

На правах рукописи

Кояин Николай Вадимович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКАНИРУЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ БЕТАТРОННЫХ ТОМОГРАФОВ**

Специальность – 05.09.03

Электротехнические комплексы и системы, включая их
управление и регулирование

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск – 1997

Работа выполнена на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Томского политехнического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Алехин А.Е.

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Удут Л.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лукутин Б.В.;
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Целебровский И.В.

Ведущее предприятие: НПЦ «ПОЛЮС», г. Томск

Защита состоится 18 июня 1997 г. в 15 часов в актовом зале главного корпуса на заседании диссертационного совета К063.80.01 в Томском политехническом университете (634034, г.Томск, пр. Ленина, 30)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан 12 мая 1997 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент

А.Е. Алехин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблемы повышения качества и конкурентоспособности продукции являются одними из основополагающих в современном производстве. Их решение тесно связано с задачей совершенствования методов контроля.

В последние годы разработан и получил практическое применение новый метод неразрушающего контроля - метод вычислительной томографии, позволяющий, не разрушая целостности изделия, воспроизводить сложные картины его пространственных сечений, анализировать их строение, измерять геометрические размеры и относительное расположение элементов структуры, исследовать свойства материалов, документировать результаты контроля в форме, удобной для дальнейшей диагностики. Применение метода вычислительной томографии особенно перспективно в таких отраслях промышленности как космическая, авиационная и оборонная, в атомной энергетике, а также в строительстве и металлургии.

Развитие вычислительной томографии тесным образом связано с разработкой и внедрением автоматизированных комплексов для управления процессом сканирования промышленных томографов на основе применения широкорегулируемых быстродействующих электроприводов с микропроцессорным управлением. Для управления электроприводами механизмов перемещения подвижных элементов сканирующих устройств требуется разработка эффективных алгоритмов, обеспечивающих требуемые режимы функционирования и предельное быстродействие системы с учетом динамических возможностей последней и технологических ограничений.

Перечисленное обуславливает актуальность темы диссертационной работы, которая является частью исследований, выполненных кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок ТПУ совместно с НИИ интроскопии при ТПУ в соответствии с постановлением ГКНТ от 25.09.85 №504 по развитию разработок и организации производства компьютерных томографических систем, а также по заданию 03.06 межвузовской комплексной программы "Оптимум" на создание высокоточных систем следящего электропривода с микропроцессорным управлением.

Цель работы состоит в создании методики проектирования, разработке, исследовании, практической реализации микропроцессорных систем управления сканирующими устройствами промышленных бетатронных томографов.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие основные задачи:

- определение путей реализации общей конструкции сканирующих устройств промышленных томографов и ее отдельных элементов;

- обоснование принципов организации управления технологическим процессом сканирования и способов управления движением механизмов перемещения подвижных элементов сканирующих устройств;
- разработка математического описания микропроцессорных систем управления следящими электроприводами промышленных томографов и программных средств для автоматизации их проектирования;
- разработка, исследование и оптимизация микропроцессорных систем электропривода механизмов перемещения сканирующих устройств;
- синтез оптимальных алгоритмов управления электроприводами механизмов перемещения отдельных координат, обеспечивающих требуемые режимы функционирования и качество регулирования;
- разработка методов и средств автоматизации процесса управления движением многокоординатного электропривода сканирующего устройства;
- практическая реализация и экспериментальные исследования разработанных микропроцессорных систем управления сканирующими устройствами промышленных томографов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы как теоретические, так и экспериментальные методы. Теоретические исследования основаны на современных методах системного анализа, математического моделирования, теории оптимального управления. Использован математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления, численных методов. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях и на действующих комплексах вычислительных томографов.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем;

- обоснованы принципы реализации сканирующих устройств промышленных бетатронных томографов и организации управления технологическим процессом сканирования;
- разработаны математическое описание микропроцессорных систем управления электроприводами сканирующих устройств и методика автоматизированного проектирования разрабатываемых систем;
- предложена методика согласования динамических параметров механизма перемещения и электропривода с параметрами траектории движения, позволяющая осуществить выбор ограничений фазовых координат из условия обеспечения максимального быстродействия;
- разработаны принципы автоматизации процесса управления движением многокоординатного электропривода сканирующего устройства;

- предложена методика синтеза оптимальных траекторий и разработаны алгоритмы управления микропроцессорными электроприводами промышленных томографов в заданных режимах.

Практическая ценность определяется:

- обоснованными конструкциями сканирующих устройств промышленных бетатронных томографов;
- практическими рекомендациями по выбору параметров процесса сканирования, обеспечивающими высокую производительность контроля при заданной чувствительности к дефектам и относительном линейном разрешении;
- прикладным программным обеспечением комплекса автоматизированного анализа и параметрического синтеза, позволяющим сократить сроки и повысить качество проектирования микропроцессорных систем управления сканирующими устройствами;
- разработанными рекомендациями по выбору рациональных структур и параметрической оптимизации микропроцессорных систем электропривода для данного класса механизмов,
- практической реализацией систем микропроцессорного управления электроприводами механизмов перемещения сканирующих устройств промышленных томографов;
- пакетом прикладных программ для автоматизации управления многокоординатным электроприводом сканирующего устройства, а также движением по отдельным координатам, обеспечивающих требуемые режимы работы и заданные качественные показатели.

Реализация результатов работы. Результаты исследований и разработок, проведенных в диссертационной работе, внедрены в НИИ интроскопии Томского политехнического университета при создании комплексов промышленных бетатронных вычислительных томографов, на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок Томского политехнического университета в учебном процессе при изучении специальных дисциплин, а также на Томском лесопромышленном комбинате.

Апробации работы и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на региональной научно-технической конференции "Системы управления подвижными объектами и автоматизация производственных процессов", г.Томск, 1984 г.;
- на научно-технической конференции "Автоматизация в производстве", г.Томск, 1985 г.;
- на научно-технических конференциях "Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления", г.Красноярск, 1985 и 1988 гг.;
- на научно-технической конференции "Электромашинные и машинно-вентильные

источники импульсной мощности", г.Томск, 1986 г.:

- на Всесоюзной научно-технической конференции "Микропроцессорные системы автоматизации технологических комплексов", г.Новосибирск, 1987 г

- на научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства", г.Томск, 1996 г

По результатам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 127 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 83 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разрабатываемой темы. Показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе дан анализ современного состояния и перспектив развития вычислительной томографии. Изложен принцип получения томографического изображения, основанный на послойном поперечном сканировании объекта коллимированным пучком излучения. В зависимости от физических особенностей контролируемого изделия и конструкции сканирующего устройства различают системы со сканированием неподвижного объекта контроля и системы, использующие перемещения контролируемого изделия. Сканирование заключается в последовательных пошаговых или непрерывных перемещениях излучателя 1, коллиматоров и детекторов 2 (рис. 1). В паузах между перемещениями или непосредственно в процессе непрерывного перемещения производится необходимое число измерений интенсивности излучения за объектом 3 для лучей всех возможных ориентации. Полученные значения интенсивности излучения, несущие информацию о его ослаблении при прохождении объекта в каждом положении сканирующего устройства, усиливаются, преобразуются с помощью аналого-цифрового преобразователя и, наряду с позиционными координатами пучков излучения, вводятся в ЭВМ, где программным путем по совокупности измерительных данных осуществляется реконструкция двумерного изображения сечения объекта.

На основе анализа комплекса технико-экономических и эксплуатационных требований к методам неразрушающего контроля, а также современных тенденций развития радиометрического метода контроля показано, что разработку средств данного типа контроля целесообразно вести в рамках второго и третьего поколений промышленных томографов с использованием в качестве источника

высокоэнергетического электромагнитного излучения бетатронов и микропроцессорных быстродействующих широкорегулируемых электроприводов постоянного тока для механизмов перемещения сканирующих устройств.

Основными техническими требованиями, определяющими область применения радиометрического контроля, являются обеспечение чувствительности к дефектам в пределах 1-2% толщины контролируемого изделия, линейного разрешения 0.25% от толщины изделия, а также высокой производительности контроля. В работе получены математические выражения, позволяющие связать производительность контроля с вероятностью обнаружения дефекта, характеристиками изделия и источника излучения. Показано, что одним из основных факторов, определяющих производительность контроля в компьютерной томографии, является время измерения интенсивности излучения, которое в значительной степени определяется такими параметрами как плотность, толщина и вид материала контролируемого изделия, фокусное расстояние, размер выявляемого дефекта и может быть представлено выражением

$$t_{изм} = \frac{1.6 \cdot 10^{-6} \cdot \eta^2 \cdot M^2 \cdot F^2 \cdot E_{эфф} \cdot \gamma_e}{0.11 \cdot \mu_{эфф}^2 \cdot a^2 \cdot S \cdot P_0 \cdot \exp(\mu_{эфф} \cdot H)}, \text{ с,}$$

где η - коэффициент, учитывающий флуктуацию амплитуд импульсов, порождаемых отдельными квантами тормозного излучения;

M - отношение сигнал/шум;

F - фокусное расстояние;

$\mu_{эфф}$ - линейный коэффициент ослабления для материала контролируемого изделия;

a - линейный размер дефекта;

H - толщина контролируемого образца;

S - площадь выходного окна коллиматора;

$E_{эфф}$ - эффективная энергия кванта тормозного излучения, мэВ,

γ_v - линейный коэффициент передачи энергии квантов тормозного излучения в воздухе для эффективной энергии $E_{эфф}$, см⁻¹;

0.11 - энергетический эквивалент 1 Р в воздухе, эрг/см³ · Р;

$1.6 \cdot 10^{-6}$ - энергетический эквивалент 1 мэВ, эрг/мэВ.

P_0 - мощность экспозиционной дозы на расстоянии 1 м от мишени, Р/мин.

В результате проведенных исследований определены оптимальные величины и соотношения перечисленных параметров и даны практические рекомендации по их выбору, позволяющие минимизировать время измерения и тем самым добиться повышения производительности контроля при условии обеспечения требуемой чувствительности и линейного разрешения. В частности, установлено, что при заданных относительной чувствительности, относительном линейном разрешении и энергии тормозного излучения максимальная производительность контроля достигается при толщине контролируемого изделия, определяемой из условия $\mu_{эфф} \cdot H = 4$ (рис. 2).

В общем случае поступательное движение системы излучатель-детектор при сканировании может быть двух видов: непрерывное и пошаговое. Анализ зависимости полного времени сканирования одного слоя от таких факторов, как: время измерения интенсивности излучения, число детекторов, размеры контролируемого образца и дефекта при пошаговом ($T_{ш}$) и непрерывном ($T_{н}$) движении позволил обосновать области их практического применения (рис.3): сканирование непрерывным строчным движением целесообразно при значении времени измерения интенсивности излучения не более 0.2 с (область I), в других случаях целесообразно пошаговое движение (область II).

Проведенные в работе исследования позволили установить следующее:

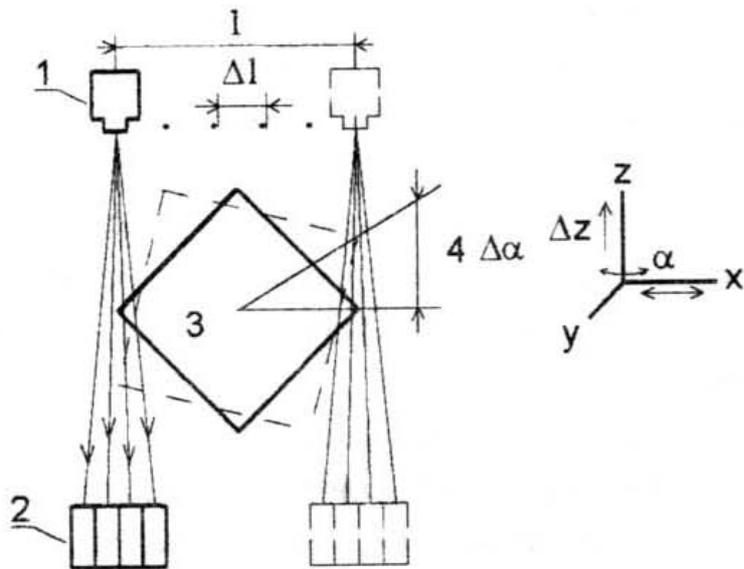
- в режиме непрерывных строчных движений рабочие скорости линейных перемещений, определяемые по выражению

$$V = \frac{0.5 \cdot \Delta \cdot 0.11 \cdot \mu_{эфф}^2 \cdot a^2 \cdot S \cdot P_0 \cdot \exp(\mu_{эфф} \cdot H)}{16 \cdot 10^{-6} \cdot \eta^2 \cdot M^2 \cdot F^2 \cdot E_{эфф} \cdot \gamma_0}, \text{ мм/с},$$

в общем случае малы, их предельные значения (до 10 м/мин) достигаются при очень малом времени измерения и малом числе отсчетов в строке;

- в режиме шаговых строчных движений от электропривода требуется высокое быстродействие: время отработки малых линейных и угловых перемещений не должно превышать 0.1 - 0.2 с;

- для уменьшения общего времени сканирования одного слоя необходимо: уменьшать время измерения, увеличивать число детекторов, увеличивать быстродействие привода в режиме пошагового поступательного строчного движения.



1 - Излучатель; 2 - Детекторы; 3 - Изделие

Рис. 1

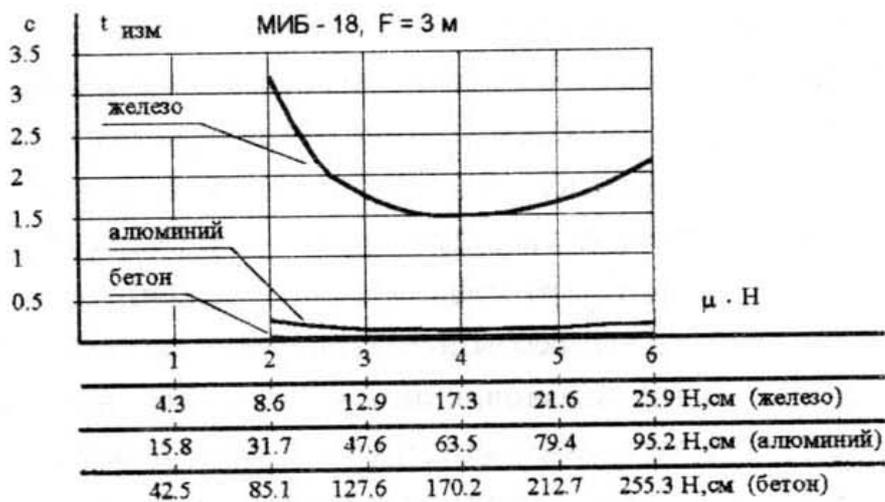


Рис. 2

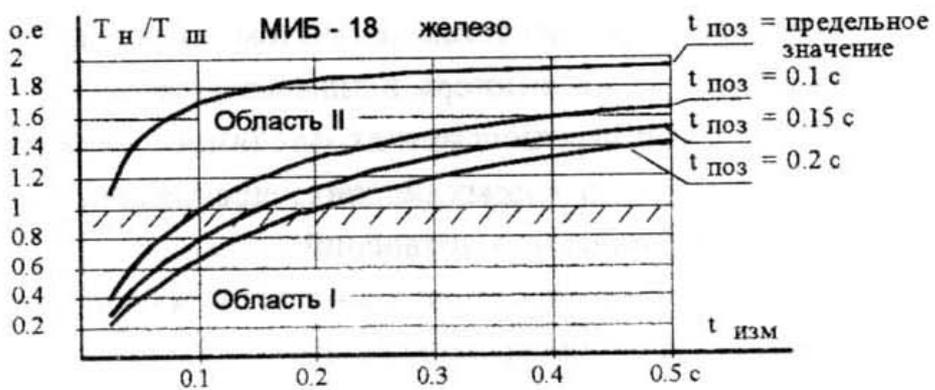


Рис. 3

Приводится описание конструкций и технические характеристики разработанных радиометрических комплексов на основе малогабаритных импульсных бетатронов МИБ-4, МИБ-18 и быстродействующих широкорегулируемых электроприводов постоянного тока с управлением от микро-ЭВМ.

Во второй главе разрабатывается математическое описание микропроцессорных систем электроприводов механизмов перемещения сканирующих устройств, методика и средства автоматизации их проектирования.

Усложнение структуры современных систем следящего электропривода, связанное с введением микро-ЭВМ в контур управления, повышение требований к их качественным характеристикам, необходимость учета технологических факторов и особенностей функционирования промышленных томографов, а также высокая стоимость разрабатываемых устройств обуславливают необходимость проведения детальных исследований таких систем уже на стадии проектирования. Анализ имеющихся подходов показал, что наиболее успешно эта задача может быть решена методом математического моделирования с использованием в качестве методологической основы имитационного подхода.

В соответствии с принципами организации управления сканирующим устройством электроприводы перемещения представляют собой автономные цифро-аналоговые электроприводы, структурная схема которых приведена на рис.4. Непрерывная часть $W_n(p)$ представлена обобщенными структурными схемами электрической и двухмассовой механической систем. Разработано их математическое описание, позволяющее учесть особенности цифровой реализации системы управления, связанные с квантованием сигналов по времени и уровню, такие специфические свойства тиристорных преобразователей как способ управления, дискретность и неполную управляемость. Математическую модель механической части предложено представлять двухмассовой упругой системой с учетом зазоров, кинематических погрешностей, моментов трения и потерь в кинематической цепи. Показано, что анализ и синтез микропроцессорных следящих электроприводов целесообразно основывать на численных методах решения систем нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений.

В основу разработки положен структурно-функциональный и модульный принципы, что придает гибкость программному обеспечению, дает возможность последовательного уточнения первоначального описания, увеличения степени подробности отображения в нем отдельных особенностей объекта. Кроме того при таком подходе появляется возможность расширения программной системы

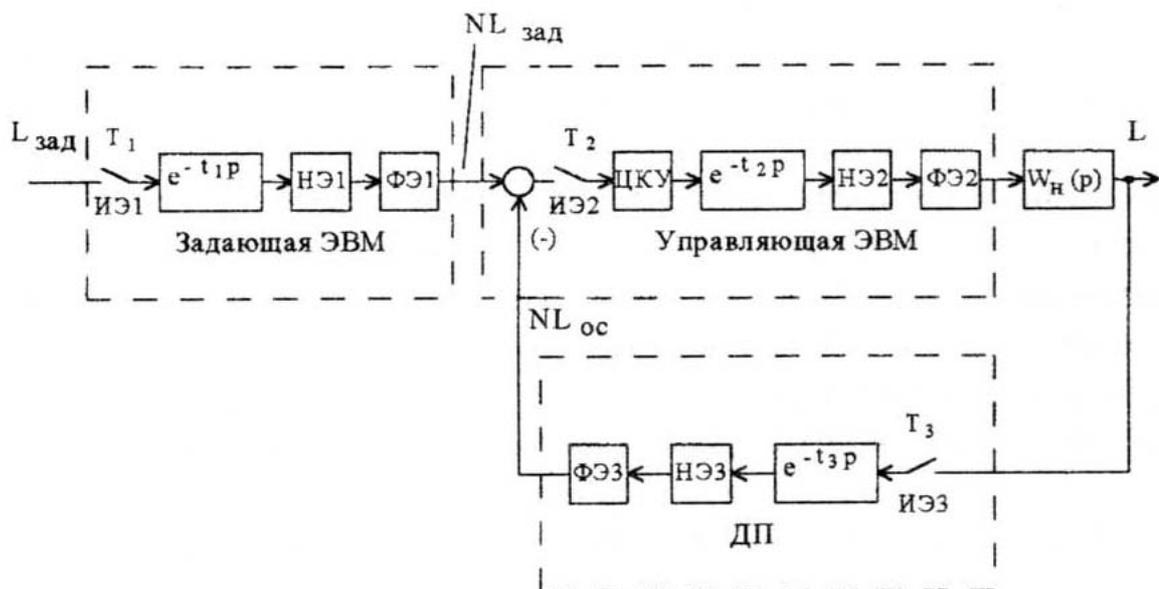


Рис.4 Структурная схема цифроаналогового автономного следящего электропривода сканирующего устройства

и модификации ее отдельных элементов. Разработанные средства автоматизированного анализа и синтеза практически реализованы в виде программной системы, позволяющей решать следующие задачи:

- синтез структур микропроцессорных следящих электроприводов постоянного тока;
- многовариантный анализ полученных на этапе синтеза проектных решений в режиме интерактивного имитационного эксперимента;
- структурно- параметрическую оптимизацию системы;
- отладку алгоритмов и программ управляющей ЭВМ;
- обработку результатов в соответствии с требованиями пользователя.

Пользовательский интерфейс, гибкое информационное сопровождение, включающее справочный материал, возможность создания баз данных позволяют осуществить более качественный подход к реализации проектных процедур. Диалоговая среда выполнена с учетом современных требований к интерактивным программам и написана на языке Pascal 7.0 с использованием возможностей объектно-ориентированного пакета TurboVision 2.0. В качестве инструментального средства используется ПЭВМ типа IBM обычной конфигурации; программное обеспечение может работать как в среде WINDOWS, так и MS DOS.

Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достаточную для практики адекватность разработанной математической модели реальным объектам и высокую степень эффективности предложенных программных средств.

Третья глава посвящена исследованию и оптимизации микропроцессорных следящих систем электроприводов механизмов перемещения сканирующих устройств.

Целью проводимых исследований явилась оценка влияния объекта управления и технологических факторов на качественные показатели системы, разработка рациональных структур микропроцессорных электроприводов с реализацией на базе имеющихся технических средств и выбор оптимальных параметров, обеспечивающих заданные качественные показатели. В результате выполненных исследований установлено, что специфической особенностью следящей системы электропривода промышленного томографа, определяющей значения показателей качества регулирования, являются значительные моменты инерции и механические нагрузки, а также ограниченная жесткость кинематической цепи. В связи с этим с целью исключения возможности автоколебаний рекомендовано паусу пропускания электропривода принимать в $2 \div 3$ раза ниже частоты собственных колебаний механической системы и в целом не превышающей 20 Гц. Для обеспечения высокой точности воспроизведения входного сигнала должны выполняться следующие условия:

- частота входного гармонического сигнала должна быть в 4-5 раз меньше полосы пропускания СЭП,
- частота квантования в контуре положения должна превышать частоту входного гармонического сигнала не менее чем в 40 раз и полосу пропускания не менее чем в 5 раз;
- при использовании цифрового ПИ-регулятора положения период квантования в контуре положения должен быть не менее чем в 20 раз меньше его постоянной времени;
- дискретность датчика положения должна быть не менее 2500 импульсов на оборот (рис. 5);
- разрядность цифро-аналогового преобразователя должна быть не ниже 10-12 (рис.5).

Исследовано влияние места установки датчика положения на точностные показатели электроприводов перемещения томографов, что позволило обосновать выбор места его установки (рис.6) в зависимости от жесткости кинематической цепи, частоты гармонического сигнала на входе СЭП и заданной точности: область I - на механизме, область II - на двигателе.

В целях повышения точности и быстродействия при синтезе микропроцессорных систем управления предлагается использовать принципы инвариантности путем создания систем с комбинированным управлением. Разработана структура цифро-аналоговой комбинированной системы СЭП и алгоритм управления электроприводом, эффективность практической реализации которых в режимах позиционирования при больших и средних перемещениях и движения с постоянной скоростью (рис.7) подтверждается результатами

экспериментальных исследований.

Показано, что задача ограничения динамических нагрузок механической части сканирующих устройств наиболее просто и эффективно может быть решена путем ограничения фазовых координат. Предложена методика согласования динамических параметров механизма перемещения и электропривода с параметрами траектории движения, позволяющая осуществить выбор ограничений фазовых координат из условия обеспечения максимального быстродействия.

В четвертой главе решаются задачи синтеза оптимальных траекторий движения и алгоритмов управления микропроцессорными следящими системами электроприводов сканирующих устройств.

Анализ работы контура положения следящей системы при пошаговом движении показал, что в режиме позиционирования в зависимости от величины заданного перемещения должны быть выделены зоны отработки малых (I), средних (II) и больших перемещений (III), приведенные на рис. 8. Здесь же приведены рассчитанные аналитические зависимости времени отработки, достигаемой скорости и ускорения в функции от заданного перемещения.

В режиме пошаговых строчных движений возможные способы управления электроприводом перемещения сводятся к формированию на входе электропривода:

- скачкообразного значения заданного перемещения $\Delta L_{\text{зад}} = L_{\text{кон}} - L_{\text{нач}}$, ограничение производных (скорости и ускорения) при этом достигается введением ограничений соответствующих параметров электропривода;
- траектории движения вида гармонического воздействия, заданной с учетом ограничений на любое число производных;
- траектории движения $\Delta L_{\text{зад}}(t)$, синтезированной с учетом наложенных допустимых ограничений на конечное число производных (обычно скорости, ускорения и, возможно, рывка), являющейся квазиоптимальной для реальной системы и оптимальной для ее упрощенной модели.

Исследования на имитационных моделях показали, что:

- в зоне малых перемещений позиционирование может быть осуществлено путем подачи скачка задания, при этом оптимальная траектория движения электропривода, обеспечивающая одностороннее вхождение в зону заданной ошибки (10 мкм и 15 мкм для установок с МИБ-4 и МИБ-18 соответственно), формируется при полном использовании динамических возможностей привода;

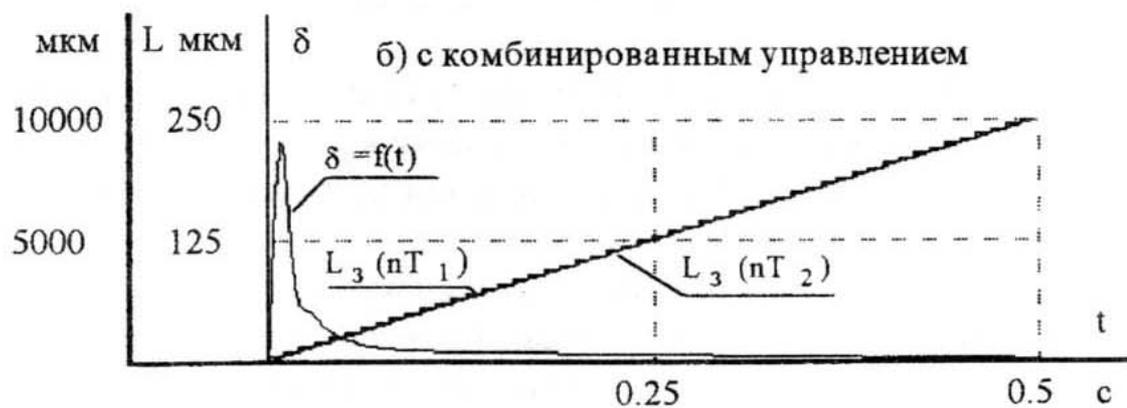
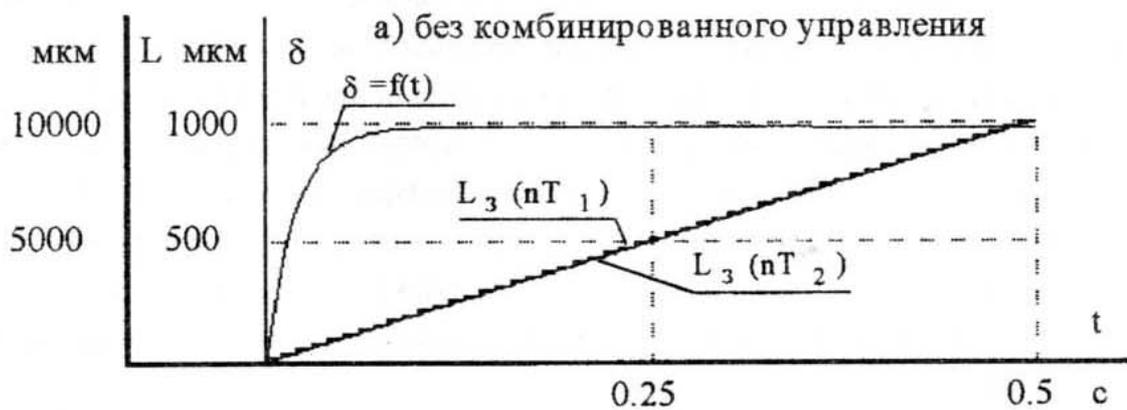
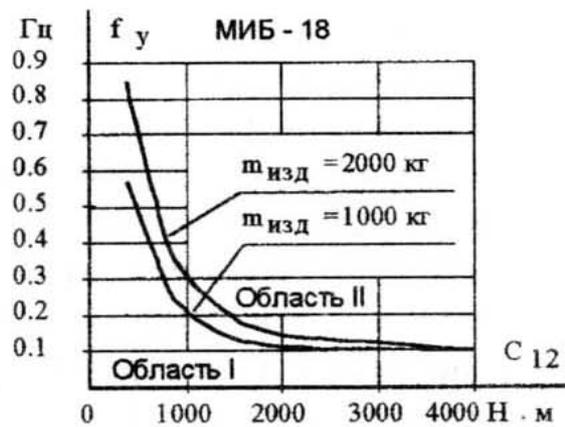
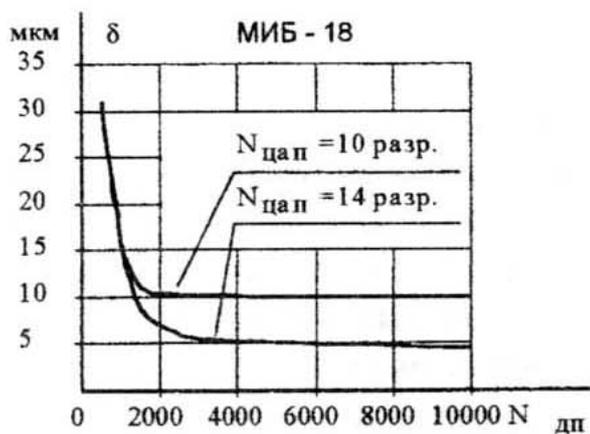


Рис. 7 Результаты имитационного исследования СЭП. Режим движения с постоянной скоростью, $V_m = 40000$ мкм/с.

- при отработке средних и больших перемещений формирование оптимальной траектории движения электропривода, обеспечивающей одностороннее вхождение в зону заданной ошибки, может быть осуществлено только при условии существенного снижения динамических возможностей привода, прежде всего уменьшением допустимого ускорения, и переменного значения коэффициента усиления регулятора положения (кривая 3 рис. 9) или применения параболического регулятора положения (кривая 4). При практической реализации управления вида гармонического воздействия частотная область работы привода (кривая 2) значительно сужается в сравнении с расчетной для предельных значений ограничений (кривая 1), а время отработки заданного перемещения (кривая 5) соответственно увеличивается.

В целом два первых способа организации управления позиционным электроприводом не позволяют в общем случае реализовать его предельные динамические возможности и получить удовлетворительные переходные процессы. Это обстоятельство обуславливает необходимость синтеза оптимальных траекторий позиционирования с учетом предельных значений ограничений на фазовые координаты. Излагается решение задачи синтеза оптимальных по быстродействию траекторий позиционирования и дискретных управлений электроприводом в реальном масштабе времени. Разработан алгоритм управления двухкоординатным электроприводом сканирующего устройства, для обеспечения пошаговых строчных движений вдоль горизонтальной оси и шаговых движений вокруг вертикальной оси. Экспериментальные исследования (рис.10) показали, что разработанные алгоритмы обеспечивают:

- расчет оптимального по быстродействию дискретного управления процессом позиционирования с учетом технологически допустимых ограничений фазовых координат;
- эффективную отработку малых, средних и больших перемещений;
- высокую плавность подхода к заданной точке позиционирования (с точностью ± 1 единица дискретности датчика положения);
- предельные показатели при частоте управления электроприводами 100 Гц: время разгона до максимальной установившейся скорости ($104,7 \text{ с}^{-1}$) - 0,11 с; время торможения с точностью ± 1 дискрета - 0,16 с.

Анализ режима движения с постоянной скоростью позволил установить, что при заданных ограничениях фазовых координат вследствие дискретности управления по времени оказывается возможным достижение электроприводом

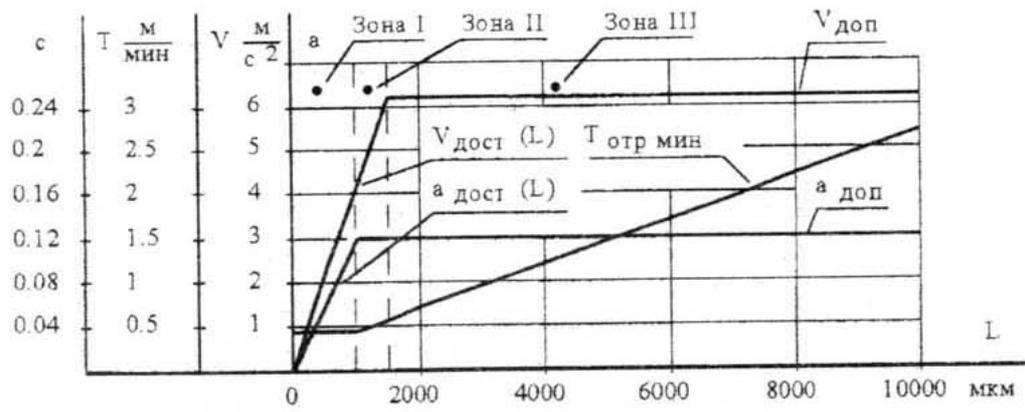


Рис. 8

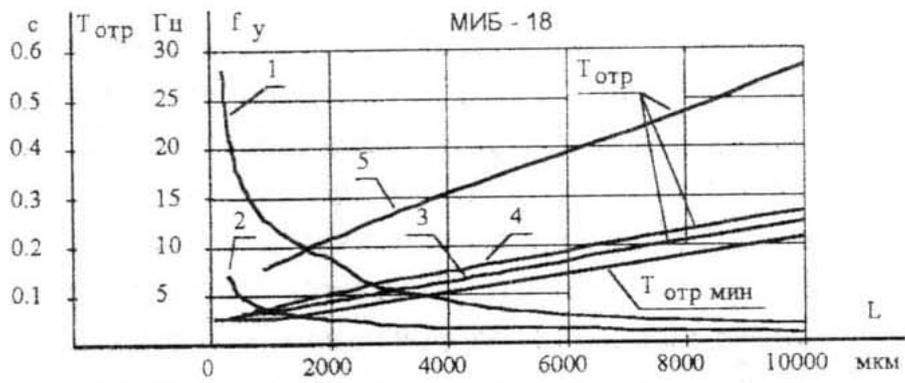


Рис. 9

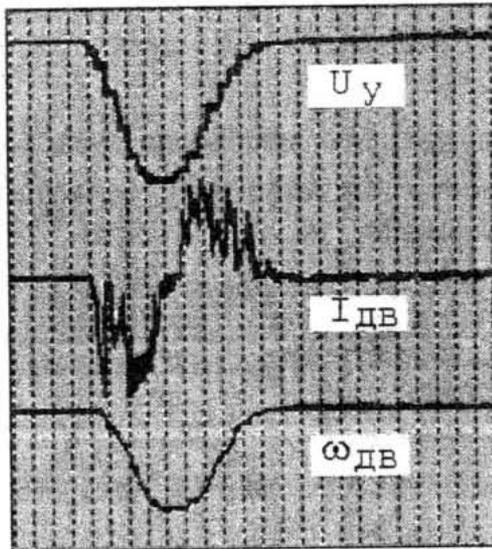


Рис. 10 Отработка перемеще-
ния 2058 мкм

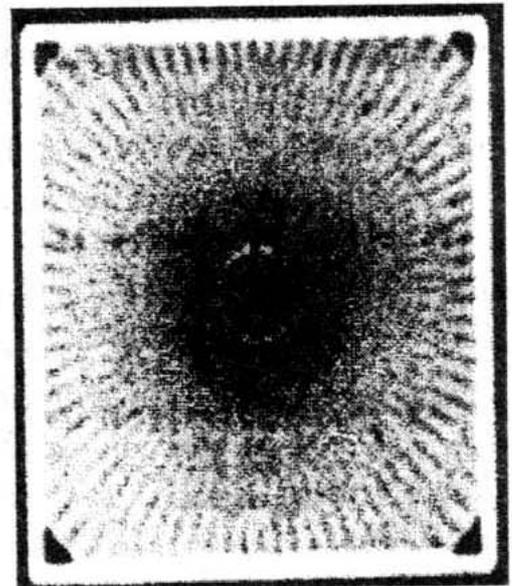


Рис. 11 Томограмма стального образца:

$d_{\text{наруж}} = 100 \text{ мм};$
 $d_{\text{внутр}} = 10 \text{ мм}$

только ограниченного ряда значений установившейся скорости. Для вывода системы на любое значение установившейся скорости при дискретном управлении предложена методика формирования оптимальной траектории, основанная на пересчете предельных значений рывка и ускорения с учетом заданных значений пути, времени и формы траектории и разработан алгоритм ее реализации. Получены аналитические выражения для определения линий переключения и разработан алгоритм формирования траектории выхода системы на заданное значение скорости на основе предельной диаграммы ускорения.

Приводятся результаты экспериментальных исследований, выполненных на разработанном промышленном томографе с источником тормозного излучения - бетатроном МИБ-4. На рис.11 в качестве примера приведена полученная томографическая картина контролируемого образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснован выбор принципов реализации общей конструкции, вариантов построения кинематических цепей линейно - поступательного и кругового вращательного движений сканирующего устройства, типов электроприводов для них. Показано, что разработку средств данного типа контроля целесообразно вести в рамках второго и третьего поколений промышленных томографов с использованием в качестве источников высокоэнергетического электромагнитного излучения бетатронов.

2. Определены оптимальные величины и соотношения параметров процесса сканирования, обеспечивающие максимальную производительность контроля при заданной чувствительности, линейном разрешении, энергии тормозного излучения и даны рекомендации по их выбору. Определены условия практического применения непрерывного и пошагового строчного движения при сканировании исходя из обеспечения заданной чувствительности к дефектам и минимизации времени сканирования.

3. Разработаны математические модели и средства автоматизированного анализа и синтеза микропроцессорных электроприводов механизмов перемещения томографов, практически реализованные в виде программной системы, обеспечивающей сокращение сроков и повышение качества проектирования разрабатываемых устройств. Результатами экспериментальных исследований подтверждена адекватность предложенных математических моделей реальным объектам и высокая степень эффективности созданных программных средств автоматизированного проектирования.

4. Выполнена структурно-параметрическая оптимизация микропроцессорных

систем управления электроприводами сканирующих устройств и даны рекомендации по синтезу структур и выбору параметров, практическая реализация которых обеспечивает высокое быстродействие, статическую и динамическую точность системы в заданных режимах работы.

5. Предложена методика согласования динамических параметров механизма перемещения и электропривода с параметрами траектории движения, позволяющая осуществить выбор ограничений фазовых координат из условия обеспечения максимального быстродействия.

6. Предложена методика синтеза траекторий позиционирования с учетом технологически допустимых ограничений на фазовые координаты, разработаны алгоритмы формирования управлений микропроцессорной следящей системой и на их основе алгоритм управления двухкоординатным электроприводом сканирующего устройства в режиме пошаговых строчных движений, обеспечивающие предельное быстродействие системы с учетом динамических возможностей последней и технологических ограничений.

7. Разработаны алгоритмы формирования оптимальной траектории, обеспечивающие в дискретной системе выход на любое заданное значение установившейся скорости, и алгоритмы управления микропроцессорными электроприводами сканирующих устройств в режиме непрерывных строчных движений.

8. Экспериментальными исследованиями подтверждено, что разработанные в диссертационной работе микропроцессорные системы управления сканирующими устройствами промышленных бетатронных томографов соответствуют поставленным требованиям, обеспечивая необходимые функциональные режимы, высокую надежность и заданные качественные показатели.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Кояин Н.В., Коваленко М.В. Многокоординатный электропривод сканирующего устройства радиометрического комплекса. Тезисы докладов краевой научно-технической конференции "Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления". Красноярск. 1985. С. 15.
2. Кояин КВ. Алгоритмы оптимального управления электроприводом промышленного томографа. Тезисы докладов XV научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства". Томск. 1996, с.162.
3. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Реализация и анализ цифровых комбинированных систем следящего электропривода. - Томск, 1996. - 25с. - Деп. в ВИНТИ 23.05.96, № 1664-В96.

4. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В. Оценка точности цифровых комбинированных систем следящего электропривода. - Томск, 1996, - 17с. - Деп. в ВИНТИ 23.12.96, № 3750-В96.
5. Отчет по НИР: Электропривод сканирующего устройства радиометрического комплекса для контроля железобетонных изделий. Гос.рег. 0184.0035606, инв. 0284.0042561. Томск 1984. 89 с. /Коваленко М.В., Кояин Н.В., Яковенко П.Г., Семенов С.М., Удут Л.С./
- 6 Отчет по НИР: Разработка цифровых моделей и алгоритмов микропроцессорного управления и исследование динамики электроприводов подачи станков и роботов. Гос.рег0184.0056048, инв.№ 0286.0049404. Томск, 1986. 82 с. /Удут Л.С., Коваленко М.В., Кояин Н.В., Мальцева О.П./.
7. Удут Л.С., Коваленко М.В., Яковенко П.Г., Кояин Н.В. Алгоритмы оптимального управления позиционными электроприводами в устройствах ЧПУ класса CNC. В сб.: Оптимизация режимов работы систем электроприводов. Красноярск: КПИ, 1982. с.4.
8. Удут Л.С., Коваленко М.В., Кояин Н.В. Многокоординатный электропривод с числовым программным управлением для сканирующего устройства радиометрического комплекса. Томск. 1984. 30 с. Депонир. в ВИНТИ 1 февр. 1985, № 8ЭТ-85ДЕП.
9. Удут Л.С., Коваленко М.В., Кояин Н.В. Электропривод сканирующего устройства радиометрического комплекса с управлением от микро-ЭВМ. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции "Системы управления подвижными объектами и автоматизация производственных процессов". Томск. 1984. с.66.
10. Удут Л.С., Кояин Н.В., Ломакин П.Л. Электропривод промышленного томографа. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции "Электромашинные и машино-вентильные источники импульсной мощности". Томск. 1986. с.97.
11. Удут Л.С., Кояин Н.В. Автоматизированный электропривод промышленного томографа. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Микропроцессорные системы автоматизации технологических процессов". Новосибирск. 1987. с. 189.
12. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока. - Томск, 1991, - 104 с., ил.