

На правах рукописи

Царегородцев Анатолий Валерьевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ
ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ
ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Специальность 05.13.01 - Управление в технических системах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1999

**Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления"
в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.**

**Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент
Пилипкин В.Н.**

**Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор
Шахтарин Б.И.

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Сергневский А.Н.**

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1565313

Царегородцев А.В. Разработ

техники им. С.А. Векшинского

марта 2000 года в 14³⁰ час.

**К 053.15.12 в Московском
им. Н.Э. Баумана по адресу:**

1565313

ся в библиотеке МГТУ

2000
1999 года.

Неусыпин К.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В электронной, радиотехнической и ряде смежных областей промышленности нашли широкое применение изделия, в которых основными функциональными элементами являются тонкие пленки материалов, требующие обработки по сложному профилю и рисунку поверхности. До настоящего времени доминирующее положение в производстве приборов функциональной электроники занимала эпитаксиально-планарная технология, которая уже не обладает требуемым разрешением. В последнее время для модификации поверхностных свойств твердых тел все более активно стали использоваться пучки заряженных частиц. Высокоинтенсивные пучки заряженных частиц, формируемые источником ионов и затем направляемые на объекты обработки, обладают значительно большей разрешающей способностью и энергией, что особенно важно при селективной нетермической обработке твердых тел, и, кроме того, поддаются управлению с помощью электрических и магнитных полей. Однако, несмотря на многочисленные достоинства электронно-ионных процессов, их ограниченное применение связано прежде всего с тем, что в существующем технологическом оборудовании системы управления процессами формирования пучков заряженных частиц либо вообще отсутствуют, что вызвано недостаточной разработкой вопросов создания математических моделей и отсутствием методов расчета и промышленного контроля технологических параметров, либо рассчитаны на работу по жестко установленной технологии, малейшее отклонение от которой приводит к значительному объему брака и, как следствие, к высокой себестоимости продукции. Поэтому проблемы разработки и создания систем управления процессами формирования пучков заряженных частиц, относятся к числу наиболее актуальных задач.

Целью работы является разработка структуры и алгоритмического обеспечения системы управления (СУ) процессом формирования пучков заряженных частиц (ФПЗЧ), предназначенной для оптимизации управляющих решений с целью повышения качества при выполнении задач ионно-плазменного напыления, особенно в присутствии возмущающих воздействий.

Среди задач, которые для этого нужно решить, следует выделить основные, а именно:

- провести анализ существующих моделей и методов управления потоками заряженных частиц применительно к задачам ионно-плазменного напыления;
- разработать математическую модель процесса ФПЗЧ, наиболее отвечающую физическим представлениям и пригодную для использования в

контура СУ;

- разработать быстродействующие вычислительные алгоритмы моделирования процесса ФПЗЧ;
- разработать алгоритмы управления процессом формирования пучков заряженных частиц, позволяющие решать характерные задачи ионно-плазменного напыления;
- разработать процедуры настройки модели для придания ей свойства адаптивности;
- провести экспериментальные исследования разработанного алгоритмического обеспечения СУ процессом ФПЗЧ с целью анализа работоспособности и оценки эффективности предложенных алгоритмов управления.

В работе используются следующие основные методы исследования. Построение математической модели объекта управления базируется на основных результатах теории физики плазмы и электронной оптики. Алгоритмы моделирования и управления основываются на численных методах решения дифференциальных уравнений, поисковой оптимизации и обобщении метода оптимального управления пучками траекторий. Процедуры настройки модели используют теорию нечетких множеств и технологию экспертных систем. Анализ работоспособности основных результатов работы проводится по результатам натурных испытаний и путем эксперимента на ЭВМ с использованием средств машинной графики.

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

- концепция построения алгоритмического обеспечения СУ процессом ФПЗЧ, как интегрированной системы, в которой процедуры оптимизации управления сочетаются с экспертными методами идентификации параметров управляемого процесса;
- методика синтеза оптимального управления процессом ФПЗЧ с использованием адаптивной модели;
- процедуры моделирования процесса ФПЗЧ, ориентированные на использование модели в контуре СУ;
- процедуры настройки модели управляемого процесса на основе экспертных методов обработки знаний;
- система управления процессом ФПЗЧ, построенная с использованием принципов и процедур, новизна которых оговорена выше.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем:

- 1) создано алгоритмическое обеспечение СУ процессом ФПЗЧ,

пригодность которого подтверждена результатами натурных испытаний;

2) разработан пакет прикладных программ управляющей ЭВМ, позволяющий автоматизировать процессы управления ионно-плазменным напылением.

Реализация результатов работы. Материалы диссертации были использованы в НПО «Композит», а также в научно-исследовательских работах кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана, проводимых в рамках программы «Интеллектуальные системы» и кафедры «Кибернетика» МГИЭМ (ТУ).

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на 1-ом и 2-ом международных симпозиумах «Интеллектуальные системы» (Махачкала, 1994 г., С-Петербург, 1996 г.); на международном научном конгрессе студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука - третье тысячелетие» (Москва, 1996 г.); на 4-ой, 5-ой и 6-ой международных студенческих школах-семинар «Новые информационные технологии» (Крым, Судак, 1996 г., 1997 г., 1998 г.); на XXXIII, XXXIV научно-технических конференциях РУДН «Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях» (Москва, 1997 г., 1998 г.); на 4-ой научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» (Крым, Гурзуф, 1997 г.); на 4-ой и 5-ой Всероссийских научно-технических конференциях «Состояние и проблемы технических измерений» (Москва, 1997 г., 1998 г.); на 5-ом международном совещании-семинар «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва, 1998 г.); on the 3-d scientific-technical conference «Process Control'98» (Czech Republic, Kouty nad Desnou, 1998), а также на научных семинарах МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Публикации. По основным положениям диссертации опубликовано 16 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 140 страницах машинописного текста, содержит 31 рисунок, включает 104 наименований отечественной и зарубежной литературы и два приложения, всего 159 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Определены цель и задачи исследования, дана структура диссертации и ее содержание по главам, приведены основные научные результаты, которые выносятся на защиту.

Первая глава диссертации посвящена обоснованию общей концепции автоматизации управления пучками заряженных частиц в задачах ионно-

плазменного напыления и анализу существующих СУ процессами ФПЗЧ.

Глава начинается с описания цели и условий функционирования системы ИПН, общий сценарий работы которой состоит в следующем. Мишень бомбардируется пучком ионов, обладающих определенной энергией. Ионы выпускаются в ее сторону источником ионов. При соударении с поверхностью мишени из нее выбиваются атомы, часть из которых оседает на подложке, образуя пленку. На рис. 1. представлена общая технологическая схема процесса ионно-плазменного напыления.

К характерным особенностям использования ионных пучков в задачах ионно-плазменного напыления следует отнести:

- отсутствие полной информации о состоянии системы, поскольку ее динамика зависит не только от совокупности параметров, регистрируемых во время процесса, но и от трудно контролируемых и неуправляемых параметров;
- воздействие на элементы системы неконтролируемых внешних возмущений;
- наличие большого количества возможных рабочих режимов ввиду многообразия процессов ионно-плазменного напыления (очистка поверхностей материалов, трехмерная микрообработка материалов, полировка оптических поверхностей, получение тонкопленочных покрытий и т.д.).

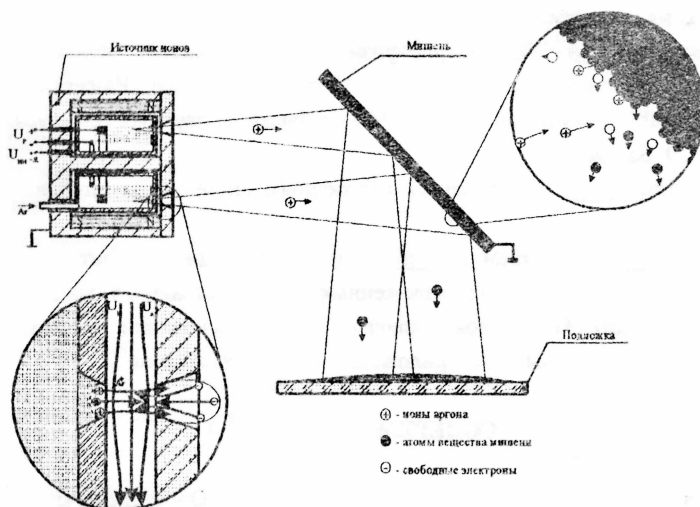


Рис. 1.

Использование модели процесса ФПЗЧ позволяет снизить неопределенность. Настройка же модели, как и синтез управления с ее помощью

требуют организации поисковых процедур. Однако из-за большой размерности пространства поиска и временных ограничений на выработку управляющих решений эти задачи могут оказаться нереализуемыми.

Для преодоления вышеперечисленных трудностей в диссертационной работе предложена концепция построения алгоритмического обеспечения СУ процессом ФПЗЧ, как интегрированной системы, сочетающей процедуры оптимизации управления на основе адаптивной модели с методами идентификации параметров управляемого процесса на основе экспертных процедур. Взаимодействие между компонентами интегрированной системы организуется таким образом, что обеспечивается решение задач накопления знаний по результатам имитационного моделирования и упорядочения альтернатив, генерируемых моделью с различными параметрами, по степени соответствия наблюдаемой динамики процесса.

В главе также приведен аналитический обзор работ, относящихся к рассматриваемой проблеме, на основании которого делается вывод о необходимости разработки математической модели процесса ФПЗЧ, пригодной для использования в контуре СУ. Кроме того, проведенный анализ показал практическое отсутствие алгоритмов управления пучками заряженных частиц, учитывающих реальное состояние процесса ионно-плазменного напыления.

Вторая глава работы посвящена разработке и исследованию модели процесса ФПЗЧ, уравнения динамики которого имеют вид:

1. Движение заряженных частиц с массой M и зарядом q определяется следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \ddot{r} &= -\frac{q}{M} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{q}{M} r \dot{\theta} H_z + r \dot{\theta}^2 + g(r, z) p_r + w_r^* \\ \ddot{z} &= -\frac{q}{M} \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{q}{M} r \dot{\theta} H_r + k(r, z) p_r + w_z^* \\ \ddot{\theta} &= \frac{1}{r} \left[\frac{q}{M} (-\dot{r} H_z + \dot{z} H_r) - 2 \dot{r} \dot{\theta} \right] + w_\theta^* \end{aligned} \right\} \quad (I)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} z(t_0) &= z_0, \quad r(t_0) = r_0, \quad \theta(t_0) = \theta_0, \\ \dot{z}(t_0) &= \dot{r}(t_0) = \dot{\theta}(t_0) = 0. \end{aligned}$$

где $r = (r, z, \theta)$ - вектор пространственных координат заряженных частиц пучка в цилиндрической системе координат, связанной с источником ионов; $w_* = (w_r^*, w_z^*, w_\theta^*)$ - вектор сил загрязняющих примесей; $H = (H_r, H_z, H_\theta)$ - вектор напряженности магнитного поля источника ионов; p_r - давление газа в АИИ «Луч».

2. Потенциал электрического поля φ , образованного системой электродов и объемным зарядом потока частиц с плотностью ρ , удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = -4\pi \rho \quad (2)$$

с граничными условиями: $\varphi(r, z) = 0$ при $(r, z) \in \Gamma_1$,

$$\varphi(r, z) = U_{\text{ув}} \text{ при } (r, z) \in \Gamma_2,$$

где $\Gamma_1 \cup \Gamma_2$ – граница области формирования пучков заряженных частиц; $U_{\text{ув}}$ – потенциал ускоряющего электрического поля.

3. На траекториях частиц пучка выполняется условие неразрывности токов

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \mathbf{v}, \quad \rho(\mathbf{x}, t_0) = \rho_0(\mathbf{x}), \quad t \geq t_0, \quad (3)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости заряженной частицы в цилиндрической системе координат, связанной с источником ионов.

Вводится вектор фазовых координат частиц пучка $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T$, описывающий состояние пучка заряженных частиц: $x_1 = r, x_2 = z, x_3 = \theta, x_4 = \dot{r}, x_5 = \dot{z}, x_6 = \dot{\theta}, x_7 = \rho$, а в качестве управляющих функций принимаются напряженности электрического поля $\partial\varphi/\partial r$ и $\partial\varphi/\partial z$, и давление газа p_Γ , т.е. $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T = [\partial\varphi/\partial r, \partial\varphi/\partial z, p_\Gamma]^T$.

Тогда динамический управляемый процесс ФПЗЧ в АИИ «Луч» записывается в переменных состояния следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) + \mathbf{W}_* = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{W}_* \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0, \quad t \geq t_0 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ k_1 x_1 x_6 + x_1 x_6^2 \\ k_2 x_1 x_6 \\ -(k_2 x_5 + k_1 x_4 + 2x_4 x_6)/x_1 \\ 2x_7 x_4 / x_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ k_3 & 0 & k_4(\mathbf{x}) \\ 0 & k_3 & k_5(\mathbf{x}) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_*^r \\ w_*^z \\ w_*^\theta \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{x} \in \Omega \subset R^n$ – вектор фазовых координат частиц пучка, Ω – открытое множество в R^n , $n = 7$, содержащее всевозможные траектории частиц пучка (4)

при произвольных начальных данных $x_0 \in Q_0$ и допустимых управлениях $u(x, t)$; $u = u(x_1, \dots, x_k, t)$ - вектор-функция времени и фазовых координат $x_1, \dots, x_k$, $k \leq n$ непрерывная по совокупности переменных $(x_1, \dots, x_k, t)$ на $\Omega_k \times T$ вместе с частными производными до второго порядка включительно почти при всех $t \in T = [t_0, t_K] \subset \mathbb{R}^1$ и принимающая значение в компактном множестве $U \subset \mathbb{R}^r$, $r = 3$.

При этом на управление $u = u(x, t)$ наложены условия реализуемости вида

$$|u| \leq u^*, \quad (5)$$

где u^* - вектор предельных значений напряженности электрического поля и давления газа в АИИ «Луч». И, кроме того, отдельные компоненты вектора управления подчиняются уравнению связи

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{u_1}{x_1} = k_6 x_1 \quad (6)$$

с граничными условиями: $u_1(x, t) = 0$ при $x \in G1$,
 $u_2(x, t) = 0$ при $x \in G2$.

Алгоритм моделирования процесса ФПЗЧ заключается в решении так называемой самосогласованной нелинейной задачи и состоит из следующих вычислительных этапов:

1 этап: определяется распределение потенциала в области ФПЗЧ на основе решения уравнения Пуассона (2) с соответствующими граничными условиями.

Расчет потенциала в области ФПЗЧ проводится разностными методами на прямоугольной сетке. Дифференциальной задаче (2) ставится в соответствие система алгебраических конечно-разностных уравнений

$$\frac{1}{h^2} \left(U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + \frac{2j+1}{2j} U_{i,j+1} + \frac{2j-1}{2j} U_{i,j-1} - 4U_{i,j} \right) = q_{i,j}, \quad (7)$$

с учетом конечно-разностных аппроксимаций граничных условий.

Для решения системы алгебраических разностных уравнений Пуассона (7) был выбран блочный метод верхней релаксации, поскольку он позволяет автоматически в процессе вычислений находить оптимальные значения итерационных параметров и не требует дополнительной машинной памяти. В покомпонентной записи метод имеет вид

$$\left. \begin{aligned} p_{1i} \hat{U}_{i-1,j}^{n+1} - p_0 \hat{U}_{i,j}^{n+1} + p_{3i} \hat{U}_{i+1,j}^{n+1} &= q_{i,j} - p_{2j} U_{i,j-1}^{n+1} - p_{4j} U_{i,j+1}^n = F_{i,j}^n \\ U_{i,j}^{n+1} &= w_i \hat{U}_{i,j}^{n+1} + (1-w_i) U_{i,j}^n, \quad i = \overline{1, L}, \quad j = \overline{1, M}, \quad t = 0, 1, \dots \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

Вычисление $U_{i,j}^{n+1}$ на каждой j -й строке проводится с помощью прогонки.

Для значительного ускорения расчетов был использован метод вспомогательных редких сеток, заключающийся в следующем. Сначала ищется разностное решение на более редкой сетке, например Ω_{2h} , затем решение U_{2h} интерполируется в узлы более крупной сетки Ω_h и, приняв полученные значения за начальное приближение $U_{(h)}^{(0)}$, определяется искомое решение $U_{(h)}$ с заданной точностью.

Как показали проведенные эксперименты, при решении краевой задачи (2) на сетке Ω_h блочным методом верхней релаксации с погрешностью $O(h^2)$ применение одной вспомогательной сетки Ω_{2h} дает уменьшение требуемого объема вычислений более чем в 16 раз.

2 этап: осуществляется интегрирование уравнений движения ионов (1) в области ФПЗЧ.

Поскольку приходится проследивать большое количество частиц, определение их траекторий занимает значительную долю машинного времени. В данной работе предлагается параллельный алгоритм численного интегрирования СОДУ, описывающей движение ионов в области ФПЗЧ, основанный на идее экстраполяции Ричардсона, позволяющий широкое распараллеливание вычислений. Основная идея экстраполяции Ричардсона состоит в использовании приближенных решений СОДУ, полученных по одной и той же вычислительной схеме на последовательности сеток с различным шагом.

Пусть выбранный метод интегрирования на сетке с шагом $h=1/M$ дает приближенное решение

$$\begin{cases} y_{n+1}^h = y_n^h + hf(t_n, y_n^h) \\ y_0^h = X_0, \quad n = 0, \overline{M-1}, \end{cases} \quad (9)$$

которое аппроксимирует точное решение с первым порядком точности.

Построим на отрезке $[t_0, t_K]$ r сеток с шагами: $h_k = \frac{1}{MN_k}$, $k = \overline{1, r}$, $0 < N_1 < \dots < N_r$. На каждой сетке решим разностную задачу (9). Продолжим разностные функции $y^{h_k}(t)$ с сетки $\{t = nh_k, n = \overline{0, M_k}\}$ на весь отрезок $[t_0, t_K]$ следующим образом. Возьмем произвольный элементарный отрезок $[t_j, t_{j+1}]$ сетки. Выберем еще $r-2$ ближайших узлов сетки $\{t = nh_k, n = \overline{0, M_k}\}$ и на $[t_j, t_{j+1}]$ определим интерполяционный многочлен Лагранжа $\tilde{y}^{h_k}(t) = \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_i(t) y^{h_k}(t_{i+1})$.

В итоге получим решение r -го порядка точности

$$\tilde{Y}(t) = \sum_{k=1}^r \gamma_k \tilde{y}^{h_k}(t), \quad (10)$$

где γ_k - решение системы $\sum_{k=1}^r \gamma_k = 1$; $\sum_{k=1}^r \gamma_k h_k^j = 0$; $j = \overline{1, r-1}$.

Каждой сетке выделяется процессор для решения разностной задачи (9) со своим шагом h . Поскольку решение на каждой сетке информационно независимо от других, решение на всех сетках проводится параллельно.

3 этап: рассчитываются токи и обусловленный ими объемный заряд пучка.

Для расчета объемных зарядов и плотности тока использовалась модель "трубок тока", основное преимущество которой заключается в объеме необходимой для запоминания информации.

Все частицы, входящие в расчетную область через площадку ΔS , образуют элементарную токовую трубку с переносимым ею током I_i . Распределение объемного заряда находится с использованием условия неразрывности для отдельных трубок тока. Т.е. если траектория, которой ставится в соответствие токовая трубка I_i , пересекает некоторый объем ΔV за время Δt_{ik} , то заряд i -й трубки тока, находящийся в этом объеме, определяется как $I_i \Delta t_{ik}$. И общее количество заряда в объеме ΔV определяется с помощью суммирования по всем проходящим через него траекториям

$$Q(\Delta V) = \sum_i I_i \Delta t_{ik}. \quad (11)$$

Расчет полного заряда в ячейках сетки Ω^s , представляющей собой часть разностной сетки Ω для расчета потенциала, охватывающей только область прохождения пучка, осуществляется следующим образом.

Пусть $\bar{r}_n, \bar{r}_{n+1}$ - две точки траектории, полученные в результате численного интегрирования уравнения движения с временным шагом Δt_n . Если в соответствующей элементарной трубке ток равен I_v , то на участке токовой трубки между этими точками находится заряд $q_m = I_v \Delta t_n$, что следует из уравнения неразрывности потока. Далее, отрезок $[\bar{r}_n, \bar{r}_{n+1}]$ разбивается на N_p интервалов (принималось $N_p = 2 + 3$) таких, что в предположении прямолинейного движения между расчетными точками траектории частица проходит каждый отрезок за одинаковое время $\Delta t_n / N_p$. Тогда на одном отрезке находится заряд $q_{mp} = I_v \Delta t_n / N_p$, относящийся к ячейке, центральный узел которой является ближайшим к серединной точке отрезка.

Таким образом, при расчете траекторий одновременно вычисляются пространственные заряды в ячейках разностной сетки

$$q_{i,j} = \sum_{mp} \frac{I_v \Delta t_n}{N_p}. \quad (12)$$

4 этап: уточняется конфигурация плазменной границы. Для этого определяются

$$\varepsilon_i^n = \left| \frac{U_d^n - U_i^n(d)_i}{U_d^n} \right|, \quad \delta_i^n = U_d^n - U_i^n(d)_i, \quad (13)$$

где $i = \overline{1, N_T}$, n - номер итерации по определению формы плазменной границы.

Если выполняется условие

$$\max_i \varepsilon_i^n \leq \varepsilon = 10^{-3}, \quad (14)$$

то положение плазменной границы найдено и расчет заканчивается, иначе проводится сдвиг точек плазменной границы на величину

$$(\Delta d)_i^n = \eta \cdot \left[\left(\frac{U_{di}^n}{U_i^n(d)_i} \right)^{\frac{3}{4}} - 1 \right] \cdot d.$$

Направление сдвига определяется величиной и знаком δ_i^n :

- если $\text{sign}(\delta_i^n) = \text{sign}(\delta_i^{n-1})$ и $|\delta_i^n| \leq |\delta_i^{n-1}|$, то сдвиг i -й точки осуществляется в том же направлении, что и на $(n-1)$ -й итерации, иначе, если $|\delta_i^n| > |\delta_i^{n-1}|$, то направление изменяется на противоположное;

- иначе направление сдвига изменяется на противоположное и $(d)_i^n = \frac{1}{2} (\Delta d)_i^n$, тем самым уменьшаются колебания вблизи решения.

Далее определяются длины отрезков плазменного эмиттера и его общая длина L . Эмиттер разбивается на N_T трубок тока, имеющих одинаковые поперечные сечения $\Delta L = L / N_T$. Новые координаты центров трубок тока определяются по формулам обратной линейной интерполяции. Из нового положения плазменной границы запускается пучок ионов и вычислительный процесс повторяется, начиная с этапа 1. Вычисления заканчиваются, когда выполняется условие (14).

Результаты численных экспериментов показали адекватность предлагаемой динамической модели объекту управления, а также возможность использования разработанной модели за счет ее высокого быстродействия в контуре СУ.

Третья глава диссертации посвящена автоматизации управления пучками заряженных частиц в процессе ионно-плазменного напыления. При этом выделяются две основные задачи: синтез оптимального управления процессом ФПЗЧ и настройка параметров адаптивной модели.

Для системы (4) используется концепция функционально-множественной принадлежности, согласно которой:

- если динамическая система может быть представлена посредством своей модели в пространстве состояний, то произвольную поставленную перед ней цель можно свести к тем или иным ограничениям на вектор состояния, определяющими характер принадлежности последнего некоторым множествам в каждый текущий момент времени t .

В данной постановке в соответствии с целью управления процессом ФПЗЧ (получение пучков заряженных частиц, обладающих заданными характеристиками по радиусу, расходимости, плотности распределения частиц и т.д.) на фазовые координаты объекта управления накладываются следующие ограничения:

$$|x - x^*| \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где $\varepsilon - [7 \times 1]$ вектор допустимых ошибок решения задачи управления.

Тогда задача управления формулируется в следующем виде: требуется определить такой закон управления $u = u(x, t)$, который бы обеспечивал требуемые фазовые ограничения (15) для системы (4), подверженной действию возмущающих воздействий W_* .

В соответствии с целью управления процессом ФПЗЧ в АИИ «Луч», вводится заданный на сечениях пучка траекторий заряженных частиц функционал

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_K} \int_{Q_{u,t}} \varphi(x, t) dx dt = \int_{t_0}^{t_K} \int_{Q_{u,t}} (x - x^*)^T C (x - x^*) dx dt, \quad (16)$$

характеризующий качество управляемого процесса (динамику частиц), где $\varphi(x, t) \in C^1(\Omega \times T)$ - функция, определенная и непрерывная по совокупности переменных (x, t) на $\Omega \times T$ вместе с частными производными по всем своим аргументам, $\varphi(x, t) = \sum_{i=1}^7 c_i (x_i - x_i^*)^2$, $c_i, i = \overline{1, 7}$ - весовые коэффициенты,

$\sum_{i=1}^7 c_i = 1$, которые выбираются, исходя из требуемого режима формирования ионных пучков (например, для режима ионно-плазменного напыления тонкопленочных покрытий: $c_4 = 0.5$, $c_7 = 0.5$, $c_{i, i \neq 4, 7} = 0$; для трехмерной микрообработки поверхностных слоев материалов: $c_4 = 1$, $c_{i, i \neq 4} = 0$; для режима полировки оптических поверхностей: $c_7 = 1$, $c_{i, i \neq 7} = 0$ и т.д.); $(t_K - t_0)$ - заданная длительность интервала времени, для которого осуществляется оптимизация управляемого процесса.

Ставится задача минимизации функционала $J(x, u)$ по допустимым управлениям $u(\hat{x}, t) \in K$

$$J(x, u) = \int_{t_0}^{t_K} \int_{Q_{u,t}} (x - x^*)^T C (x - x^*) dx dt \xrightarrow{u(\hat{x}, t) \in K} \inf.$$

Решение задачи управления пучком заряженных частиц и получение условий оптимальности в задаче минимизации функционала (16) по допустимым управлениям $u(\hat{x}, t) \in K$ находится, основываясь на распространении метода

В.И. Зубова и Д.А. Овсянникова на решение задач оптимального управления пучками траекторий. Для этого строится линейное уравнение с частными производными, имеющее вид уравнения Ляпунова, через решение $V(x, t)$ которого представляется рассматриваемый функционал (16). Показывается, что для рассматриваемого класса систем функция плотности распределения частиц ρ является ядром интегрального инварианта системы (4) $V(x, t)$.

На основе полученного представления для приращения минимизируемого функционала (16) формулируются необходимые условия оптимальности. При этом используется выражение для якобиана преобразования по сечениям пучков траекторий, соответствующих различным управлениям $u(\bar{x}, t) \in K$.

Теорема. Необходимые условия оптимальности.

Пусть $u^0 = u^0(\bar{x}, t)$ - оптимальное управление для системы (4) и существует непрерывно дифференцируемая функция $V^0(x, t)$, удовлетворяющая при $u^0 = u^0(\bar{x}, t)$ уравнению

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x, u(\bar{x}, t), t) + V \operatorname{div} f(x, u(\bar{x}, t), t) + \varphi(x, u, t) = 0$$

с конечным условием $V(x, t_K) = V_K$,

тогда выполняется следующее условие минимума

$$\begin{aligned} \min \int_{t_0}^{t_K} \int_{Q_{u^0, t}} & \left\{ \frac{\partial P^0(x, u^0(\bar{x}, t), t)}{\partial u} [u(\bar{x}, t) - u^0(\bar{x}, t)] + \right. \\ & \left. + V^0(x, t) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_j(x, u^0(\bar{x}, t), t)}{\partial u} \left(\frac{\partial u(\bar{x}, t)}{\partial x_j} - \frac{\partial u^0(\bar{x}, t)}{\partial x_j} \right) \right\} dx dt = 0, \end{aligned} \quad (17)$$

где $P(x, u, t) = \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} f(x, u, t) + V(x, t) \operatorname{div} f(x, u, t) + \varphi(x, u, t)$.

Выражение для приращения функционала (17) позволяет определить функционал $G(u)$, являющийся производной Гато функционала (17), следующим соотношением

$$\begin{aligned} \langle G(u), \bar{u} - u \rangle &= \int_{t_0}^{t_K} \int_{Q_{u, t}} \left\{ \frac{\partial P(x, u(\bar{x}, t), t)}{\partial u} [\bar{u}(\bar{x}, t) - u(\bar{x}, t)] + \right. \\ & \left. + V(x, t) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_j(x, u(\bar{x}, t), t)}{\partial u} \left(\frac{\partial \bar{u}(\bar{x}, t)}{\partial x_j} - \frac{\partial u(\bar{x}, t)}{\partial x_j} \right) \right\} dx dt, \end{aligned}$$

где $\langle G(u), \bar{u} - u \rangle$ - значение линейного функционала $G(u)$ на функции $\bar{u} - u$.

Тогда, для того чтобы $u^0 = u^0(\bar{x}, t)$ было оптимальным управлением, необходимо выполнение следующего равенства

$$\min_{u \in K} \langle G(u^0), u - u^0 \rangle = 0. \quad (18)$$

Таким образом, при $\forall u \in K$ и произвольной допустимой вариации Δu имеет место представление

$$J(u + \sigma \Delta u) - J(u) = \sigma \langle G(u), \Delta u \rangle + o(\sigma). \quad (19)$$

Такое представление приращения функционала использовалось при построении численного метода направленной оптимизации в задаче оптимального управления пучками заряженных частиц.

Полное решение задач управления должно сочетаться со способностью адаптироваться к изменению условий функционирования. Для моделей, существующих в алгоритмическом виде, процесс идентификации связан с минимизацией целевой функции - невязки выходов объекта и модели. Как показали проведенные исследования, функция невязки оказалась мультимодальной в силу нелинейной зависимости от параметров модели потоков загрязняющих примесей. На основании чего был сделан вывод, что методы поисковой оптимизации могут применяться лишь на завершающем этапе, а предшествовать им должны процедуры оценки альтернатив, генерируемых моделью, с целью поиска окрестности глобального минимума.

Поэтому был предложен подход, заключающийся в идентификации входной ситуации путем сопоставления ее с эталонными ситуациями, составляющими базу знаний экспертной системы.

Вводятся лингвистические переменные (ЛП), характеризующие состояние ионного пучка и определяемые кортежем $\langle b_m, T_m, X_m \rangle$, где b_m - наименование m -й ЛП: b_1 - "ток ионного пучка", b_2 - "расходимость пучка", b_3 - "энергия пучка ионов"; T_m - ее терм-множество; X_m - универсальное множество.

Количество термов каждой ЛП соответствует скорости изменения соответствующей выходной координаты. Границы универсального множества X задаются наибольшим и наименьшим значениями выходной координаты Y_m на интервале моделирования

$$\begin{aligned} T_m &= \sum_{j=1}^k (\mu_{T_m^j}(x)/x), \quad k = \text{card}(T_m), \\ x &\in [X_{\min}, X_{\max}], \\ X_{\max} &= \max(Y_m(t_j)), \quad j = \overline{1, k}, \\ X_{\min} &= \min(Y_m(t_j)), \quad m = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (20)$$

Здесь m - номер ЛП; k - количество термов ЛП (как показали проведенные эксперименты целесообразно выбирать $k = 10$).

В итоге каждая l -я модельная реализация характеризуется лингвистическими переменными, совокупность которых, вместе с их термножествами, образует "нечеткую траекторию" модели.

На следующем этапе строятся нечеткие отношения на множестве термов каждой m -й ЛП

$$R_m^l = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \left(\mu_m^l(T_m^i, T_m^j) / (T_m^i, T_m^j) \right), \quad (21)$$

$$\mu_m^l(T_m^i, T_m^j) = \mu_{T_m^i}^l(Y_m(t_j)).$$

Совокупность нечетких отношений характеризует структуру нечеткой траектории, полученной при l -м модельном эксперименте

$$s_l = \sum_{m=1}^3 R_m^l. \quad (22)$$

Аналогично на основании информации от датчиков определяется структура нечеткой траектории объекта s_0 . Для принятия решения о сходстве и различии структур нечетких траекторий использовалась нечеткая логика с ограниченными операциями

$$\theta(s_l, s_0) = \bigwedge_{(R_m \in s_l, T_j) \in T_m^2} \& \left(1 - \left| \mu_m^l(T_m^i, T_m^j) - \mu_m^0(T_m^i, T_m^j) \right| \right). \quad (23)$$

Принятие решений с помощью этого критерия осуществляется путем непосредственного сравнения с пороговым значением, на основании чего делается вывод о хорошем или плохом соответствии модели объекту.

Четвертая глава работы посвящена анализу работоспособности разработанного алгоритмического обеспечения СУ процессом ФПЗЧ по результатам модельных и натуральных экспериментов.

Сравнение результатов натуральных испытаний и имитационного моделирования показало адекватность предлагаемой динамической модели объекту управления. Незначительные отклонения результатов модельных и натуральных экспериментов объясняются наличием переменной составляющей $\sim 6\%$ в напряжении высоковольтного выпрямителя, питающего источник ионов.

В главе также дается оценка эффективности предложенных алгоритмов управления. Как показали проведенные исследования, данная методика позволяет эффективно проводить оптимизацию динамики пучков заряженных частиц для решения характерных задач ионно-плазменного напыления в широком диапазоне ускоряющих напряжений и давлений газа при различных ограничениях на управляющие функции. При этом анализ результатов моделирования и натуральных испытаний показал неэффективность назначения достаточно больших длительностей интервала оптимизации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В диссертационной работе разработана структура и алгоритмическое обеспечение СУ процессом ФПЗЧ, предназначенной для повышения качества при выполнении задач ионно-плазменного напыления, особенно в присутствии возмущающих воздействий.

2. В соответствии с задачами, возникающими в процессе ионно-плазменного напыления, предложена концепция построения алгоритмического обеспечения СУ процессом ФПЗЧ, как интегрированной системы, сочетающей процедуры оптимизации управления на основе адаптивной модели с методами идентификации параметров управляемого процесса на основе экспертных процедур.

3. Разработаны процедуры моделирования процесса ФПЗЧ на основе численного решения нелинейной самосогласованной задачи.

4. Предложены процедуры оптимального управления процессом ФПЗЧ для решения характерных задач ионно-плазменного напыления.

5. Разработаны процедуры настройки модели по апостериорной информации от объекта, использующие логико-лингвистическое описание выходов объекта и модели и позволяющие упорядочивать реализации, генерируемые моделью, по степени их соответствия наблюдаемому выходу объекта.

6. По результатам натурных испытаний показана адекватность предлагаемой динамической модели объекту управления, а также возможность использования разработанной модели за счет ее высокого быстродействия в контуре СУ.

7. Проведенные исследования показали, что данная методика позволяет эффективно проводить оптимизацию динамики пучков заряженных частиц для решения характерных задач ионно-плазменного напыления в широком диапазоне изменения управляющих воздействий при различных ограничениях на управление.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Царегородцев А.В., Пилишкин В.Н. Построение оптимальной мультитранспьютерной сети при ограничении на время вычислительного процесса // Интеллектуальные системы: Труды первого международного симпозиума. - М., 1994. - С. 161-167.

2. Царегородцев А.В., Пупков К.А., Пилишкин В.Н. Формирование модели ИС в задачах управления сложными динамическими объектами // Интеллектуальные системы: Труды второго международного симпозиума.

- М., 1996. - Т.2. - С. 196-201.

3. Математическая модель технологического процесса ионно-плазменного напыления: Научно-технический отчет по теме «Интеллектуальные системы» / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Руководитель темы К.А. Пупков. Исполнитель Царегородцев А.В. ГРН№01.970003063, Инв.№02.970002081. - М., 1996. - С.137-153.

4. Царегородцев А.В. Эффективное управление сложными промышленными объектами на основе прогрессивных технологий // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Труды 33 науч. конф. РУДН. - М., 1997. - С. 235-236.

5. Царегородцев А.В., Пилишкин В.Н. Управление технологическим процессом вакуумного ионно-плазменного напыления на основе имитационного моделирования и экспертных процедур // Вакуумная наука и техника: Тез. докл. IV науч.-технич. конф. - М., 1997. - С. 36-37.

6. Царегородцев А.В. Синтез оптимального управления технологическим процессом ионно-плазменного напыления // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: Труды 34 науч. конф. РУДН. - М., 1998. - С. 269-270.

7. Царегородцев А.В. Концепция построения аппаратно-программного комплекса сбора и обработки информации о параметрах процесса ионно-лучевого напыления // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. IV Всерос. науч.-технич. конф. - М., 1998. - С. 158-159.

8. Царегородцев А.В. Разработка комплексных методов организации измерений и контроля в управляемом процессе ионно-лучевого напыления // Состояние и проблемы технических измерений: Тез. докл. IV Всерос. науч.-технич. конф. - М., 1997. - С. 250-251.

9. Царегородцев А.В., Пупков К.А., Пилишкин В.Н. Интеллектуализация управления технологическим процессом ионно-плазменного напыления // Вестник РУДН. - Сер. Кибернетика. - 1998. - №1. - С. 34-43.

10. Tsaregorodtsev A.V., Pupkov K.A., Pilishkin V.N. Adaptive optimal control system of technological process of ion-beam etching // Process control'98: Proceedings of the 3-d scientific-technical conference. - Kouty nad Desnou, Czech Republic. - 1998. - V.1. - P. 345-349.

Всего на материалам диссертационной работы опубликовано 16 печатных работ.