

симметричный критерий стабильности

$$d^2 = d^2(W|A, W|B) = \Delta^2(W|A) + \Delta^2(W|B) = \|y_W - X_W \hat{a}_A\|^2 + \|y_W - X_W \hat{a}_B\|^2,$$

а критерий согласованности

$$\tilde{n}_{CM}^2 = \|\hat{y}_B(A) - \hat{y}_B(B)\|^2 = \|X_B \hat{\theta}_A - X_B \hat{\theta}_B\|^2 = (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B)^T X_W^T X_W (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B), \quad (3)$$

Основным отличием предлагаемого порогового алгоритма МГУА К-сложности от классических итерационных методов в формализации способа генерации структур. Как и для итерационного алгоритма, на каждом шаге r существует P лучших структур

$$f_1^{(r)}, f_2^{(r)}, f_3^{(r)}, \dots, f_P^{(r)},$$

и для получения новых структур на шаге $r+1$ используется функция генерации новых структур

$$g\left(f_{i_1}^{(r)}, f_{i_2}^{(r)}, f_{i_3}^{(r)}, \dots, f_{i_p}^{(r)}; \vartheta\right) = f_i^{(r+1)}(\cdot; \theta) \in G,$$

где G – класс структур, в котором производится поиск модели, $f_{i_1}^{(r)}, f_{i_2}^{(r)}, f_{i_3}^{(r)}, \dots, f_{i_p}^{(r)}$ – p моделей полученных на шаге r , ϑ – вектор параметров, которые определяется в зависимости от типа алгоритма. Полученные структуры содержат новые базисные элементы. Каждый базисный элемент оценивается с помощью порогового функционала

$$CR(x_i) = \max_{j=1, \overline{F}} \left(J(f_j^{(r)}) - J(f_j^{(r)}, x_i) \right), \quad (4)$$

где $J(f_j^{(r)})$ – значение внешнего критерия для структуры $f_j^{(r)}$, $J(f_j^{(r)}, x_i)$ – значение внешнего критерия для структуры, состоящей из базисных элементов структуры $f_j^{(r)}$ и элемента x_i .

Использование порогового функционала вида (4) позволяет учесть изменения, вносимые базисным элементом, с учетом уже имеющегося набора лучших структур. Новые базисные элементы сортируются по убыванию, и отбирается первых t элементов таким образом, чтобы количество структур, удовлетворяющих условию перебора

$$\eta = \eta\left(\bar{f}\right) \quad (5)$$

и состоящих из базисных элементов структур $f_i, i = \overline{1, F}$ и t новых элементов, не превышало K . Правило перебора (5) имеет два значения 1 и 0 (структура

$\bar{f}$ удовлетворяет правилу перебора и не удовлетворяет соответственно). Значение η определяется в зависимости от алгоритма, в простейшем случае η может быть равно 1, то есть все структуры будут удовлетворять правилу перебора.

Далее производится полный перебор среди структур, удовлетворяющих правилу перебора (5), состоящих из t первых полученных элементов, базисных элементов структур $f_i^{(r)}, i = \overline{1, P}$.

Предложенный пороговый алгоритм К-сложности является в некотором смысле объединением комбинаторного и итерационного алгоритмов. Но, за счет расширенной селекции, предлагаемый алгоритм позволяет получать более помехоустойчивые модели, в смысле используемых внешних критериев. Однако при этом незначительно увеличиваются временные затраты по сравнению с итерационным алгоритмом.

Как и все алгоритмы МГУА, пороговый алгоритм К-сложности дает возможность разработчику модели влиять только на выбор входных базисных элементов z и на вид критерия селекции, а структура и параметры модели определяются независимо от разработчика.

Основные временные затраты в предлагаемом пороговом алгоритме К-сложности связаны с необходимостью локального перебора структур. Их можно снизить, используя средства параллельного вычисления. Причем структура алгоритма при этом практически не меняется, так как временные затраты связаны с независимыми матричными вычислениями, которые можно проводить параллельно. Использование специализированных микропроцессоров, ориентированных на векторные операции, также может значительно сократить временные затраты.

В данной работе при построении математического описания объекта предлагается использовать некоторое компромиссное решение между математическим аппаратом моделирования и эмпирическими знаниями технолога. Процесс ИПН, с одной стороны, является сложным динамическим объектом, зависящим от большого количества параметров. Для уменьшения количества экспериментов необходимо учитывать мнение специалиста, но структура модели, предложенная экспертом, не всегда может соответствовать действительности из-за субъективности мнения специалиста. Поэтому при построении модели предлагается учитывать мнение эксперта на этапах выделения факторов, от которых зависит качество конечной продукции и формирования экспериментальных данных, а формирование математических зависимостей выполняется независимо от эксперта с помощью алгоритмов МГУА. Получение математического описания процесса состоит из следующих этапов:

- на основе эмпирических знаний специалист выделяет основные факторы, влияющие на качество готовой продукции;
- производится варьирование выделенных факторов и заполняется таблица экспериментальных данных;

- на основе теоретических и практических предположений эксперта о структуре математического описания формируется входной базис элементов, для формирования модели;
- проводится поиск математической зависимости показателей качества продукции от выделенных экспертом параметров с использованием методов МГУА.

В третьей главе исследуются проблема построения блока регулирования, задача повышения динамических характеристик объекта и вопрос построения динамической модели объекта.

Построение СР технологических параметров является одной из важнейших задач построения САУ ТП ИПН.

Рассматривается вопрос модернизации регуляторов за счет использования методов теории автоматического управления. Предлагается ввести дополнительный блок регулирования параметров, реализуемый с помощью ЭВМ, что позволяет увеличить показатели качества работы системы без использования конструкционного изменения технологического оборудования.

Проводится краткий анализ методов синтеза оптимальных систем по быстродействию, рассмотрены основные методы теории оптимального управления: принцип максимума (ПМ) Л.С. Понтрягина, динамического программирования и квадратичный метод. Эти методы приводят к сложным математическим процедурам.

Современная теория оптимального быстродействия получила свое развитие в методе варьирования свободных функционалов (МВСФ). Как и ПМ МВСФ позволяет синтезировать оптимальное по быстродействию управление для линейной системы. Важной характерной особенностью МВСФ является введенная новая вариация интегрального типа

$$\delta J = \sum_{k=1}^n \phi(k, U_M, U_m) \int_{t_n - t_k}^{t_n - t_{k-1}} x_{св}(t) dt - u_n \int_0^{\infty} x_{св}(t) dt - \sum_{i=0}^{n-1} a_i x_0^{(i)} \int_{t_n}^{\infty} x_{св}(t) dt = 0, \quad (6)$$

$$\phi(k, U_M, U_m) = \begin{cases} (-1)^k \cdot U_M, & \text{если } (-1)^k = -1 \\ (-1)^k \cdot U_m, & \text{если } (-1)^k = 1 \end{cases}$$

где n – порядок линейной системы; $i = \overline{1, n-1}$; u_n – заданное номинальное управление; U_M, U_m – максимально и минимально допустимое управление соответственно; $x_{св}(t)$ – свободная составляющая переходного процесса $x(t)$; $x_0^{(i)}$ – начальные значения управляемой переменной $x(t)$ и ее производных; a_i – коэффициенты зависящие от параметров объекта управления.

Из выражения (6) определяются моменты переключений управления $t_1, t_2, \dots, t_n$, которые являются искомыми параметрами оптимального синтеза, причем нахождение их не является сложной задачей. Выражение (6) состоит из трех функционалов, первый из которых является варьлируемым функцио-

налом свободной составляющей переходного процесса, и представляет собой закон управления

$$u(t) = \sum_{k=1}^n \phi(k, U_M, U_m) \int_{t_n - t_k}^{t_n - t_{k-1}} x_{ce}(t) dt, \quad (7)$$

тогда как закон управления в ПМ связан с проблемой нахождения вспомогательной функции.

Уравнения (6) и (7) являются основными математическими выражениями при проектировании системы управления по быстродействию.

При синтезе управления переводящего объект из нулевых начальных условий в конечное стационарное состояние, система (6) значительно упрощается для случая, когда все собственные значения линейного дифференциального уравнения не имеют мнимой части и различны, (6) записывается в виде

$$\begin{cases} \int_{t_n - t_1}^{t_n} (U_M \cdot e^{\alpha_1 t}) dt + \int_{t_n - t_2}^{t_n - t_1} (U_m \cdot e^{\alpha_1 t}) dt + \int_{t_n - t_3}^{t_n - t_2} (U_M \cdot e^{\alpha_1 t}) dt + \dots + \int_0^{t_n - t_{n-1}} (U_m \cdot e^{\alpha_1 t}) dt = \int_0^{\infty} (u_n \cdot e^{\alpha_1 t}) dt \\ \int_{t_n - t_1}^{t_n} (U_M \cdot e^{\alpha_2 t}) dt + \int_{t_n - t_2}^{t_n - t_1} (U_m \cdot e^{\alpha_2 t}) dt + \int_{t_n - t_3}^{t_n - t_2} (U_M \cdot e^{\alpha_2 t}) dt + \dots + \int_0^{t_n - t_{n-1}} (U_m \cdot e^{\alpha_2 t}) dt = \int_0^{\infty} (u_n \cdot e^{\alpha_2 t}) dt, (8) \\ \dots\dots\dots \\ \int_{t_n - t_1}^{t_n} (U_M \cdot e^{\alpha_n t}) dt + \int_{t_n - t_2}^{t_n - t_1} (U_m \cdot e^{\alpha_n t}) dt + \int_{t_n - t_3}^{t_n - t_2} (U_M \cdot e^{\alpha_n t}) dt + \dots + \int_0^{t_n - t_{n-1}} (U_m \cdot e^{\alpha_n t}) dt = \int_0^{\infty} (u_n \cdot e^{\alpha_n t}) dt \end{cases}$$

где $\alpha_i, i = 1, n$ – собственные значения матрицы линейной системы, представленной в форме Коши.

Для случая наличия комплексно сопряженных или повторяющихся собственных значений, система (8) имеет практически такой же вид. Определение моментов переключения с помощью системы (8) имеет значительно меньшие трудности по сравнению с классическими методами теории оптимального управления.

МВСФ используется в системе регулирования при синтезе управляющего воздействия, осуществляющей перевод динамической системы между стационарными состояниями. Причем для выбора структуры динамической модели в данной работе методы МГУА не используются. Методы МГУА являются эффективным средством моделирования сложных нелинейных объектов, а для получения линейных моделей существуют более простые методы, не требующие больших вычислительных мощностей.

В разделе исследования построения динамической модели объекта рассмотрены некоторые аспекты вопросов выбора времени дискретизации, порядка системы, структуры линейной модели.

В отличие от общего случая проблема выбора порядка модели для линейного объекта является достаточно исследованной, и порядок системы выбирается на основе ранга ковариационной матрицы. Для выбора структуры модели используется один из методов сравнения линейных регрессий, который, при использовании ортонормированного преобразования, позволяет оценить влияние последнего регрессора на значение квадратичного функционала.

Четвертая глава посвящена описанию практических исследований алгоритмов, описанных в предыдущих главах. Кратко описано технологическое оборудование, на котором проводились исследования, представлено описание практических работ, выполненных по модернизации технологического оборудования.

В начале главы кратко описана вакуумно-кинематическая схема «Balzers-350G» и даны основные ее характеристики.

Далее рассматривается вопрос построения САУ ТП ИПН на базе установки «Balzers-350G». Блок выбора оптимальных параметров предлагается осуществлять с помощью эксперта технолога, который на базе математической модели ТП выбирает необходимые параметры ТП, для обеспечения заданного качества. В экспериментальной установке «Balzers-350G» используются три системы регулирования, контролирующие вакуумную систему, напряжение разряда и температуру подложки.

Исследуется вопрос получения математической модели ТП на базе алгоритмов, представленных во второй главе. В качестве примера используются значения микротвердости композиций, состоящих из алюминиевой основы (сплав АКМ-6) и титанового покрытия. При исследовании вопроса построения математической модели микротвердости композиции выполняются следующие задачи: выделяются параметры, влияющие на качество конечной продукции, исследуются исходные базисные элементы, исследуются различные типы алгоритмов МГУА при построении математического описания ТП.

При описании ТП ИПН для экспериментальной установки «Balzers-350G» используются две математические модели:

- модель изменения толщины наносимой пленки в зависимости от значений входного потока, напряжения, длительности технологического процесса и температуры нагрева подложки;
- модель изменения величины микротвердости композиции в зависимости от значений толщины пленки и температуры нагрева подложки.

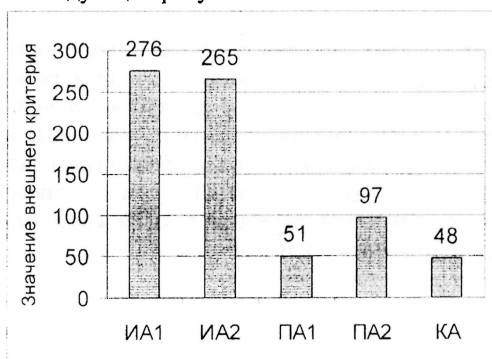
На основе априорной информации проводится выбор параметров, которые необходимо варьировать, и параметров которые необходимо стабилизировать на заданном уровне. Величины значения входного потока и напряжения разряда выбираются таким образом, чтобы давление в вакуумной камере находилось в допустимых пределах работы магнетрона, и скорость роста толщины пленки была максимальной. При этом на исследуемом диапазоне значений толщины (50–400 нм) скорость роста пленки является постоянной при заданной температуре нагрева подложки, поэтому исследование разработанного алгоритма описания ТП основывается на примере построения модели изменения величины микротвердости.

Из теоретических и практических исследований известно, что величина микротвердости резко возрастает при уменьшении толщины пленки, поэтому исходные элементы были расширены дополнительными функциями от толщины. Исследовались расширения с помощью полиномиальных, гиперболических и экспоненциальных функций.

Исследования вопроса получения модели проводятся на пяти алгоритмах МГУА: комбинаторном алгоритме (КА), итерационном алгоритме с функцией генерации новых структур $g(f_1, f_2; \vartheta) = \vartheta_0 + \vartheta_1 \cdot f_1 + \vartheta_2 \cdot f_2 + \vartheta_3 \cdot f_1 \cdot f_2$ (ИА1), итерационном алгоритме с использованием геделевской нумерацией с функцией генерации новых структур $g(\omega_1, \omega_2, \omega_3; \vartheta) = \vartheta_0 + \vartheta_1 \cdot \omega_1 + \vartheta_2 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3$ (ИА2), пороговом алгоритме МГУА К– сложности ($K=10^{10}$) с функцией генерации новых структур $g(f_1, f_2; \vartheta) = \vartheta_0 + \vartheta_1 \cdot f_1 + \vartheta_2 \cdot f_2 + \vartheta_3 \cdot f_1 \cdot f_2$ без использования нового вида порогового функционала (ПА2) и пороговом алгоритме МГУА К– сложности ($K=10^{10}$) с функцией генерации новых структур $g(f_1, f_2; \vartheta) = \vartheta_0 + \vartheta_1 \cdot f_1 + \vartheta_2 \cdot f_2 + \vartheta_3 \cdot f_1 \cdot f_2$ с использованием нового вида порогового функционала (4) (ПА1), причем в качестве критерия селекции использовался критерий точности (2).

Исследования показали, что использование гиперболических функций для расширения исходных параметров позволяет получать наиболее лучшие математические описания, и что пороговый алгоритм К–сложности с использованием нового вида порогового функционала (4) позволяет получать значительно лучшие результаты, по сравнению с исследованными итерационными алгоритмами, и ненамного худшими по сравнению с комбинаторным алгоритмом. Причем время, затрачиваемое на поиск модели с помощью порогового алгоритма К–сложности, сравнимо со временем работы исследованных итерационных алгоритмов и значительно меньше времени работы комбинаторного алгоритма.

Для исходных параметров, расширенных гиперболическими функциями, время, потраченное на поиск модели, составило 237, 253, 42, 128, 90762 с. для алгоритмов ПА1, ПА2, ИА1, ИА2, КА соответственно. Графическое сравнение качества моделей полученных с помощью исследуемых алгоритмов представлено на следующем рисунке:



В результате использования модели, полученной с использованием порогового алгоритма К-сложности, удалось увеличить показатели микротвердости алюминиевой основы на 95%. Итоговое значение микротвердости композиции составило 203 HV.

В четвертой главе также исследуется проблема улучшения динамических характеристик объекта. Эта задача рассматривается на примере разработки системы стабилизации внутри камерного давления.

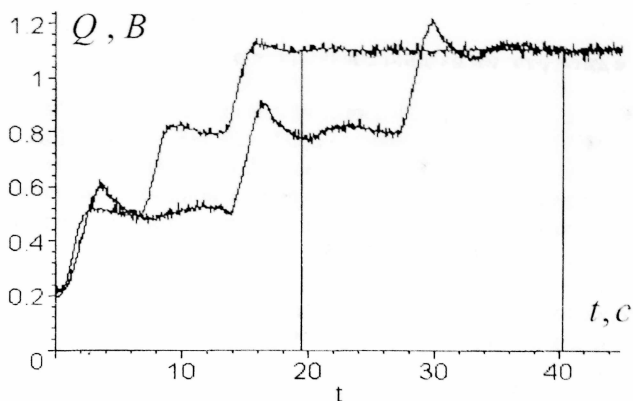
Для увеличения качества получаемых тонкопленочных покрытий для экспериментальной установки «Balzers-350G» было необходимо модифицировать ручное управление газовой системой. В четвертой главе рассматриваются различные методы стабилизации давления рабочего газа и варианты исполнения технологического оборудования. В качестве регулятора был выбран регулятор расхода газа РРГ9. Для управления РРГ9 были разработаны электрические схемы сопряжения позволяющие производить регулирование вакуумной системой в ручном и в автоматическом (с использованием ЭВМ) режиме. В материалах четвертой главы приводится функциональная вакуумная схема, расчеты схем сопряжения и электрические схемы.

В качестве способа стабилизации газовой системы выбирается метод стабилизации давления через поток. Диффузионный насос был выбран таким образом, что бы в требуемом диапазоне давлений он работал в линейном режиме. Поэтому зависимость давления от установившегося значения потока является практически линейной. И для стабилизации давления на нужном уровне необходимо определить соответствующее ему значение потока, а далее уже стабилизировать поток на заданном уровне.

При создании многослойных покрытий необходимо производить изменение значения давления. Резкое изменение давления может приводить к нежелательным последствиям вплоть до выхода вакуумной системы из строя. Данная сложность преодолевается за счет постепенного выхода на требуемый режим. Величина максимального изменения потока определяется из практических соображений и технических характеристик вакуумного насоса.

Практические исследования показали, что газовая система в динамическом режиме при изменении величины управляющего воздействия не больше 0,5 В., проявляет линейные свойства. Из практических соображений величина максимального изменения уровня входного воздействия была взята 0,3 В., что позволило рассматривать вакуумную систему как линейную.

В результате применения алгоритмов, описанных во второй главе, улучшены следующие показатели качества: время переходного процесса на 53%, величина перерегулирования на 70%. Ниже представлен графическое изображение ступенчатого перевода газовой системы с потока соответствующего 0.2 В до потока 1.1 В с использованием и без использования конечного временного регулятора.



Закключение

В результате проведенной научно-исследовательской работы получены следующие основные результаты:

1) Исследован ТП ИПН как объект управления, выделены основные факторы, влияющие на ТП ИПН.

2) Исследована задача совершенствования структуры САУ ТП ИПН и предложена методология построения САУ ТП ИПН.

3) Разработан комплексный формализованный подход к решению задачи построения математического описания ТП ИПН, основанный на применении методов МГУА.

4) Предложен пороговый алгоритм МГУА К-сложности построения математического описания ТП ИПН, использующий новый вид пороговых функционалов. Разработанный алгоритм апробирован на типовой экспериментальной установке «Balzers-350G».

5) Исследован вопрос повышения качества работы динамических объектов. Разработан алгоритм повышения динамических характеристик газовой системы, на базе МВСФ и реализован на типовой экспериментальной установке «Balzers-350G».

6) Усовершенствована система управления установки «Balzers-350G», за счет внедрения разработанного алгоритмического обеспечения для газовой системы.

В дальнейшем полученные научные результаты могут быть использованы для создания САУ ТП ИПН и для настройки параметров типового оборудования САУ ТП ИПН.

По теме диссертации изданы следующие работы:

1. Пупков К. А., Иванов Л. Л. Пороговый алгоритм МГУА К – сложности // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – № 583. – С. 127–135.
2. Пупков К. А. , Авдеев О. Н. , Иванов Л. Л. Рекуррентный алгоритм перебора моделей технологического процесса ионно-плазменного напыления // Интеллектуальные системы.: Труды пятого международного симпозиума. – М., 2002. – С. 352–354.
3. Пилишкин В.Н. Иванов Л.Л. Разработка алгоритмов управления в интеллектуальных системах // Информатика и системы управления в XXI веке: Сборник научных трудов студенческой научной конференции №1. – М., 2000. – С.7 – 11
4. Пилишкин В.Н., Иванов Л.Л. Управление движением многокомпонентных систем на основе интеллектуальных алгоритмов // Вторая научно тех. конференция, навигация и управление движущимися объектов : Сборник докладов – СПб., 2000. – С.131–138

Подписано к печати 15.12.03 г. объем 1 п.л. Тир. 100 Зак N164Т
Типография МГТУ им.Н.Э.Баумана