МИНСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ШМАКОВ Михаил Сергеевич

УДК 681.513.52

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

05.13.01 - Управление в технических системах
05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и производств (промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Минск 1989

Работа выполнена в Минском радиотехническом институте

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент, Панасюк А.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Михалёв А.С.

кандидат технических наук, доцент Юденков В.С.

Ведущая организация - НПО "Гранат"

Защита диссертации состоится "____" _____1989г. в _____часов на заседании специализированного Совета К 056.05.01 по присуждению учёной степени кандидата технических наук по специальностям 05.13.01, 05.13.07. Минский радиотехнический институт, 220600, г.Минск, ул.П.Бровки, 6, МРТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Минского радиотехнического института.

Автореферат разослан "____"_____1989г.

Учёный секретарь специализированного Совета К 056.05.01, кандидат технических наук, доцент А.В.Николаев

Минский радиотехнический институт
1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решениями XXVII съезда КПСС предусмотрено техническое перевооружение технологии обработки текстильных материалов.

Электромеханические исполнительные устройства с асинхронными (АД) и шаговыми двигателями (ШД) находят всё более широкое применение для автоматизации процессов обработки текстильных материалов, благодаря долговечности, относительной простоте обслуживания, надёжности, обусловленной бесконтактным исполнением.

Одним из главных технологических процессов обработки материалов является раскрой. Разработка роботизированных лазерных раскройных комплексов позволяет, по сравнению с механическими средствами раскроя, сократить долю ручного труда, увеличить точность кроя, повысить качество линии реза и оперативность при переходе от одной заготовки к другой. Специфика технологического процесса лазерного раскроя текстильных материалов выдвигает основным требованием к раскройным комплексам - максимальную производительность, определяемую быстродействием электромеханической системы транспортирования лазерного луча, основанную на использовании ШД. Поэтому важную роль в роботизации раскроя играет задача максимизации производительности манипулятора лазерного раскроя с исполнительными ШД с учётом ограничений, обусловленных технологией процесса резки.

Дальнейшее совершенствование электромеханических систем автоматизированной обработки текстильных материалов с исполнительными АД связано с плавным регулированием скорости, достигаемым с помощью частотного управления. Частотное управление экономически выгодно для электромеханических систем с АД, работающих в повторно-кратковременных режимах, с длительной нагрузкой. Эти режимы являются одними из основных в производствах обработки текстильных материалов. Оптимизация частотного управления позволяет разрабатывать быстродействующие электромеханические системы обработки текстильных материалов.

Нахождение оптимального управления электромеханическими системами с ШД и частотно-управляемыми АД представляет трудоёмкую задачу вследствие конструктивной сложности, высокого

порядка дифференциальных уравнений динамики систем, наличия нелинейностей и фазовых ограничений. Поэтому, несмотря на развитую теорию оптимальных процессов, разработка эффективных вычислительных алгоритмов оптимального управления такими системами для применения в технологических процессах автоматизированной обработки текстильных материалов является актуальной.

Работа выполнена в рамках республиканской комплексной программы интенсификации производства на основе внедрений достижений научно-технического прогресса на 1986-1990 годы и в рамках пятилетнего плана важнейших научно-исследовательских работ в области естественных, технических и общественных наук по БССР, утверждённого Постановлением Президиума АН БССР от 03.04.86г., № 39.

Цель работы заключается в оптимизации по быстродействию управления электромеханическими системами автоматизированной обработки текстильных материалов с частотно-управляемыми АД и ШД и разработке для подобного класса задач машинно-ориентированного инженерного метода нахождения алгоритмов оптимального по быстродействию управления нелинейными электромеханическими системами с учётом фазовых ограничений; разработке микропроцессорной реализации полученных алгоритмов управления.

Основные задачи исследования:

- разработка методики построения оптимальных по быстродействию программных траекторий манипуляторов в трубке допустимых отклонений и получение на её основе алгоритмов оптимального и квазиоптимального по производительности управления портальным манипулятором (ПМ) в технологическом процессе лазерного раскроя текстильных материалов;

- разработка структурных схем системы управления ШД портального манипулятора лазерного раскроя с микропроцессором в контуре управления, реализующих полученные алгоритмы управления;

разработка инженерной методики оптимального по быстродействию частотного управления АД электромеханических систем автоматизированной обработки текстильных материалов с учётом электромагнитных процессов АД.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теории автоматического управления и регулирова-

ния, численные методы моделирования динамических систем, экспериментальные исследования с привлечением современной измерительной и микропроцессорной техники.

Научная новизна работы заключается в разработке инженерного метода расчёта оптимального по быстродействию управления электромеханическими системами автоматизированной обработки текстильных материалов, основанного на использовании динамики множеств достижимости (МД). Он позволил впервые решить задачу оптимального по производительности управления ПМ лазерного раскроя с исполнительными ШД и получить существенно новые результаты в оптимальном по быстродействию частотном управлении АД электромеханических систем, включая номограммы, дающие возможность находить оптимальное частотное управление АД с конкретными параметрами по приведённому в работе базовому решению без оптимизационных вычислений.

Выносятся на защиту следующие основные положения и результаты диссертационной работы:

- машинно-ориентированная методика построения оптимальных по производительности программных траекторий манипуляторов в трубке допустимых отклонений на основе МД и полученные с её помощью алгоритмы оптимального и квазиоптимального по производительности управлений ПМ лазерного раскроя текстильных материалов;

- структурные схемы микропроцессорной реализации полученных законов управления исполнительными ШД портального манипулятора лазерного раскроя;

- методика нахождения оптимальных по быстродействию управлений электромеханическими системами автоматизированной обработки текстильных материалов с частотно-управляемыми АД на основе динамики МД, включающая в себя: операции совместной декомпозиции и нормировки для расчёта оптимального управления электродвигателями систем регулирования, позволяющие существенно упрощать задачу с минимизацией числа входящих в постановку задачи параметров; приведение сложной задачи оптимального управления АД электромеханических систем с размерностью фазового пространства n =5 к более простой задаче с размерностью фазового пространства n =2, не зависящей от параметров конкретного двигателя с оценкой возникающей за счёт упрощений погреш-

ности;

- полученные на основе предложенной методики законы оптимального по быстродействию управления скоростью и электромагнитным моментом АД с учётом электромагнитных переходных процессов, нелинейностей и фазового ограничения ненасыщенности магнитопровода двигателя по упрощённой беспараметрической модели с номограммами, формулами пересчёта и оценкой погрешности от упрощений для произвольного АД.

Практическая ценность. Практическое значение результатов диссертационной работы заключается в следующем: разработке машинно-ориентированной методики нахождения оптимальных по производительности управлений манипуляторами при отработке ими заданных траекторий в трубке допустимых отклонений, которая позволила получить законы оптимального и квазиоптимального по производительности управления ПМ в технологическом процессе лазерного раскроя материалов; разработке структурных схем и алгоритмов функционирования системы управления ШД портального манипулятора лазерного раскроя, реализующих полученные законы управления; разработке методики нахождения оптимальных по быстродействию управлений электромеханическими системами автоматизированной обработки текстильных материалов с частотно-управляемыми АД, с помощью которой получены законы оптимального по быстродействию управления скоростью и электромагнитным моментом АД с учётом электромагнитных переходных процессов, нелинейностей и фазового ограничения ненасыщенности магнитопровода по упрощённой беспараметрической модели с номограммами, формулами пересчёта и оценкой погрешности от упрощений для произвольного АД.

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (х/д 78-84, ГБ-86-2021) в Минском радиотехническом институте. Акты, подтверждающие внедрение диссертационной работы, приведены в приложении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: УII Всесоюзной конференции по проблемам теоретической кибернетики (Иркутск, 1985); УI Всесоюзном совещании-семинаре молодых учёных "Современные методы автоматического управления" (Пушкино, 1985); Всесоюз-

ной научно-технической конференции "Моделирование-85" (Киев, 1985); X Объединённом семинаре "Прикладная информатика автоматизированных систем проектирования, управления, программированной эксплуатации" (Калининград, 1985); Республиканской научно-технической конференции "Опыт создания и пути повышения эффективности функционирования автоматизированных систем управления предприятиями и технологическими процессами" (Гомель, 1985); XXI Областной научно-технической конференции по автоматическим и автоматизированным системам управления (Пермь, 1985); X Всесоюзном совещании по проблемам управления (Алма-Ата, 1986); научно-технической конференции "Прогрессивные технологические процессы, механизация и автоматизация ручных и трудоёмких работ. Новое в сварке" (Устинов, 1986); Всесоюзном семинаре "Динамика нелинейных процессов управления" (Таллин, 1987); II Всесоюзном семинаре "Роботы и гибкие производственные системы" (Челябинск, 1988).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 22 печатных работы, в том числе 8 статей, 2 отчёта по НИР.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков. Библиография состоит из 133 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы пути совершенствования технологических установок автоматизированной обработки текстильных материалов с исполнительными АД и ШД. Основным требованием, предъявляемым к ряду таких установок, например, швейным автоматизированным агрегатам, является минимальное время их пуска и останова. Быстрое формирование заданных моментов АД и стабилизация их необходима в устройствах наматывания и разматывания рулонов материалов. Задача формирования номинального момента АД при пуске возникает в общетехнологическом оборудовании производств обработки текстильных материалов.

Частотное управление АД позволяет реализовать требуемые показатели качества электромеханических систем обработки текстильных материалов. Его оптимизация и учёт электромагнитных процессов в двигателе даёт возможность получить высокие моменты и быстродействие. Показано, что разработка высокопроизводительных электромеханических систем с АД приводит к необходимости решения задач оптимального по быстродействию частотного управления АД с учётом электромагнитных процессов. При этом требуется определить оптимальные законы изменения управляющих величин АД - напряжения U и частоты ω, которые обеспечивают изменение скорости АД с начального значения $V(t_0)$ до величины $V(T)$ за минимальное время $T \to min$ и оптимальные законы $U(t)$, $\omega(t)$, обеспечивающие изменение электромагнитного момента АД со значения $M_э(t_0)$ до $M_э(T)$ за $T \to min$ и удержание его на этом уровне, при ограничениях на фазовые координаты и управления $0 \le \omega \le \omega_{max}$, $0 \le U \le U_{max}$.

Исследована специфика лазерного раскроя текстильных материалов, позволяющего осуществлять комплексную автоматизацию процесса раскроя. ПМ лазерного раскроя с исполнительными ШД работает в напряжённых динамических режимах, в которых производительность раскройного комплекса определяется динамическими характеристиками ПМ. Траектории кроя являются кусочно-гладкими с изломами. Значительную часть времени работы ПМ в общем времени процесса резания составляет время перехода с одного участка на другой. Поэтому решаемая задача максимизации производительности ПМ с ШД заключается в определении допустимых управлений, переводящих систему с одного участка на другой за минимальное время, удовлетворив требованиям по точности отработки предписанной траектории и выполнив ограничения по скорости резания. Решение этой задачи позволяет получить общую методику управления ПМ.

Проведённый анализ методов оптимального управления показал целесообразность использования для решения поставленных задач МД динамических систем, позволяющих разрабатывать инженерные алгоритмы расчёта оптимального управления.

Вторая глава посвящена разработке общей методики определения оптимального управления электромеханическими системами. Предложена машинно-ориентированная методика определения опти-

мальных по быстродействию программных траекторий манипуляторов при наличии ограничений на вектор состояния на основе расчёта динамики МД.

Для манипулятора, динамика которого описывается уравнениями

$$\dot{v}_i = f_i(q_1,\dots,q_n,v_1,\dots,v_n,u_1,\dots,u_r,\lambda_1,\dots\lambda_q);$$
$$\dot{q}_i = v_i\ ,\ i=1,\dots,n \qquad (I)$$

задана кусочно-гладкая траектория рабочего органа $x_3(\alpha)\in R^p$ $0\leq\alpha\leq 1$. В (I) $q_1,\dots,q_n$, $v_1,\dots,v_n$ – обобщённые фазовые переменные, из которых $q_1,\dots,q_n$ определяют конфигурацию манипулятора, а $v_1,\dots,v_n$ служат скоростями изменения $q_1,\dots,q_n$ соответственно; $u_1,\dots,u_r$ – управления, $\lambda_1,\dots,\lambda_q$ – параметры. Переменные $q_1,\dots,q_n$ определяются через переменные, характеризующие состояние рабочего органа манипулятора $x_1,\dots,x_p$, где $n\geq p$, с помощью уравнений кинематики

$$x = F(q). \qquad (2)$$

Необходимо, чтобы положение исполнительного органа манипулятора $x(t)$ в любой текущий момент времени t удовлетворяло условиям

$$x(t)\in L(\varepsilon), \qquad (3)$$

где $L(\varepsilon)$ – ε – окрестность $x_3(\alpha)$. Величина ε задаётся техническим заданием и равна максимально допустимому отклонению исполнительного органа от точек $x_3(\alpha)$. На U и V наложены ограничения

$$u_{j\,min}\leq u_j\leq u_{j\,max}\ ;\ j=1,\dots,r\ ; \qquad (4)$$
$$v_{i\,min}\leq v_i\leq v_{i\,max}\ ;\ i=1,\dots,n. \qquad (5)$$

Если разрешить (2) относительно $q=F^{-1}(x)$, то включение (3) можно заменить включением

$$q(t)\in Q(\varepsilon). \qquad (6)$$

Требуется определить управления $u_1,\dots,u_r$, удовлетворяющие (4), переводящие (I) из начального состояния $w_0=[q_{10},\dots,q_{n0},v_{10},\dots,v_{n0}]^T$ в конечное $w_T=[q_{1T},\dots,q_{nT},v_{1T},\dots,v_{nT}]^T$ за $T\to min$, выполнив (5) и требование по точности отработки

заданной траектории (6).

Впервые для расчёта оптимальных программных траекторий манипуляторов предложено использовать динамику МД. Введём в рассмотрение множество $W(\varepsilon)$ в пространстве R^{2n}.

$$W(\varepsilon)=\{(v_1,\dots,v_n,q_1,\dots,q_n):(v_1,\dots,v_n)\in V,(q_1,\dots,q_n)\in Q(\varepsilon)\},$$

где V – множество допустимых векторов обобщённых скоростей манипулятора. При малых ε и ограниченных скоростях область $W(\varepsilon)$ оказывается достаточно узкой, что существенно снижает объём вычислений. Множество $W(\varepsilon)$ разбивается на ряд трубок $w_i\in W(\varepsilon)$, $i=1,\dots,\ell_T$, расположенных параллельно заданной траектории и заполняющих собой $W(\varepsilon)$. Введение трубок является новым элементом в методике применения МД к нахождению оптимального управления, существенно повышающим устойчивость и эффективность алгоритма, их число задаётся в ходе расчётов и корректируется исходя из требуемой точности аппроксимации границ МД $\partial A(t)$. Система (I) заменяется уравнениями в конечных разностях, а время процесса разбивается на интервалы Δt. Решение задачи ищется в классе кусочно-постоянных управлений. Допустимая область управления $u(t,q)$ аппроксимируется конечным набором управлений $u_j=[u_{1(j)},\dots,u_{r(j)}]^T$, $j=1,\dots,\ell_u$ где ℓ_u задаётся в ходе расчётов, исходя из требуемой точности представления допустимых управлений.

На каждом шаге Δt определяются границы МД $\partial A(i\Delta t)\subset R^{2n}$ в ε-окрестности, которые вместе с соответствующими управлениями заносятся во внешнюю память цифровой вычислительной машины (ЦВМ). Разбиение $W(\varepsilon)$ на ряд трубок устанавливает регулярность взаимного расположения и количества точек МД, аппроксимирующих $\partial A(i\Delta t)\subset W(\varepsilon)$ в процессе вычислений. Выбор точки МД, принадлежащей $\partial A(i\Delta t)$ в каждой трубке осуществляется из условия максимума скалярного произведения $(q^i,V)\to\max\limits_{i=1,\dots,K}$, где K – число точек в соответствующей трубке на i-м шаге, V – вектор касательный к заданной траектории в точке заданной траектории, лежащей на $\partial A((i-1)\Delta t)$. Время оптимального процесса T определяется таким образом. На некотором n_0-м шаге вычислений конечная точка w_T впервые принадлежит МД. Тогда $T=n_0\Delta t$. На этом расчёт границ $\partial A(t)$ заканчивается. Далее определяётся оптимальный процесс $w_{опт}(t)$, лежащий на построенных границах $\partial A(i\Delta t)$ и оптимальное управление $u_{опт}(t)$. Для этого используется инфор-

мация о границах $\partial A(i\Delta)$ и соответствующих им управлениях, которая переписывается в оперативную память ЦВМ, а сам процесс рассматривается при уменьшении времени от $T=n_0\Delta t$ до $t=0$. Достоинством данной методики служит возможность решения задач оптимизации с ограничениями на вектор состояния. Точки, не удовлетворяющие допустимой области изменения вектора состояния при вычислениях отбрасываются. Таким образом при увеличении ограничений на вектор состояния объём вычислений уменьшается.

В третьей главе для расчёта оптимального управления электромеханическими системами развита инженерная методика, основанная на совместном использовании операций погружения, декомпозиции, восстановления, нормирования. Применение первых двух операций позволяет добиться понижения размерности исходной системы уравнений. К укороченной системе применяется разработанная операция нормирования переменных в дифференциальных уравнениях, которая позволяет в отличие от традиционной нормировки минимизировать число параметров, а иногда полностью сократить их и упростить форму представления уравнений. При этом также нормируются ограничения. Далее решается более простая, чем исходная, задача оптимального управления для укороченной нормированной системы. Полученное решение, являясь базовым, позволяет, используя коэффициенты пересчёта, определять решение для систем с конкретными параметрами без дополнительных оптимизационных вычислений. На следующем этапе, используя операцию восстановления, находится решение исходной задачи. Погрешность, возникающая за счёт операций упрощения определится из выражения $\Delta I=I-I_y$, где I_y - функционал от решения задачи оптимизации для укороченной системы, I - функционал от решения исходной задачи.

Разработанная методика применена для решения задач оптимального частотного управления исполнительными АД электромеханических систем автоматизированной обработки текстильных материалов с учётом электромагнитных процессов в двигателе. Исходная система уравнений АД с учётом электромагнитных процессов состоит из 5 дифференциальных уравнений и содержит 8 параметров, определяемых типом АД, режимом работы АД и величинами активных сопротивлений, индуктивностей статора и ротора и взаимной индуктивностью обмоток статора и ротора и имеет фазовые ограничения и ограничения на управления. Благодаря этому задача оптимального частотного управления с учётом электромагнитных

процессов оказывается трудноразрешимой даже с привлечением современных вычислительных средств. Поэтому актуальным является упрощение задачи с учётом вносимой при этом погрешности. Используя операции погружения, декомпозиции и нормирования переменных получена укороченная нормированная математическая модель АД, состоящая из 2 уравнений с одним параметром, причём осуществляется учёт переходных электромагнитных процессов.

$$d\rho_r^*/d\tau = \bar{\rho}_s^* \cos\overline{\Delta\varphi} - \rho_r^* \; ; \; d\nu^*/d\tau = \bar{\rho}_s^* \rho_r \sin\overline{\Delta\varphi} - \mu_c \; , \qquad (7)$$

где в качестве переменных выступают нормированные модуль потокосцепления ротора $-\rho_r^*$ и скорость вращения вала АД $-\nu^*$, а в качестве управлений рассматриваются новые управления: угол сдвига между векторами потокосцеплений статора и ротора $-\overline{\Delta\varphi}$ и нормированный модуль потокосцепления статора $-\bar{\rho}_s^*$, на который наложено ограничение $0 \leq \bar{\rho}_s^* \leq 1$. μ_c – приведённый момент сопротивления, являющийся параметром системы (7), τ – нормированное время.

Решение задачи оптимального частотного управления скоростью АД основано на использовании анализа динамики МД и конструкции принципа максимума, которые позволили исключить остающийся параметр μ_c в уравнениях (7) и получить постановку задачи быстродействия в беспараметрической форме. В случае если к АД приложена нагрузка μ_c, то оптимальная траектория может быть получена из оптимальной траектории холостого хода $\rho_{rx}^*(\tau)$, $\nu_x^*(\tau)$ с помощью формул

$$\rho_r^*(\tau) = \rho_{rx}^*(\tau) \quad ; \quad \nu^*(\tau) = \nu_x^*(\tau) - \int_0^\tau \mu_c \, d\tau \, .$$

На рис.I показано получение границы МД (кривая I') и оптимальной траектории (кривая 2') для случая, когда $\mu \neq 0$, используя границу МД (кривая I) и оптимальную траекторию (кривая 2), найденную при $\mu_c = 0$.

Для различных значений τ_T построена номограмма (рис.2), позволяющая оценить значение минимального времени τ_T, которое необходимо для разгона АД до заданного значения ν_x^* или максимальное значение скорости ν_x^*, до которой можно разогнать двигатель за заданное время τ_T и определить оптимальное начальное значение сопряжённой переменной $\psi_{1опт}(0)$. По найденному с помощью номограммы значению τ_T из семейства базовых решений (рис.3), полученных для беспараметрической модели АД, выбираем

требуемое базовое решение. Далее, используя рассчитанные коэффициенты пересчёта и операцию восстановления, находим решение для АД с конкретными параметрами. При этом значительно сокращается объём вычислений за счёт исключения оптимизационных расчётов для каждых конкретных значений параметров двигателей.

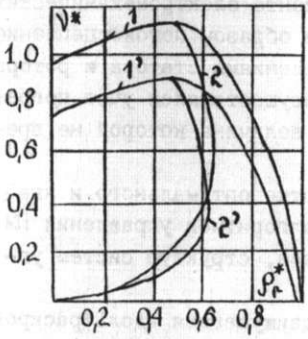

Рис. I

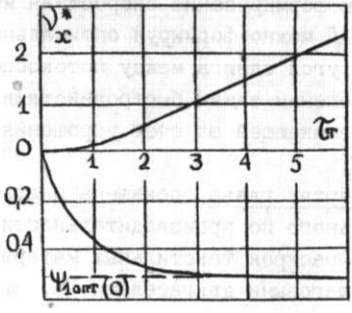

Рис. 2

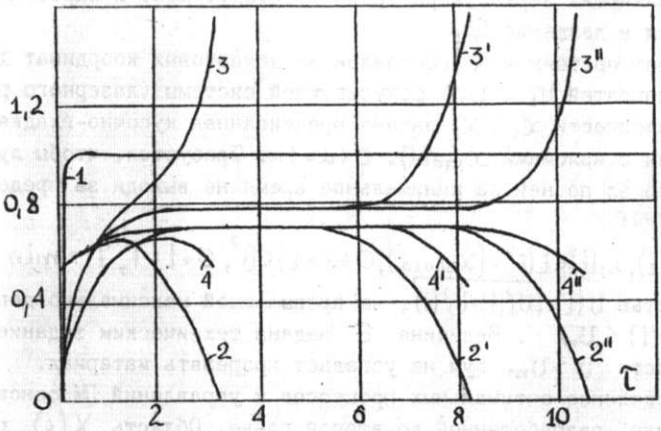

Рис. 3. Семейство базовых решений. Обозначения: I – $\bar{\rho}_s^*$; 2...2" – Ψ_1 ; 3...3" – $\overline{\Delta\varphi}$, рад ; 4...4" – ρ_r^* .

Используя беспараметрическую модель АД решена задача оптимального по быстродействию частотного управления электромаг-

нитным моментом. Решение для электромеханических систем с конкретными АД находится без оптимизационных вычислений, на основе базового решения, использования коэффициентов пересчёта и операции восстановления. Анализ решений задач оптимального частотного управления показал, что обеспечить предельное по быстродействию формирование скорости и момента электромеханических систем с АД можно формируя оптимальным образом потокосцепление статора и угол сдвига между потокосцеплениями статора и ротора АД. При решении задач быстродействия осуществлялся учёт погрешности, возникающей за счёт упрощения, величина которой не превысила $1^{\circ}/_{\circ}$.

Четвёртая глава посвящена разработке оптимального и квазиоптимального по производительности алгоритмов управления ПМ лазерного раскроя текстильных материалов, структур систем управления шаговыми двигателями ПМ.

ПМ состоит из приводного моста, движущегося вдоль раскройного стола и приводной каретки, движущейся вдоль моста и служит для транспортировки лазерного луча от лазерной установки посредством отражающих зеркал к раскройному столу. Мост и каретка приводятся в движение ШД.

Вектор состояния X составлен из декартовых координат x_1, x_2 и скоростей v_1, v_2 фокусирующей системы (лазерного резака). На плоскости x_1, x_2 задана предписанная кусочно-гладкая траектория с изломами $x_{зад}(\alpha)$, $0 \le \alpha \le 1$. Требуется, чтобы луч лазера прошёл по ней за минимальное время не выходя за пределы ε - трубки:

$$x(t)=(x_1(t),x_2(t)) \in L(\varepsilon)=\{x_{зад}(\alpha), 0 \le \alpha \le 1\} \subset R^2, \; 0 \le t \le T, \; T \to \min$$

со скоростью $v(t)=\sqrt{v_1^2(t)+v_2^2(t)}$, не превышающей максимально допустимую: $v(t) \le v_m$. Величина ε задана техническим заданием. При скорости $v > v_m$ луч не успевает прорезать материал.

Определение оптимальных процессов и управлений ПМ основано на методике, разработанной во второй главе. Область $X(\varepsilon)$ разбивается на ряд трубок $L(n_x, n_y)$ в R^4. На плоскости x_1, x_2 ε -окрестность $x_{зад}(\alpha)$ разбивается на M полос, каждой из них присваивается номер, по которому она идентифицируется в ЦВМ.

$$n_x = int(a/\Delta) + M/2 + 1 \; ; \quad n_x = int(a/\Delta) + M/2 \, ,$$

где Δ – ширина полосы, a – проекция точек МД $A(i\Delta t)$ на единичную нормаль вектора, касательного к $x_{3a\partial}(\alpha)$, в точке пересечения её $\partial A((i-1)\Delta t)$. Первая формула используется, когда $a \geq 0$, вторая – когда $a < 0$. Область допустимых скоростей ПМ разбивается на сектора, которым присваиваются номера

$$n_v = 2(v_m/\Delta_1)(n_2-1)+n_1,$$

где $n_1 = int[(v_1-v_m)]/\Delta_1+1$; $n_2 = int[(v_2-v_m)/\Delta_1]+1$, Δ_1 – ширина сектора. Для полученной модели динамики ПМ совместно с уравнениями ШД разработан итерационный алгоритм численного моделирования электромеханических процессов ПМ. Моделирование на ЦВМ и анализ уравнений ПМ позволили для построения границ $\partial A(i\Delta t)$ и определения оптимальных программных траекторий использовать более простую модель

$$dv_1/dt = \rho(u_1-\mu_1 \operatorname{sign} v_1)/J_1;\ dv_2/dt = \rho(u_2-\mu_2 \operatorname{sign} v_2)/J_2;$$

$$dx_1/dt = v_1;\ dx_2/dt = v_2;\ \ u_1 \leq |u_{1m}|;\ u_2 \leq |u_{2m}|,$$

где в качестве управлений u_1, u_2 выступают электромагнитные моменты ШД моста и каретки; ρ – коэффициент, переводящий угловое перемещение в линейное; J_1, J_2, $\mu_1 = f_1(x_2, v_2)$, $\mu_2 = f_2(v_1)$ – моменты инерции и сопротивления, приложенные к валам ШД моста и каретки. Разработан алгоритм и программа, позволяющие, используя рассмотренное разбиение $X(\varepsilon)$, строить границы $\partial A(i\Delta t) \subset R^4$ и определять оптимальные траектории, лежащие на $\partial A(i\Delta t)$ и оптимальные управления. На рис.4 (кривая I) представлена оптимальная траектория при отработке ПМ участка BDE. Видно, что в районе излома траектории ПМ переходит на криволинейную траекторию предельного радиуса, подходящую к верхним границам ε – трубки и проходящую через нижнюю границу $L(\varepsilon)$ в окрестности точки излома. При этом скорости изменения координат лазерного резака v_1, v_2 изображены на рис.5 (кривая I,2), законы изменения управлений – на рис.6. $X(\varepsilon) \subset R^4$ разбивалось на 500 трубок $L(n_x, n_v)$, а $\partial A(t)$ аппроксимировались 500 точками.

Анализ оптимальных процессов позволил установить закономерности оптимальных процессов и разработать более простой для реализации квазиоптимальный алгоритм управления ПМ, аппроксимирующий оптимальные процессы суммой j участков равнопеременного криволинейного движения с учётом требований по точности и скорости перемещения лазерного резака.

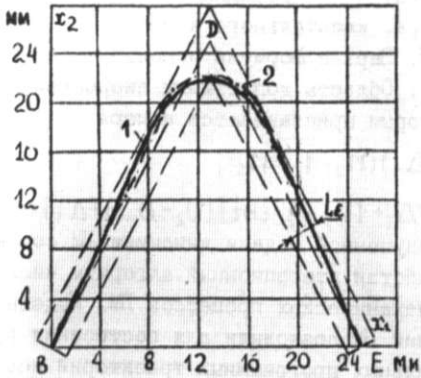

Рис. 4

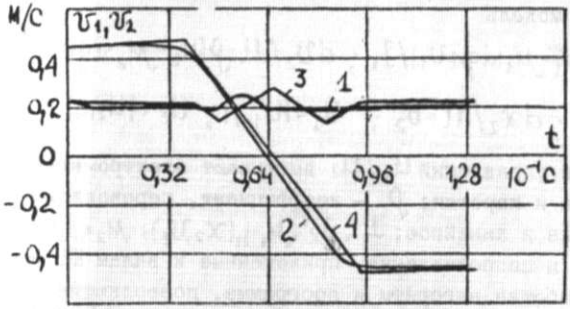

Рис. 5

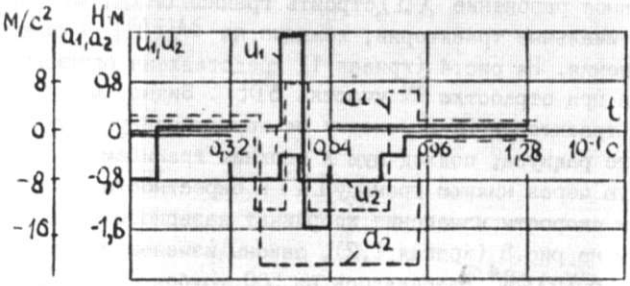

Рис. 6

На рис.4 (кривая 2) представлена квазиоптимальная траектория при отработке BDE, на рис.5 - квазиоптимальные законы изменения $v_1(t)$, $v_2(t)$ (кривые 3,4), на рис.6 - управления u_1, u_2 в качестве которых использованы ускорения из области допустимых ускорений, создаваемых ШД моста и каретки. Увеличение времени квазиоптимальных процессов по сравнению с оптимальными составило

в среднем 2-4 % при построении различных программных траекторий.

Предложены структуры системы управления ШД портального манипулятора с микропроцессорным вычислительным устройством в контуре управления, реализующие полученные законы изменения координат и скоростей. Разработаны алгоритм и программа работы вычислительного устройства. На рис.7 изображена структура канала управления координатой ПМ.

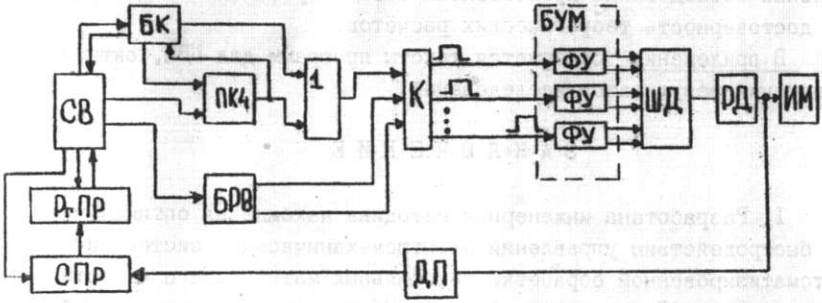

Рис.7

Здесь СВ - специализированный вычислитель, БК - блок контроля, ПКЧ - преобразователь код-частота, БРВ - блок режима вращения, СПР, РгПР - счётчик и регистр текущего положения ротора, К - коммутатор, БУМ - блок усиления мощности, ФУ - фазовые усилители, РД - редуктор, ИМ - исполнительный механизм, ДП - датчик положения.

Траектория отработки представляется в виде отдельных участков, характеризующихся режимом движения ШД (прямой, реверсный), числом шагов, которые необходимо пройти роторам ШД, чтобы отработать данный участок, начальной угловой скоростью на участке, угловым ускорением. Отработка участков происходит последовательно. При управлении ШД, управляющие импульсы на коммутаторы подаются после контроля с частотой не ниже максимальной скорости ШД рассогласования между осями магнитных полей статора и ротора. Алгоритм работы системы управления позволяет корректировать взаимное положение осей магнитных полей статора и ротора, поддерживая его в течение всего времени отработки траектории

в заданных пределах. Это позволяет организовать предельный по быстродействию режим управления без потери шагов и выхода ШД из синхронизма при переменной нагрузке или действии различных возмущений. В тяжёлых динамических режимах (разгон, торможение с большими ускорениями) между осями ротора и статора устанавливается смещение близкое к 90 электрическим градусам и в ШД вводится предельно возможная энергия для преодоления рассогласования между осями за минимальное время. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков и подтвердили достоверность теоретических расчётов.

В приложении содержатся тексты программ для ЦВМ, акты о внедрении результатов исследований.

З А К Л Ю Ч Е Н И Е

I. Разработана инженерная методика нахождения оптимальных по быстродействию управлений электромеханическими системами автоматизированной обработки текстильных материалов с частотно-управляемыми АД на основе динамики МД и совокупности операций погружения, декомпозиции, нормирования переменных, восстановления, позволяющая существенно упрощать задачу поиска оптимальных управлений с оценкой возникающей за счёт упрощений погрешности и с минимизацией числа входящих в постановку задачи параметров.

2. Решены задачи оптимального по быстродействию частотного управления скоростью и электромагнитным моментом исполнительных АД электромеханических систем автоматизированной обработки текстильных материалов с учётом электромагнитных переходных процессов, нелинейностей и фазового ограничения ненасыщенности магнитопровода на основе полученной методики.

3. Получены номограммы, формулы пересчёта, позволяющие определять оптимальное частотное управление скоростью и электромагнитным моментом АД с произвольными параметрами без оптимизационных вычислений с оценкой погрешности от упрощений.

4. Разработана машинно-ориентированная методика построения оптимальных по быстродействию программных траекторий манипуляторов в трубке допустимых отклонений на основе динамики множеств достижимости, с помощью которой получен алгоритм оптимального по производительности управления ПМ лазерного раскроя

текстильных материалов с исполнительными ШД.

5. Анализ результатов численных расчётов позволил установить закономерности оптимальных процессов в ПМ лазерного раскроя и разработать более простой для реализации квазиоптимальный по производительности алгоритм управления ПМ.

6. Разработаны алгоритмы, аппаратные и программные средства для управления исполнительными шаговыми электродвигателями ПМ лазерного раскроя текстильных материалов, реализующие полученные законы управления.

7. Экспериментальное исследование систем микропроцессорного управления шаговыми двигателями ПМ показало соответствие экспериментальных характеристик теоретическим.

Результаты работы использованы при проектировании и разработке портального комплекса лазерного раскроя материалов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Материалы диссертационной работы нашли отражение в 22 опубликованных работах, основными из которых являются:

1. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Метод расчёта оптимального управления на основе уравнения динамики множеств достижимости // Проблемы теоретической кибернетики: Тез. докл. УII Всесоюзн. конф. (Иркутск, 1985). - Иркутск: 1985. - С.84-85.

2. Коваленко В.М., Кудрявцев В.Б., Панасюк А.И., Тихоновецкий С.А., Шмаков М.С. Система управления промышленным роботом для лазерного раскроя текстильных материалов // Опыт создания и пути повышения эффективности функционирования автоматизированных систем управления предприятиями и технологическими процессами: Тез. докл. Республ. науч.-техн. конф. (Гомель, 1985). - Минск: 1985. - С.14-15.

3. Panasjuk A.I., Shmakov M.S. Survey on dynamics of sets in control and its applications // Mathematische Optimierung - Theorie und Anwendungen: 30 Intern. Wiss. Koll. TH. Ilmenau. DDR: 1985. - P.109-112.

4. Шмаков М.С. Расчёт оптимальных по быстродействию регуляторов для нелинейных систем автоматического управления с помощью уравнения динамики множеств достижимости // Автоматические и автоматизированные системы управления: Тез. докл. XXI

Областной науч.-техн. конф. (Пермь, 1985). - Пермь: 1985. - С.17.

5. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Моделирование динамики множеств в задачах оптимального управления и управления при неполной информации // Моделирование - 85. Теория, средства, применение: Тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. конф. (Киев, 1985). - Киев: 1985. - Ч.1. - С.51-52.

6. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Оптимальное частотное управление асинхронным двигателем с учётом электромагнитных процессов в нормированных переменных // Автоматика и вычислительная техника. - Минск. - 1986. - Вып.15. - С.13-15.

7. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Синтез оптимальных по быстродействию систем управления с помощью уравнения множеств достижимости // Изв. вузов СССР. Приборостроение. - 1986. - №11. - С.17-21.

8. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Новые уравнения в частных производных в задачах оптимального управления // X Всесоюзное совещание по проблемам управления: Тез. докл. Всесоюзн. совещания (Алма-Ата, 1986). - М.: 1986. - С.121.

9. Шмаков М.С., Горошко В.И., Тихоновецкий С.А., Панасюк А.И. Автоматизированный лазерный раскрой материалов // Прогрессивные технологические процессы, механизация и автоматизация ручных и трудоёмких работ. Новое в сварке: Тез. докл. научн. техн. конф. (Устинов, 1986). - Устинов: 1986. - С.31.

10. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Множества достижимости для решения задач оптимального управления // Оптимальное управление. Геометрия и анализ: Тез. докл. Всесоюзн. школы (Кемерово, 1986). - Кемерово; 1986. - С.35.

11. Шмаков М.С., КудрявцевВ.Б., Кориткин И.П., Ямпольский Б.И. Применение портального варианта манипулятора с лазерным резаком в гибкой производственной системе раскроя материалов // Автоматизация процессов технической подготовки производства в условиях применения гибких производственных систем: Тез. докл. науч.-техн. конф. (Минск, 1986). - С.104-105.

12. Шмаков М.С., Панасюк А.И. Нормировани дифференциальных уравнений динамики электроприводов систем управления и понижение размерности пространства состояний // Изв. вузов СССР. Электромеханика. - 1987. - №3. - С.109-116.

13. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Алгоритм оптимального частотного управления асинхронным электроприводом с учётом электромагнитных процессов в нормированных переменных // Изв. вузов СССР. Электромеханика. - 1987. - №5. - С.85-92.

14. Шмаков М.С. Преобразование дифференциальных уравнений динамики электроприводов для упрощения решения задач управления// Автоматика и вычислительная техника. - Минск. - 1987. - Вып.16. - С.23-26.

15. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Применение множеств достижимости для оптимального по быстродействию управления манипулятором при отработке заданных траекторий с допустимой погрешностью // Динамика нелинейных процессов управления: Тез. докл. Всесоюзн. семинара (Таллинн, 1987). - М.: 1987. - С.103.

16. Панасюк А.И., Шмаков М.С. Расчёт в нормированных переменных предельного по быстродействию частотного управления скоростью асинхронного электропривода с учётом электромагнитных процессов // Ред. журн. Техническая электродинамика АН УССР. - Киев, 1987. - 13 с.: ил. Библиогр. 7 назв. - Рус. - Деп. в ВИНИТИ 01.06.87, №3860-В87.

17. Шмаков М.С. Оптимизация по производительности режимов работы портального манипулятора при отработке предписанных траекторий в трубке допустимых погрешностей // Автоматика и вычислительная техника. - Минск. - 1988. - Вып.17. - С.25-30.

Шмаков Михаил Сергеевич

ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

05.13.01 - Управление в технических системах
05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и производств (промышленность)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 17.04.89 . АТ 13319, Формат 60x84 1/16
Бумага т. №1 . Офс. печ. Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100. Заказ 261 Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте МРТИ, 220600, Минск, П.Бровки, 6.