

УДК 007.52+681.52

АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОБОТИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЮ И СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

О. З. ХАСАНОВ¹, З. М. ХАСАНОВ²

¹legnix@mail.ru, ²zimfirm@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 30.11.2020

Аннотация. Рассмотрены особенности синтеза робастно-адаптивных многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) нелинейными динамическими объектами в роботизированном технологическом комплексе (РТК) ионно-плазменного нанесения износостойчивых покрытий. Представлена и проанализирована модель управления взаимосвязанными динамическими объектами РТК с эталонной моделью и сигнальной адаптацией. Процессы синтеза реализуются на сочетании процедур оптимального оценивания (идентификации) параметров динамических объектов и состояния всех управляемых процессов с процедурами робастно-адаптивного управления взаимосвязанными динамическими объектами с использованием прогнозирующих и эталонных моделей.

Ключевые слова: робастно-адаптивные МСАУ; эталонная модель с сигнальной адаптацией; векторно-матричные дифференциальные уравнения; роботизированный технологический комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной России необходимо создание роботизированных технологических комплексов (РТК) с большим числом степеней свободы и облегченной конструкцией (минимальное использование дорогостоящего металла), обладающих, с точки зрения пользователя, возможностями интеграции в современные системы автоматизированного проектирования, моделирования и подготовки производства (САД/САМ/САЕ). Кроме того, роботизированный технологический комплекс должен обладать достаточной универсальностью, облегчающей его использование в случае частых изменений технологического цикла. Современное состояние в области проектирования систем управления сложными вза-

имосвязанными приводами роботизированного технологического комплекса ионно-плазменного нанесения износостойчивых покрытий характеризуется интеграцией многосвязных систем автоматического управления в РТК с целью обеспечения максимальной эффективности каждой системы управления.

Основное условие эффективного автоматического управления нелинейными динамическими объектами в роботизированном технологическом комплексе для ионно-плазменного нанесения износостойчивых покрытий – это адаптивная идентификация действующих на него факторов, необходимых и достаточных для того, чтобы робастно-адаптивная многосвязная система автоматического управления выполняла свою

задачу с учетом всех происходящих в реальной действительности изменений без снижения технологических показателей продукции. Наиболее характерной тенденцией развития сложных электродуговых плазмотронов в направлении форсирования всех параметров и повышения экономичности процесса нагрева инертных газов является интенсификация принудительного взаимодействия потока газа с электрической дугой. От способа организации и интенсивности взаимодействия потока газов с дуговым разрядом зависят такие важные в практическом отношении процессы, как объемное джоулево тепловыделение, энергообмен между дугой и потоком, т.е. собственно нагрев газа, тепловые потери во внешнюю систему охлаждения, пространственная стабилизация и устойчивость всего электродугового разряда.

Важной особенностью аэродинамического воздействия на электродуговой разряд является возможность регулирования мощности разряда в плазмотроне и энтальпии потока охлаждающих инертных газов при изменении напряженности электрического поля в плазмотроне и при робастно-адаптивных алгоритмах управления током в цепи плазмотрона. Это открывает перспективу снижения эрозии электродов и создания новых плазмотронов с большим ресурсом работы. Во всех современных плазмотронах электродуговой разряд зажигается между катодом и анодом, представляющим собой коаксиальный медный охлаждаемый электрод с вращением пятна привязки дуги магнитным полем соленоида. Запуск плазмотрона производит регулируемая высокочастотная вспомогательная дуга, зажигаемая между катодом и фланцем с последующим выдуванием дуги на основной анод. То есть требуется высокочастотный источник электропитания для плазмотрона с широким пределом регулирования тока дуги под нагрузкой, поскольку запуск осуществляется при малых удельных расходах охлаждающих и плазмообразующих газов и достаточно низком напряжении и токе разряда [1].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ И СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

Комплексная автоматизация роботизированного технологического комплекса плазменного нанесения покрытий, разработка высокочастотных преобразователей частоты с плазмотроном и интеллектуальными алгоритмами управления поставили перед разработчиками новых систем автоматического управления активной и реактивной мощностью в цепи плазмотрона ряд новых вопросов анализа и синтеза, например, вопросы обеспечения устойчивости работы высокочастотного плазмотрона в широком диапазоне изменений как амплитуды, так и частоты полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ). Основные электромагнитные возмущения, ухудшающие качество работы ППЧ – это возмущения параметров (технологические и эксплуатационные разбросы) и внешние механические возмущения. Последние имеют характер вибрации и ударов, а также упругих колебаний, вызываемых ускорением на режимах разгона и торможения электроприводов РТК. При этом элементы ППЧ совместно с плазмотроном должны рассматриваться как элементы новых разработанных робастно-адаптивных МСАУ динамическими объектами в РТК для ионно-плазменного нанесения износостойчивых покрытий.

Анализ динамических характеристик ППЧ с различными активно-реактивными нагрузками в роботизированном технологическом комплексе плазменного нанесения покрытий можно проводить различными методами [2]. Метод логарифмических частотных характеристик трудоемок и требует значительных графических построений. Наиболее универсальным и простым является метод корневого годографа, разработанный и получивший дальнейшее развитие в [3]. Однако вопросы устойчивости ППЧ вместе с высокочастотным плазмотроном в роботизированном технологическом комплексе плазменного нанесения покрытий исследованы недостаточно полно.

Задача робастно-адаптивного управления динамическими объектами роботизированного технологического комплекса плазменного нанесения покрытий требует задания математической модели объекта управления [4], цели управления и класса допустимых стратегий управления. Ее решение состоит в выделении из класса допустимых стратегий только той, что обеспечивает выполнение цели управления. Когда подобной стратегии не существует, то поставленная задача неразрешима. Выделение стратегии осуществляется в виде процедуры синтеза обратной связи, и основное внимание уделяется конструктивности процедуры синтеза взаимосвязанных подсистем робастно-адаптивных МСАУ роботизированного технологического комплекса плазменного нанесения покрытий.

При синтезе подсистем робастно-адаптивных МСАУ взаимосвязанными объектами РТК выделяют основной контур и контуры самонастройки. Объект управления ППЧ с плазмотроном описывается нелинейными уравнениями. Синтез основных контуров робастно-адаптивных МСАУ проводится на основе линеаризованных уравнений. Учет нелинейных характеристик проводится на втором этапе синтеза подсистем МСАУ с целью уточнения и корректировки структуры и параметров МСАУ.

Главнейшей задачей синтеза основных контуров робастно-адаптивных МСАУ является нахождение таких корректирующих устройств, перестройкой параметров которых должны добиться совпадения операторов адаптивных МСАУ и их эталонных моделей. При этом целесообразно иметь однозначное соответствие между параметрами взаимосвязанных объектов с параметрами корректирующих устройств. Синтез робастно-адаптивных МСАУ включает в себя, собственно, взаимосвязанные объекты управления ППЧ с плазмотроном, датчики, исполнительные механизмы и корректирующие подсистемы с перестраиваемыми передаточными функциями. При этом надо определять закон (алгоритмы) перестройки этих коэффициентов из условия, чтобы робастно-адаптивные МСАУ описывались уравнениями с постоянными коэффициен-

тами (уравнениями стационарной модели). Далее решается задача парирования переменных коэффициентов во всех динамических объектах управления ППЧ с плазмотроном.

Для сложных робастно-адаптивных МСАУ динамическими объектами ППЧ с плазмотроном в роботизированном технологическом комплексе плазменного нанесения покрытий характерно насыщение как по входу, так и по выходу. Крайне важно учитывать это на этапе синтеза робастно-адаптивных алгоритмов автоматического управления. При проведении компьютерного моделирования, разработчик практически неограничен в уровне подаваемого управляющего сигнала на систему управления, но на практике все технические приложения имеют пределы, обусловленные возможностями сложных робастно-адаптивных МСАУ. Пренебрежение насыщением по входу может привести к снижению качества переходных процессов, к увеличению перерегулирования выходных сигналов, появлению автоколебаний с потерей устойчивости. Поэтому на этапе синтеза робастно-адаптивных МСАУ необходимо учитывать помимо нелинейности модели в целом, еще и нелинейность входного сигнала, например, типа «насыщение».

Для практической реализации в структурах регуляторов робастно-адаптивных МСАУ необходимо предусмотреть плавные в широких пределах регулировки глубин линейной адаптивной обратной связи, позволяющие экспериментально (непосредственно на ППЧ с плазмотроном) настроить технологические параметры. Причем преобразование сетевого напряжения в высокочастотное целесообразно выполнять без предварительного выпрямления, используя для подобных целей инверторы на ключах переменного тока. То есть все большее применение получают ППЧ с промежуточным повышением частоты [5, 6]. Один из таких способов заключается в том, что с помощью высокочастотных предварительных полупроводниковых преобразователей частоты формируются однополярные ступенчатые кривые напряжения, приближающиеся по форме к однополярной синусу-

соидальной кривой с периодом, равным половине периода изменения выходного напряжения инвертора. Далее с помощью мостовых инверторов однополярные ступенчатые кривые напряжения преобразуются в двухполярные напряжения инвертора. Например, ППЧ, разработанный в Уфимском государственном авиационном техническом университете, имеет в своем составе шесть мощных однотипных одноктактных преобразователей с прямым включением всех силовых модулей, работающих на общий высокочастотный LC сглаживающий фильтр. Схема управления обеспечивает широтно-импульсное управление транзисторами VT1... VT6 этих модулей на частоте до 25 кГц. Сами модули включаются между собой параллельно по входу и последовательно по выходу, при этом длительность работы каждого из силовых модулей ППЧ на интервале полупериода выходного напряжения инвертора одна и та же, и составляет 6,25 мс. На интервале каждого полупериода выходного напряжения мостового инвертора ступенчатая функция напряжения на входе инвертора формируется за счет того, что выходное напряжение каждого следующего модуля сдвинуто по фазе относительно предыдущего на 0,625 мс. ППЧ представляет собой сложное нелинейное дискретное устройство. Несущая частота ППЧ составляет 20...40 кГц. При таком высоком уровне несущей частоты для построения математических моделей ППЧ используется метод выделения полезных сигналов с усреднением мгновенных значений переменных в пределах периода несущей частоты.

Рассмотрим вопросы проектирования робастно-адаптивных МСАУ с так называемыми сигнальными алгоритмами настройки параметров объекта «ППЧ + плазмотрон» [7, 8], в которых эффект адаптации настройки параметров ППЧ осуществляется введением на вход объекта или его наблюдателя (настраиваемой модели) дополнительных сигналов управления [9].

Цель исследования – разработка прямого метода синтеза (без решения задачи идентификации) робастно-адаптивных МСАУ с сигнальными алгоритмами настройки па-

раметров «ППЧ + плазмотрон», адаптация осуществляется введением на вход много-связных объектов и их наблюдателей дополнительных сигналов для управления.

Пусть нелинейный и нестационарный n -мерный вектор состояния динамических объектов управления «ППЧ + плазмотрон» $dx_i/dt_i = f(x_i, U_i, t_i)$ с m -мерным вектором управления U_i и p -мерным выходом y_i в t_i интервале времени представляется в виде

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt_i} = A_i(x_i, t_i) \cdot x_i(t_i) + B_i(x_i, t_i) \cdot U_i(t_i) \\ y_i(t_i) = C_i(x_i, t_i) \cdot x_i(t_i) + M_i(t_i) \cdot U_i(t_i) ; \\ t_i \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

здесь: $A_i(x_i, t_i)$, $B_i(x_i, t_i)$ – переменные матрицы параметров линеаризованной модели объекта управления модели размерностей $(n \times n)$, $(n \times m)$ соответственно, непрерывные и ограниченные вместе со своими частными производными для всех x_i, t_i из некоторой заданной области

$$X_{\kappa_i} = (x_i, t_i : \|x_i\| \leq k_i; t_i \geq 0), \quad (2)$$

где X_{κ_i} – $(n \times p)$ – мерная матрица; $C_i(x_i, t_i)$ – матрица перестраиваемых коэффициентов адаптивного регулятора в обратной связи размерности $(n \times m)$ коррекции функции $y_i(t_i)$, $M_i(t_i)$ – матрица идеальной настройки обратной связи размерности $(m \times m)$, а управление $U_i(t_i)$ – кусочно-непрерывная функция и входит в (1) линейно.

Будем считать динамические объекты «ППЧ + плазмотрон» адаптивно управляемым и наблюдаемым для всевозможных линейных или квазилинейных стационарных приближений (1) и равномерно по всем параметрам x_i, t_i во всей определенной области (2), а также исходить из других необходимых для постановки задачи адаптивного управления динамическими объектами предположений [10, 11].

Одновременно с системой уравнений (1) рассмотрим также некоторое ее линейное стационарное приближение в виде:

$$\frac{dx_i}{dt_i} = A_0(x_i, t_i) \cdot x_i(t_i) + B_0(x_i, t_i) \cdot U_i(t_i). \quad (3)$$

Для матриц: $A_i(x_i, t_i)$ и $B_i(x_i, t_i)$, полагаем, что все их ненулевые элементы $a_{ij}(x_i, t_i)$ и $b_{ij}(x_i, t_i)$ удовлетворяют требованию положительной определенности в некоторой заданной области (2), а матрицы $A_0(x_i, t_i)$ и $B_0(x_i, t_i)$ выбираем так, чтобы знаки их ненулевых элементов совпадали со знаками соответствующих ненулевых элементов $A_i(x_i, t_i)$ и $B_i(x_i, t_i)$, а именно:

$$\begin{aligned} a_{ij}(x_i, t_i) &\geq \alpha \\ b_{ij}(x_i, t_i) &\geq \beta \end{aligned} \quad (4)$$

Для оценки локальных нелинейных и нестационарных параметрических рассогласований в «ППЧ + плазматрон», отсчитываемых от усредненных значений в описании (3), вводятся дополнительные матрицы:

$$\begin{aligned} A(x_i, t_i) - A_0(x_i, t_i) &= \Delta_a^0(x_i, t_i) \\ B(x_i, t_i) - B_0(x_i, t_i) &= \Delta_b^0(x_i, t_i) \end{aligned} \quad (5)$$

удовлетворяющие следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \|\Delta_a^0(x_i, t_i)\| &\leq a^0 = \text{const} > 0 \\ \|\Delta_b^0(x_i, t_i)\| &\leq b^0 = \text{const} > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть показатель качества робастно-адаптивных МСАУ с эталонной моделью и сигнальной настройкой параметров «ППЧ + плазматрон» задается в явном виде состоянием заданной эталонной модели

$$\frac{dx_i^{\text{э}}}{dt_i} = A_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i) \cdot x_i^{\text{э}}(t_i) + B_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i) \cdot U_i^{\text{э}}(t_i), \quad (7)$$

а цель управления заключается в выполнении

$$\lim e(t) = 0 \dots \text{при } t \rightarrow \infty, \quad (8)$$

здесь: $e(t) = x_i(t) - x_i^{\text{э}}(t) > 0$; а $A_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i)$ – гурвицева матрица, рассчитывается из известных требований к желаемой динамике адаптивных МСАУ «ППЧ + плазматрон»; $B_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i)$ – удовлетворяет аналогичным требованиям функции (4); $U_i^{\text{э}}(t_i)$ – робастно-адаптивное управление с эталонной моделью.

Дифференциальное уравнение для оценки ошибки управления из (1), (7) представим в виде

$$\frac{de_i}{dt_i} = A_i^{\text{э}}(x_i, t_i) \cdot e_i(t_i) + \Delta_a^{\text{э}} \cdot x_i(t_i) + \Delta_b^{\text{э}} \cdot U_i^{\text{э}}(t_i) + B_i(x_i, t_i) \cdot [U_i(t_i) - U_i^{\text{э}}(t_i)] \quad (9)$$

здесь матрицы перестраиваемых коэффициентов размерности:

$$\begin{aligned} \Delta_a^{\text{э}} &= A_i(x_i, t_i) - A_i^{\text{э}}(x_i, t_i) \\ \Delta_b^{\text{э}} &= B_i(x_i, t_i) - B_i^{\text{э}}(x_i, t_i). \end{aligned}$$

Алгоритмы адаптивного управления $U_i(t_i)$, обеспечивающие устойчивость и максимальную скорость убывания функции Ляпунова $V(e, t) = e^T P e$, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} U_i(t_i) &= U_i^{\text{э}}(t_i) + U_i^{\text{ан}}(t_i) = \\ &= U_i^{\text{э}}(t_i) - \mathfrak{G} \cdot \text{sign} [B_i(x_i, t_i) \cdot P e] \end{aligned} \quad (10)$$

где $U_i^{\text{ан}}(t_i)$ – адаптивно корректирующий сигнал; P – постоянная симметричная, положительно определенная матрица; \mathfrak{G} – коэффициент усилителя адаптивного корректора; $B_i(x_i, t_i)$ – известная матрица, удовлетворяющая всем условиям (4).

Для практической реализации алгоритмов управления (10) с учетом всех оговоренных для нее условий (4) закон робастно-адаптивного управления «ППЧ + плазматрон» представим в виде:

$$\begin{cases} U_i(t_i) = U_i^{\text{э}}(t_i) - \mathfrak{G} \cdot \text{sign} [B_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i) \cdot P \hat{e}] \\ \hat{e}(t) = \hat{x}_i(t) - x_i^{\text{э}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

где оценка $\hat{x}_i(t)$ состояния x_i вычисляется с помощью построенного по параметрам эталонной модели стационарного наблюдателя

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}_i}{dt_i} &= A_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i) \cdot \hat{x}_i(t_i) + L C_i(x_i, t_i) \times \\ &\times [y_i(t_i) - C_i(x_i, t_i) \cdot \hat{x}_i(t_i)] + \\ &+ B_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i) U_i^{\text{э}}(t_i), \end{aligned} \quad (12)$$

здесь L – симметричная постоянная матрица больше нуля.

Установление условий замены матрицы $B_i(x_i, t_i)$ на матрицу $B_i^{\text{э}}(x_i^{\text{э}}, t_i)$ равносильно

получению условия неотрицательности линейной формы функции

$$F(e) = e^T \cdot P \cdot B \cdot \text{sign} [B_i^*(x_i^*, t_i) \cdot Pe], \quad (13)$$

которая возникает при вычислении производной по времени функции Ляпунова $F = V(e, t)$ в силу оценок (9) и (10). Заметим, что утверждая о неотрицательности функции $F = V(e, t)$, имеем ввиду все пространство векторов e , а положительность $F = V(e, t)$ рассматривается в подпространстве, определяемом областью значений оператора $P \cdot B_i^*(x_i^*, t_i)$.

Традиционно задача управления термодинамическими процессами в РТК ионно-плазменного нанесения износостойчивых покрытий рассматривается как задача получения в результате процесса максимальной полезной работы (коэффициента полезного действия и производительности) [12, 13]. В этом случае термодинамические процессы в РТК ионно-плазменного нанесения покрытий можно представить в виде системы $Q_i^*(t_i)$, определенной на прямом декартовом произведении множеств [12, 13]

$$Q_i^*(t_i) \subset \{U_i^*(t_i)\} \times \{X_i^*(t_i)\}, \quad (14)$$

где $U_i^*(t_i)$ – вектор управляющих воздействий на ППЧ плазмотрона; $X_i^*(t_i)$ – вектор термодинамических параметров состояния плазменного нанесения покрытий. Тогда цель управления «ППЧ + плазмотрон»

$$L\{X_i^*(t_i), U_i^*(t_i)\} \rightarrow \max, \quad (15)$$

здесь $L\{X_i^*(t_i), U_i^*(t_i)\}$ – характеристика термодинамического процесса нанесения покрытий (полезная работа, количество теплоты, адаптивное управление и т.д.), кроме того оператор $L\{X_i^*(t_i), U_i^*(t_i)\}$ во всем временном отрезке t_i структурно и информационно-математически определен.

Рассмотрим постановку взаимосвязанных задач управления процессами ионно-плазменного нанесения покрытий, представленных в виде системы $Q_i(t_i)$:

$$Q_i(t_i) \subset \{U_i^*(t_i)\} \times \{X_i^*(t_i)\} \times \{R_i^*(t_i)\}, \quad (16)$$

где $R_i^*(t_i)$ – вектор показателей качества нанесения покрытий, а целью робастного адаптивного управления является выполнение системы целевых неравенств

$$R_{i(\min)}^*(t_i) \leq R_i^*(t_i) \leq R_{i(\max)}^*(t_i), \quad (17)$$

образующих область допустимых значений показателя качества нанесенного покрытия. Структура и параметры операторов, устанавливающих следующие зависимости $R_i^*(t_i) = f(X_i^*(t_i))$ и $R_i^*(t_i) = f(U_i^*(t_i))$ предполагаются неизвестными.

Показатели качества нанесенного покрытия $R_i^*(t_i)$ зависят от траекторий изменения термодинамических сил α_{ij} , геометрии плазменного потока в зонах нанесения покрытий и их работ [14, 15]. Между всеми термодинамическими силами и их потоками существует экспериментально полученная зависимость

$$\begin{cases} X_{ij}^*(t_i) \equiv \int_{\partial V} f(\lambda_{ij}, d\sigma_{ij}) \\ \lambda_{ij} = \sum_i \sum_\varepsilon \delta_{i\varepsilon} a_\varepsilon \end{cases}, \quad (18)$$

где dV – поверхность, ограничивающая элементарный объем V , в котором выполняются условия локального термодинамического равновесия; $d\sigma_{ij}$ – нормальный элемент поверхности dV . Тогда физически корректной является декомпозиция системы « Q_i » нанесения покрытий на две подсистемы: «Режим» – « Q_m » и «Качество» – « Q_q »:

$$Q_i = Q_m \circ Q_q, \quad (19)$$

где $Q_m \subset \{U_m^*(t_i)\} \times \{X_m^*(t_i)\}$ и $Q_q \subset \{U_q^*(t_i)\} \times \{X_q^*(t_i)\}$.

Динамическое состояние подсистемы «Качество» – « Q_q » описывает система дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} dq_i/dt_i = \Phi_{q_i}(q_i, X_i, t_i) \\ Q_i(t_i) = \Phi_{Q_i}(q_i, T_i) \\ t \in [0, T] \end{cases}; \quad (20)$$

здесь $q_i(t_i)$ и $Q_i(t_i)$ – непрерывные векторы функции, удовлетворяющие всем условиям

существования и единственности решения системы уравнений (20); T – длительность работы подсистемы «Качество» – $Q_q \subset \{U_q^*(t_i)\} \times \{X_q^*(t_i)\}$.

Предположим, что известна траектория изменения параметров состояния процесса $X_0(t_i)$ такая, что для всех t_i выполняется условие:

$$X_0(t_i) = X(t_i) \rightarrow Q_i(t_i) = Q_{\text{опт}}(t_i), \quad (21)$$

где $Q_{\text{опт}}(t_i)$ – номинальное значение вектора показателей качества или точка «абсолютного минимума», сопоставленного к исходной цели робастно-адаптивного управления (15) взаимосвязанными динамическими объектами РТК. Оценим чувствительность $Q_i(t)$ к возможным отклонениям всех термодинамических параметров состояния объектов от заданных номинальных величин. Для оценки воспользуемся неравенством

$$\sum_{i=1}^n |Z_i| \leq M \int_0^{t_i} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i(\tau)| d\tau, \quad (22)$$

где $(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T = Z$ – решение системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dZ_i(t_i)}{dt_i} = A_i(Z_i, t_i) \cdot Z_i(t_i) + \mu_i(t_i) \\ \mu_i(t_i) = K_i \cdot (U_i(t_i) - \tilde{K} \cdot Z_i(t_i)) \end{cases}. \quad (23)$$

Для формирования уравнения настройки элементов матрицы введем вещественный параметр $\lambda \neq 0$ и преобразуем систему уравнений (20) к виду:

$$\begin{cases} dq_i/dt_i = \Phi_{q_i}(q_i, \lambda \varepsilon_i, t_i) \\ Q_i(t_i) = \Phi_{Q_i}(q_i, T_i) \\ \lambda \varepsilon_i(t_i) = X_i^*(t_i) - X_0^*(t_i) \end{cases}; \quad (24)$$

отклонения $Q_i(t_i)$ от номинальных (эталонных) значений определяются как

$$\begin{aligned} \Delta Q_i(t_i) &= Q_i(t_i) - Q_i^{\text{от}}(t_i) \approx \frac{\partial Q_i(t_i)}{\partial \lambda_i(t_i)} \cdot \lambda_i(t_i) = \\ &= \frac{\partial Q_i(t_i)}{\partial q_i(t_i)} \cdot \frac{\partial q_i(t_i)}{\partial \lambda_i(t_i)} \cdot \lambda_i(t_i) \end{aligned}, \quad (25)$$

здесь $\partial q_i(t_i)/\partial \lambda_i(t_i)$ – решения системы уравнений чувствительности

$$\frac{\partial q_i(t_i)}{\partial \lambda_i(t_i)} = \frac{\partial Q_i(t_i)}{\partial q_i(t_i)} \cdot \frac{\partial q_i(t_i)}{\partial \lambda_i(t_i)} + \frac{\partial Q_i(t_i)}{\partial \varepsilon_i(t_i)} \cdot \varepsilon_i(t_i). \quad (26)$$

Тогда из (26) с учетом неравенства (22) получим

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial Q_i(t_i)}{\partial \lambda_i(t_i)} \right| \leq M \int_0^T \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i(t)| dt. \quad (27)$$

Неравенство (27) обосновывает выбор в качестве цели управления подсистемой «Режим» минимизацию составляющих $|\varepsilon_i(t)|$, что может быть достигнуто за счет обеспечения условий инвариантности всех термодинамических параметров состояния $X(t_i)$ ко всему комплексу возмущающих воздействий динамических объектов «ППЧ + плазмотрон».

Представим $X_0^*(t_i)$ также в виде суммы ряда

$$X_0^*(t_i) = \sum_{k=1}^{k_{\text{max}}} C_k \cdot \varphi_k(t_k); \quad (28)$$

здесь $\varphi_k(t_k)$ – базисные вектора функции управления; C_k – диагональные матрицы. Тогда задачу определения $X_0^*(t_i)$ можно рассмотреть как задачу поиска (адаптации) элементов матрицы C_k и провести декомпозицию исходной цели управления на две – стабильная скорость и термодинамические процессы нанесения покрытий вдоль рабочей траектории и поиск робастно-адаптивных условий проведения технологических процессов на границах.

Именно эти свойства обуславливают главное преимущество построенных на моделях (7)–(28) робастно адаптивных алгоритмов управления объектами РТК для ионно-плазменного нанесения покрытий, заключающееся в высокой степени гибкости и удобстве настройки элементов матриц C_k , эквивалентно адаптирующей к эталонным (желаемым) изменениям матриц управления и состояния. Рациональный выбор элементов матриц, как показывают расчеты и исследования, позволяет обеспечить предъявляемые к качеству робастной адаптации требования к МСАУ и оптимизировать процедуры функционирования алгоритмов адаптации и автоматического управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования связаны с одной из фундаментальных проблем современной теории автоматического управления сложными динамическими объектами РТК плазменного нанесения покрытий, а именно: синтезом эффективных алгоритмов для робастно адаптивных МСАУ, обеспечивающих гарантированные показатели переходных процессов в динамических системах в условиях неопределенности.

Проведена декомпозиция задачи управления динамическими объектами РТК плазменного нанесения покрытий на две самостоятельные: поиск и адаптация траекторий движения термодинамических параметров состояния плазменного нанесения покрытий и стабилизация движения параметров состояния нанесения покрытий вдоль заданной траектории.

На основании термодинамического подхода к исследованию динамических объектов РТК получена их обобщенная модель, представленная в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в физически реальном пространстве термодинамических параметров нанесения покрытий. В модели выделено комплексное возмущающее воздействие, включающее в себя влияние неизбежных погрешностей структурной и параметрической идентификации.

Исходя из полученных моделей, проведен структурный синтез робастно-адаптивных МСАУ с жесткой структурой и мало чувствительных к комплексному возмущающему воздействию РТК плазменного нанесения покрытий. Дано аналитическое обоснование и проведено имитационное исследование достижения поставленных целей функционирования робастно-адаптивных МСАУ сложными объектами РТК, синтезированных по разработанным методикам. Определены условия реализуемости алгоритмов адаптации, условия устойчивости и найдены оценки времени сходимости выходных процессов синтезированных систем к желаемой траектории при действии ограниченных переменных возмущений, найдены оценки влияния аддитивных возмущений на установившиеся ошибки и ошибки формирования управляющих воз-

действий, получены аналитические зависимости между управляющими воздействиями и коэффициентами эталонного уравнения, на основе которых сформулированы рекомендации по выбору параметров адаптивных систем в зависимости от условий их функционирования. Полученные расчетные соотношения позволяют осуществить выбор параметров адаптивных систем управления с обратной связью по первым производным координат состояния, обладающих малой чувствительностью к переменным возмущениям различных видов.

Применение алгоритмов адаптации способствует повышению качественных показателей переходных процессов в условиях действия возмущений, изменяющихся в темпе с основными процессами системы. Использование систем с контурами адаптации в соответствующих каналах приводит к сокращению времени настройки адаптивных регуляторов и ввода в эксплуатацию в условиях промышленного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хасанов З. М.** Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 44–50. [Z. M. Khasanov, "Automated processing equipment for electric arc plasma spraying", (in Russian), in *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 5, pp. 44-50, 2006.]
2. **Новые** механизмы в современной робототехнике. Под ред. В. А. Глазунова. М.: Техносфера, 2018. 316 с. [V. A. Glazunov (ed.), *New mechanisms in modern robotics*, (in Russian). Moscow: Tekhnosfera, 2018.]
3. **Кунцевич В. М.** Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006. 264 с. [V. M. Kuntsevich, *Control under Uncertainty: Guaranteed Results in Control and Identification Problem*, (in Russian). Kiev: Naukova Dumka, 2006.]
4. **Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория автоматического управления. СПб: Профессия, 2003. 752 с. [V. A. Besekersky, E. P. Popov, *Automatic control theory*, (in Russian). St. Petersburg: Proffesiya, 2003.]
5. **Хасанов З. М., Хасанов О. З., Гузаиров Р. М.** Математическая модель движения многосвязных систем электроприводов для технологических процессов электродугового плазменного напыления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 2. С. 116–122. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, R. M. Guzairov, "Mathematical model of motion of multiply connected systems of electric drives for technological processes of electric arc plasma spraying", (in Russian), in *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*, vol. 16, no. 2, pp. 116-122, 2015.]
6. **Якимович Б. А., Хасанов З. М., Хасанов О. З.** Позиционно-адаптивное управление многосвязными электро-

приводами технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник ИжГТУ. 2014. № 4. С. 41–45. [B. A. Yakimovich, Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, "Position-adaptive control of multiply connected electric drives of technological equipment of electric arc plasma spraying", (in Russian), in *Vestnik IzhGTU*, no. 4, pp. 41-45, 2014.]

7. Хасанов З. М., Хасанов О. З. К синтезу робастно-адаптивной системы с эталонной моделью для динамического управления взаимосвязанными электроприводами роботизированного технологического комплекса плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 21, № 4 (82). С. 150–160. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, "Robust-adaptive control system with a reference model for the dynamic control of the interconnected electric drives of the robotic technological complex of plasma coating", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 4 (82), pp. 150-160, 2018.]

8. Хасанов З. М., Хасанов О. З., Хасанова Н. В. К синтезу системы адаптивного управления скоростью и положением многосвязных приводов с моделью эталоном на основе теории устойчивости // Proceedings of the 5th All-Russian Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support". Ufa: UGATU, 2017. Vol. 2. Pp. 175-180. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, N. V. Khasanova, "On the synthesis of the system of adaptive speed and position control of multicoupling electric drives with a ideal model based on the theory of stability", (in Russian), in *Proceedings of the 5th All-Russian Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support"*, vol. 2, pp. 175-180, 2017.]

9. Хасанов О. З., Хасанов З. М. К синтезу адаптивных САУ многосвязными электроприводами с моделью эталоном и с беспойсковым алгоритмом идентификации // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21, № 4 (78). С. 163–172. [O. Z. Khasanov and Z. M. Khasanov, "To the synthesis of adaptive systems for automatic control of multiply connected electric drives with a reference model and with searchless algorithm of identification", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 21, no. 4 (78), pp. 163-172, 2017.]

10. Влияние нечеткого регулятора на повышение точности позиционирования и быстродействия систем адаптивного управления многосвязными приводами / З. М. Хасанов [и др.] // Proceedings of the 5th All-Russian Conference «Information Technologies for Intelligent Decision Making Support» (ITIDS'2017). Ufa: UGATU, 2017. Vol. 1. Pp. 64-66. [Z. M. Khasanov, et al., "The influence of fuzzy controller on the increase of positioning accuracy and speed of adaptive control systems of multiply connected drives", (in Russian), in *Proceedings of the 5th All-Russian Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support" (ITIDS'2017)*, vol. 1, pp. 64-66, 2017.]

11. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К проектированию широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 128–134. [Z. M. Khasanov, R. M. Guzaïrov, "To design of a wide-range electric drive for technological equipment of electric arc plasma coating application", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 128-134, 2013.]

12. Khasanov O. Z., Khasanov Z. M., Akhmetzyanova I. R. The multiprocessor control system of dynamics multiply connected technological electric drives // Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "INDUSTRY 4.0". 2018. Vol. 3, Iss. 5. Pp. 248-252. [O. Z. Khasanov, Z. M. Khasanov, I. R. Akh-

metzyanova, "The multiprocessor control system of dynamics multiply connected technological electric drives", in *Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "INDUSTRY 4.0"*, vol. 3, Iss. 5, pp. 248-252, 2018.]

13. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного нанесения покрытий // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 146–149. [Z. M. Khasanov, R. M. Guzaïrov, "To design of a wide-range electric drive for technological equipment of electric arc plasma coating application", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 146-149, 2013.]

14. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований // Технология машиностроения. 2007. № 8. С. 58–67. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, "A method of modeling an adaptive control system for an automated electric drive by the method of equivalent structural transformations", (in Russian), in *Tekhnologiya mashinostroeniya*, no. 8, pp. 58-67, 2007.]

15. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Самонастраивающаяся информационно-управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32. [Z. M. Khasanov, O. Z. Khasanov, "Self-adjusting information and control system with a model for dynamic control of electric drives in high-temperature technological processes", (in Russian), in *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii*, no. 12, pp. 23-32, 2008.]

ОБ АВТОРАХ

ХАСАНОВ Олег Зимфирович, асп. каф. АТП. Дипл. математик – системный программист (УГАТУ, 2009). Готовит дис. по адаптивным многосвязным системам управления нелинейными взаимосвязанными электроприводами технологического оборудования.

ХАСАНОВ Зимфир Махмутович, проф. каф. электромеханики. Дипл. инж. по промышленной электронике (НЭТИ, 1984). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. адаптивного и оптимального управления сложными технологическими объектами.

METADATA

Title: Algorithms for adaptive control and identification of nonlinear dynamic objects of a robotic technological complex with a reference model and signal adaptation.

Authors: O. Z. Khasanov¹, Z. M. Khasanov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹legnix@mail.ru, ²zimfirm@list.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 102-111, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Integration of various multiply connected automatic control systems (MCACS) based on microcontrollers allows us to put the design processes and formation of robustly adaptive control algorithms in a fundamentally new way. This makes it possible to solve complex problems of multi-

criteria and optimization management in real time and quickly implement their full modernization. Design processes are implemented using a combination of procedures of optimal parameter estimation (identification) and the state of all controlled processes with optimization procedures of robustly adaptive control of interconnected drives using predictive and reference models.

Key words: robust-adaptive MCACS; structural synthesis; mathematical model; dynamics of motion; vector-matrix differential equations; interconnected electric drive.

About authors:

KHASANOV, Oleg Zimirovich, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Automation of Technological Processes - Ufa. Master of Mathematics & Computer Science (USATU, 2009).

KHASANOV, Zimfir Makhmutovich, Prof. Dept. of Electromechanics. Dipl. Industrial Electronics Engineer (Novosibirsk Electrotechnical Institute, 1984). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2009).