

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.9.048:681.7.064

**АГРАНОВИЧ
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**СИСТЕМА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ ПРИВодОВ
ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Минск, 2007

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: Карпович Святослав Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: Кундас Семен Петрович, доктор технических наук, профессор, ректор учреждения образования «Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова»
Кудин Валентин Валентинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теории механизмов и машин учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

Оппонирующая организация: Государственное научно-производственное объединение точного машиностроения «Планар»

Защита состоится 20 сентября 2007 г. в 16⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.unibel.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Развитие микроэлектроники связано в первую очередь со снижением топологической нормы и увеличением размеров кремниевых пластин. При этом наиболее сложные задачи стоят перед разработчиками оптико-механического и сборочного оборудования, в котором необходимо применение высокودинамичных исполнительных систем перемещений с повышенными характеристиками точности и быстродействия, однако используемый базовый ряд координатных систем перемещений уже не обеспечивает все возрастающие требования к точности и производительности перспективного оборудования. Необходимы новые подходы и решения в этой области. Поэтому разработка и создание систем перемещений для оборудования производства изделий электронной техники с повышенными характеристиками по точностным и динамическим показателям является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по тематике научно-исследовательской группы 3.2 «Мехатроника и микросистемы» в рамках научно-исследовательских работ: «Разработать компьютерную систему контроля печатных плат» (2001-2004 гг., № госрегистрации 20011531) ГНТП «Информационные технологии»; «Разработка алгоритмов для системы управления мотор-колесами мобильных машин и моделирование на их основе характеристик силовых поворотных приводов в среде MATLAB/Simulink» (2005 г., № госрегистрации 20051424) и «Электромагнитный модуль движения привода прямого действия для мобильных машин на основе мотор-колес» (2004 г., № госрегистрации 20042078) ГППИ «Новые компоненты в машиностроении»; «Исследование кинематики, динамики и разработка алгоритмов управления для прецизионных многокоординатных систем оборудования электронного машиностроения, построенных путем композиции двухкоординатных планарных позиционеров» (2005 г., № госрегистрации 20051425) ГПОФИ «Механика»; «Построение программных движений планарных позиционеров для оборудования производства электронной техники» (2004-2006 гг., № госрегистрации 20042523) по договору с БРФФИ; «Разработка математических моделей для исследования электрических машин и их компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink» (2006-2008 гг., № госрегистрации 20066758) по заданию 1.07 ГКПНИ «Механика»; «Математическое и компьютерное моделирование голономных

автоматических систем» (2006-2010 гг., № госрегистрации 20066755) по заданию 1.30 ГКПНИ «Механика».

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке системы прецизионных пространственных перемещений с шестью степенями свободы на трех планарных позиционерах как механо-аппаратно-программного комплекса для реализации сложных программируемых движений в оборудовании производства изделий электронной техники.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- анализ возможностей построения системы прецизионных пространственных перемещений для современного оборудования производства изделий электронной техники на основе механизмов параллельной кинематики и планарных приводов прямого действия;
- исследование структуры и кинематики предложенного в работе манипуляционного механизма на основе объединения трех планарных позиционеров и группы Ассура 3-го класса. Постановка и решение прямой и обратной задач кинематики;
- разработка математической и компьютерной моделей в среде MATLAB для исполнительного планарного привода прямого действия (ПППД) и его локальной системы управления;
- выбор и обоснование алгоритма регулирования для реализации адаптивного управления ПППД в режиме реального времени;
- разработка иерархической структуры системы управления системой перемещений на трех планарных позиционерах, оснащенных датчиками Холла, с программным согласованием их движения по алгоритмам, основанным на методах голономных автоматических систем;
- разработка системы перемещений на основе трех планарных позиционеров как механо-аппаратно-программного комплекса с многоуровневой системой управления, результаты моделирования которой в среде MATLAB/Simulink позволяют непосредственно из нее формировать программный код для управляющего контроллера;
- анализ и разработка рекомендаций по встраиванию разработанной системы перемещений в оптико-механическое, контрольно-измерительное и сборочное оборудование микроэлектроники.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение решения прямой и обратной задач кинематики исполнительного манипуляционного механизма системы прецизионных пространственных

перемещений, построенной на основе трех планарных приводов прямого действия, позволившие в среде MATLAB в режиме реального времени формировать необходимые кинематические параметры для микропроцессорной системы управления.

2. Компьютерная модель локальной системы управления планарным приводом с верификацией ее в среде MATLAB, отличающаяся возможностью имитационного моделирования программируемых движений в режиме замкнутого управления с регулированием по положению и скорости по параметрическим алгоритмам в пространстве состояний, позволяющая осуществлять на базе инструментариев MATLAB Real-Time Windows Target и xPC Target автоматическую генерацию исполняемого кода из программной среды разработки в программу управления.

3. Постановка и решение задачи построения параметрических программируемых движений по кривым и поверхностям второго порядка и разработанное программное обеспечение их компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink, созданное на основе методов голономных автоматических систем с возможностью управления траекторией и скоростью движения рабочей точки.

4. Система прецизионных пространственных перемещений для автоматизированного оборудования производства изделий микроэлектроники на основе ПППД, оснащенных датчиками Холла, представляющая собой механо-аппаратно-программный комплекс с системой управления на базе процессора серии TMS 320, реализующего алгоритмы регулирования на адаптивном ПИД-регуляторе, построенном по адекватной верифицированной компьютерной модели ПППД, обеспечивающая прецизионные программируемые перемещения с точностью 1 мкм, скоростью 1 м/с, ускорением 20 м/с².

Личный вклад соискателя

В диссертации представлены результаты работ, которые были выполнены автором самостоятельно и в соавторстве. Автор разрабатывал математические и компьютерные модели и методики исследований, проводил расчеты и эксперименты, осуществлял обработку, анализ и обобщение полученных результатов. Определение структуры, целей и задач теоретической и экспериментальной частей работы, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводилось совместно с научным руководителем д.т.н., проф. С.Е. Карповичем. Интерпретация и обобщение полученных результатов на оптико-механическое автоматизированное оборудование микроэлектроники выполнялось совместно с к.т.н. С.М. Аваковым. В работах [3–6, 11–13, 16, 20, 21] опубликованы результаты,

полученные совместно с Д. Азентани. В остальных работах, написанных автором совместно, соавторы принимали участие в обосновании подходов к решению поставленных задач, частично выполняли программную реализацию алгоритмов и экспериментальные исследования.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: II Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Нарочь, Беларусь, 2004 г.); Международная научно-методическая конференция «Высшее техническое образование: проблемы и пути развития» (Минск, Беларусь, 2004 г.); III Международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2004 г.); VI, VII и VIII Республиканские научные конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, Беларусь, 2003, 2004, 2005 гг.); II Международная научно-техническая конференция «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология» (Минск, Беларусь, 2004 г.), XXI научно-техническая конференция аспирантов и студентов БГУИР (Минск, Беларусь, 2005 г.), VI, VII и VIII Международные школы-семинары аспирантов и студентов «Современные информационные технологии», (Браслав, Беларусь, 2003, 2004, 2005 гг.), 48th, 49th, 50th и 51th International Scientific Colloquiums of Ilmenau Technical University (Ильменау, Германия, 2003, 2004, 2005, 2006 гг.).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 22 работы. В их числе 8 статей в научных журналах, 4 статьи в сборниках научных трудов, 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 4 тезиса докладов. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составляет 3 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. В первой главе проведен анализ систем перемещений для оптико-механического, контрольно-измерительного и сборочного оборудования производства изделий микроэлектроники. Во второй главе описаны разработанные вычислительные алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики предложенного манипуляционного механизма с шестью степенями свободы. Третья глава содержит описание математической и компьютерной моделей планарного позиционера,

результаты компьютерного моделирования и верификации. В четвертой главе описана иерархическая структура системы управления. В пятой главе показаны разработанные на базе голономных автоматических систем алгоритмы построения программируемых движений. В шестой главе приведена разработанная система перемещений с шестью степенями свободы, а также даны рекомендации по практическому использованию разработанной системы в оборудовании производства изделий микроэлектроники. Общий объем диссертации составляет 175 страниц. Она включает 92 страницы машинописного текста, 83 рисунка на 51 странице, 4 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 111 наименований на 9 страницах, список собственных публикаций автора из 22 наименований на 3 страницах и 5 приложений на 18 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы определено основное направление, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ систем перемещений оборудования производства изделий микроэлектроники, который показал, что в оптико-механическом и сборочном оборудовании широко применяются координатные системы на приводах прямого действия в базовом исполнении с одной и двумя степенями свободы, а также их конструктивные объединения для получения систем перемещений с тремя и четырьмя степенями свободы. Дальнейшее последовательное конструктивное сочетание базовых модулей в одном многокоординатном исполнительном приводе приводит к потере жесткости, снижению точности и динамических показателей. В связи с этим в системах перемещений и позиционирования оптико-механического оборудования, такого как генераторы изображений, степеры, установки автоматического контроля топологии, в котором требуется реализовать относительное перемещение объекта обработки и инструмента с максимально возможным числом степеней свободы, равным шести, используется параллельное сочетание независимых автономных координатных систем для инструмента и объекта обработки. Ограниченные возможности используемого типа базовых модулей, а также необходимость обеспечения требуемой высокой мобильности и высокой манипуляционной способности приводят к использованию координатных систем с кинематической избыточностью. Но увеличение числа степеней подвижности приводит к увеличению числа исполнительных приводов, к

необходимости наряду с программным управлением каждым из приводов осуществлять программное их согласование для выполнения конкретной технологической операции. Возникающие при этом технические проблемы по синхронизации управления, по снижению виброактивности, уменьшению габаритов и массы оборудования ограничивают возможность использования их в перспективном оборудовании с топологическими нормами менее 0,25 мкм.

В работе также рассматривался в качестве прототипа наиболее современный вариант построения системы пространственных перемещений на основе параллельных механизмов, используемый в настоящее время в специальных станках с ЧПУ, а также в контрольно-измерительных установках различного назначения.

Проведенный анализ показал, что наиболее полно этим требованиям отвечает исполнительный механизм пространственных перемещений на основе трех планарных позиционеров, идея которого была предложена еще в 1986 г. С.Е. Карповичем, но создание пространственной системы перемещений на его основе стало возможным лишь теперь благодаря достижениям микропроцессорной техники и прикладных информационных технологий. В этой связи в настоящей работе и была поставлена цель и сформулированы задачи по разработке и исследованию системы пространственных перемещений с шестью степенями свободы на базе предложенного механизма для перспективного прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования производства изделий микроэлектроники.

Во второй главе представлены результаты исследования структуры и кинематики выбранного в качестве объекта исследований исполнительного манипуляционного механизма, который на рисунке 1 показан в составе общей структуры разрабатываемой системы пространственных перемещений.

Особенность структуры рассматриваемого механизма с точки зрения теории механизмов и машин состоит в том, что она содержит: три ведущих звена 1, 2, 3, представляющих собой планарные линейные шаговые двигатели (ПЛШД) с числом степеней свободы каждого равным двум и обеспечивающих при этом в системе перемещений шесть независимых входных обобщенных координат; группу Ассур третьего класса из звеньев 4, 5, 6, 7, которая, будучи присоединенной к ведущим звеньям 1, 2, 3, не изменяет их суммарного числа степеней свободы, но позволяет в общем случае осуществить преобразование шести независимых попарно ортогональных перемещений трех планарных позиционеров в сложное пространственное перемещение с шестью степенями свободы рабочей площадки 7. Линейные координаты x_p, y_p, z_p начала системы координат P рабочей площадки и угловые

параметры ориентации площадки, задаваемые углами Эйлера $\varphi_p, \theta_p, \psi_p$, позволяют формировать матрицу четвертого порядка положения и ориентации площадки в отсчетной неподвижной системе координат статора.



Рисунок 1 – Структура системы перемещений с шестью степенями свободы

Постановка и решение прямой и обратной задач кинематики основывались на уравнениях голономных стационарных связей, определяющих общую конфигурацию исполнительного механизма через точечное его представление в физическом пространстве R^3 . Окончательно было получено девять базовых уравнений, система из которых была принята в качестве математической модели для вычисления искомых переменных параметров в прямой и обратной задачах. Система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 (x_{R1} - x_D)^2 + (y_{R1} - y_D)^2 + (z_{R1} - z_D)^2 &= l^2, \\
 (x_{R2} - x_E)^2 + (y_{R2} - y_E)^2 + (z_{R2} - z_E)^2 &= l^2, \\
 (x_{R3} - x_F)^2 + (y_{R3} - y_F)^2 + (z_{R3} - z_F)^2 &= l^2, \\
 (x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2 &= a^2, \\
 (x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C - z_B)^2 &= a^2, \\
 (x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 + (z_C - z_A)^2 &= a^2, \\
 (x_{R1} - x_D) \cdot (x_B - x_A) + (y_{R1} - y_D) \cdot (y_B - y_A) + (z_{R1} - z_D) \cdot (z_B - z_A) &= 0, \\
 (x_{R2} - x_E) \cdot (x_C - x_B) + (y_{R2} - y_E) \cdot (y_C - y_B) + (z_{R2} - z_E) \cdot (z_C - z_B) &= 0, \\
 (x_{R3} - x_F) \cdot (x_A - x_C) + (y_{R3} - y_F) \cdot (y_A - y_C) + (z_{R3} - z_F) \cdot (z_A - z_C) &= 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где переменные x, y, z с соответствующими индексами определяют текущие значения координат точек, поименованных в индексе;

l – длины «ног» DR_1, ER_2, FR_3 манипуляционного механизма;

a – длина стороны равносторонней треугольной площадки, $AB = BC = CA = a$.

Для полного описания конфигурации исполнительного механизма в работе были выбраны необходимые системы координат на каждом подвижном звене. В результате полное описание топологии и конфигурации механизма сводится к матричному заданию взаимного расположения подвижных систем координат на его звеньях, а также к матричному описанию положения всех характерных точек через полученные матричные преобразования с учетом геометрических и кинематических параметров механизма.

При решении прямой задачи кинематики задаваемыми являются координаты точек R_1, R_2, R_3 на соответствующих планарных позиционерах, а определяемыми – координаты точек рабочей площадки A, B, C , по которым затем вычисляется матрица четвертого порядка положения и ориентации системы координат площадки 7. При решении обратной задачи кинематики задаваемыми являются параметры $x_p, y_p, z_p, \varphi_p, \theta_p, \psi_p$, определяющие матрицу четвертого порядка положения и ориентации площадки 7, по которым пересчитываются координаты точек A, B, C , а затем из системы уравнений (1) определяются координаты точек R_1, R_2, R_3 позиционеров. Решение системы (1) в прямой и обратной задачах осуществляется с помощью соответствующего вычислительного инструментария программной среды MATLAB. Разработанные программы решения прямой и обратной задач позволяют проводить в среде MATLAB полный комплекс исследований кинематики рассматриваемого механизма в интерактивном режиме с необходимой визуализацией, давая возможность разработчику системы перемещений осуществлять кинематический анализ и исследование рабочего пространства по характеристикам скорости, ускорения и точности.

Для использования в программном обеспечении контроллера системы управления в диссертации предложен аналитический алгоритм решения обратной задачи с явным разрешением искомым параметров при выбранной конфигурации системы перемещений.

В третьей главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке адекватных математической и компьютерной моделей планарного позиционера, позволяющих в режиме реального времени осуществлять настройку пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) системы управления. Математическая модель планарного позиционера была разработана и верифицирована в совместных работах автора с Д. Азентани.

В основу разработанных моделей было заложено детальное описание физических процессов, протекающих в линейном шаговом двигателе (ЛШД). При этом были учтены основные нелинейности преобразования энергии, включая насыщение магнитной цепи и гистерезис. Математическая модель

ЛШД состоит из трех подсистем: электрической, магнитной и механической. В результате их объединения в одну систему была получена математическая модель ЛШД в пространстве состояний в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка относительно обобщенной координаты перемещения. Компьютерная модель ЛШД, построенная на базе математической модели, разработанная в среде MATLAB/Simulink, является блочно-модульной и состоит из следующих вычислительных блоков: блок генерации магнитных потоков Φ ; блок расчета магнитных сопротивлений R ; блок расчета тягового усилия по координатам; блок вычисления параметров регулятора.

Для проверки адекватности компьютерной модели реальному объекту была проведена верификация модели с использованием инструментария MATLAB System Identification Toolbox. Для осуществления верификации были построены передаточные функции, основанные на результатах компьютерного моделирования и экспериментальных исследований ППД как объекта управления.

Теоретическая передаточная функция была получена средствами MATLAB по результатам моделирования переходных процессов движения ППД при различных начальных условиях.

Для получения экспериментальной передаточной функции использовались задаваемые сигналы управляющих токов фаз и снимаемые сигналы с датчиков обратной связи, которые в виде числовых массивов, полученных с контроллера системы управления при различных ступенчатых и гармонических управляющих воздействиях, анализировались с помощью программы, разработанной на основе инструментария MATLAB System Identification Toolbox.

В результате проведенных исследований в работе была обоснована аналитическая структура передаточной функции ЛШД в следующем виде:

$$G(s) = \frac{K_1(t)s + K_2(t)}{s^2(t) + K_3(t)s + K_4(t)}, \quad (2)$$

где $K_1(t) \dots K_4(t)$ – коэффициенты передаточной функции, полученные по результатам верификации;

s – комплексный аргумент передаточной функции.

Использование подходов аппаратно-программного моделирования и верификации позволили реализовать в работе адаптивный ПИД-регулятор, в котором параметры K_{np} , K_u , K_d , $G_{\phi\phi}$ соответственно пропорционального, интегрального, дифференциального и упреждающего каналов корректируются в режиме реального времени как функциональные исходя из уточненной экспериментальной передаточной функции, получаемой в результате

верификации. Для этого в режиме реального времени производится сбор информации, поступающей с датчиков обратной связи и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), после чего с использованием методов ARX и PEM, реализованных в MATLAB, строятся передаточные функции по каждой из ортогональных координат ПППД, на основании которых определяются параметры ПИД-регуляторов.

Таким образом, на основе предложенной структуры системы управления с адаптивным ПИД-регулятором (рисунок 2) передаточная функция системы управления одной координатой ПППД окончательно будет иметь вид:

$$G_{cy}(s) = \frac{\left(K_{np} + \frac{K_u}{s} + K_{\partial}s \right) \left(G_{ум}(s)G_{лшд}(s) \right) + G_{\phi\phi}(s)G_{ум}(s)G_{лшд}(s)}{1 + \left(K_{np} + \frac{K_u}{s} + K_{\partial}s \right) G_{ум}(s)G_{лшд}(s)G_{\partial}(s)}, \quad (3)$$

где K_{np} , K_u , K_{∂} , $G_{\phi\phi}(s)$ – параметры пропорционального, интегрального, дифференциального и упрещающего каналов ПИД-регулятора соответственно;

$G_{ум}(s)$, $G_{лшд}(s)$, $G_{\partial}(s)$ – передаточные функции усилителя мощности, ЛШД, датчика Холла соответственно.

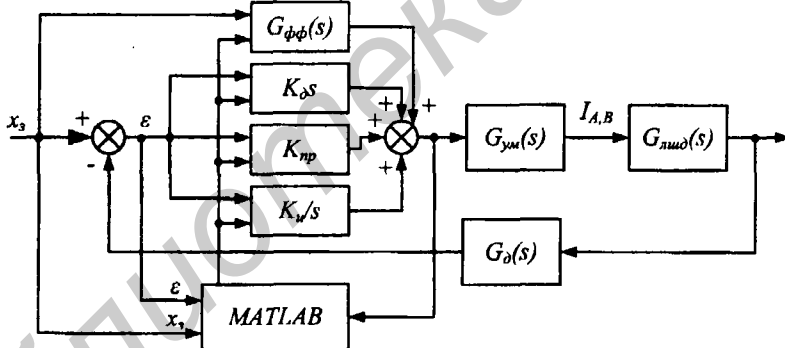


Рисунок 2 – Структура системы управления с адаптивным ПИД-регулятором

На основе полученной передаточной функции (3) была разработана программа определения оптимальных параметров ПИД-регулятора, которая позволила увеличить быстродействие системы в 1,3...1,7 раз по сравнению с аналогичными системами без адаптивного управления.

Четвертая глава посвящена разработке иерархической многоуровневой структуры системы управления для предложенной системы перемещений с шестью степенями свободы. Система управления рассматривается как многоуровневая структура, в которой каждый из уровней обладает своим входным и выходным интерфейсами.

В диссертации проведен анализ разомкнутых и замкнутых структур, используемых при управлении ЛШД. Рассматривались структуры без обратных связей (ОС), с ОС на базе датчиков Холла, без ОС с коррекцией годографа токовых состояний и квазизамкнутого управления. Показано, что системы, построенные на базе квазизамкнутого управления, и системы с обратной связью на датчиках Холла обладают близкими характеристиками точности и быстродействия (точность не хуже $\pm 2 \dots \pm 5$ мкм, максимальная скорость $1 \dots 1,5$ м/с, ускорение $25 \dots 30$ м/с²), однако реализация квазизамкнутого управления требует существенного изменения аппаратно-программной конфигурации ПППД, реализации в режиме реального времени вычислительной процедуры измерения индуктивности в рабочем зазоре и формирования по ее результатам управляющих токов, что технически затруднительно и дорого для использования в серийных системах перемещений. Поэтому, учитывая сравнительную простоту и надежность, более низкую стоимость ПППД на датчиках Холла, имеющиеся наработки по выделению полезного сигнала датчика Холла за основу разрабатываемой системы перемещений была выбрана конфигурация исполнительного планарного привода с датчиками Холла по каждой координате и управлением на основе разработанного адаптивного ПИД-регулятора. Структура разработанной системы управления, представленная на рисунке 3, построена на основе программируемого контроллера LSMC-x предприятия «Рухсервомотор».

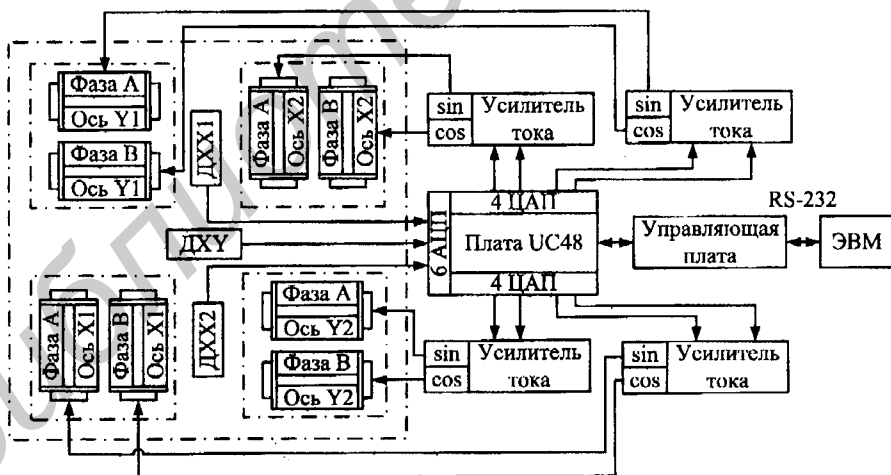


Рисунок 3 – Структура замкнутой системы управления планарным позиционером

Как видно из рисунка 3, контроллер соединен с персональным компьютером посредством интерфейса RS-232, через который производится пересылка команд от компьютера и получение информации от контроллера, при этом управляющая плата контроллера на базе процессора серии TMS 320 осуществляет управление отдельным планарным позиционером через плату UC48, в состав которой входит 8 ЦАП, управляющих усилителями, и 6 АЦП, используемых для подключения датчиков Холла ДХХ1, ДХХ2, ДХУ. Разработанная структура замкнутой системы управления была реализована на предприятии «Рухсервомотор» в системе перемещений тестера печатных плат, обеспечив повышение точности и быстродействия в среднем в 1,5 раза.

В пятой главе рассмотрены модели и алгоритмы построения программируемых движений для разработанной системы перемещений, основанные на методах голономных автоматических систем, предложенных М.Б. Игнатьевым, в которых программа движений представляется в параметрическом виде и является конечным интегралом исходной системы дифференциальных уравнений. В диссертации на основании метода параметрического синтеза дифференциальных анализаторов были разработаны структуры с реализацией в MATLAB/Simulink, которые позволяют решать задачи по построению программируемых движений в виде траекторий с задаваемым профилем контурной скорости, лежащих на поверхностях второго порядка. В качестве примера на рисунке 4 представлена одна из реализованных в среде MATLAB типовых вычислительных структур.

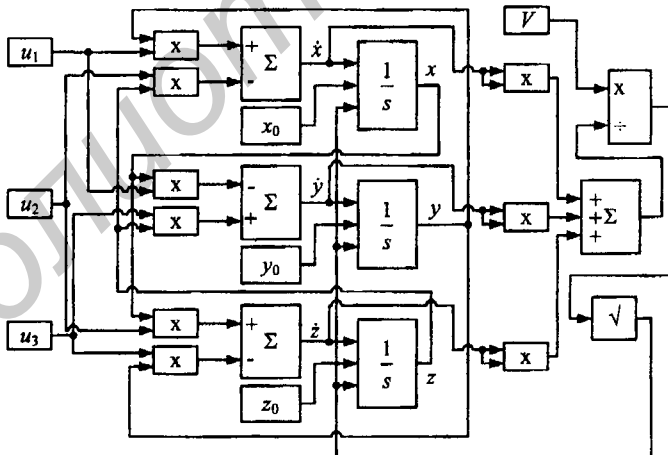


Рисунок 4 – Вычислительная структура формирования программируемых движений на сферической поверхности

Она обеспечивает формирование программируемых движений воспроизводящей точки исполнительного механизма на сферической поверхности с постоянной контурной скоростью V на траектории. В вычислительной структуре x_0, y_0, z_0 – начальные координаты положения точки P платформы 7 (рисунок 1); x, y, z – текущие координаты точки P , зависящие от времени; u_1, u_2, u_3 – управляющие функции, задающие программируемое движение на рассматриваемой поверхности.

Реализация алгоритмов формирования траекторий, лежащих на поверхностях второго порядка, в MATLAB/Simulink позволила впоследствии использовать подход аппаратно-программного моделирования, который, помимо объединения среды разработки и среды моделирования (MATLAB), дает возможность автоматически формировать исполняемый код для контроллера системы управления.

В шестой главе представлена система перемещений с шестью степенями свободы на базе трех планарных приводов прямого действия (рисунок 1), разработанная с учетом результатов, полученных в диссертации. Она состоит из исполнительного пространственного механизма, рабочая площадка которого получает программируемые движения в зависимости от перемещений трех планарных позиционеров. Система управления программируемыми движениями рабочей площадки построена на управляющей контроллерной плате на базе процессора серии TMS 320 фирмы Texas Instruments, программируемом в среде MATLAB и CNC платы UC48 непосредственного управления каждым планарным позиционером. Программирование системы управления осуществлялось по разработанной компьютерной модели и результатам экспериментальных исследований, представленных в диссертации, посредством формирования адаптивной передаточной функции ПИД-регулятора. Использование подхода аппаратно-программного моделирования дало возможность проводить углубленное компьютерное моделирование разрабатываемой системы при различных условиях и по его результатам автоматически программировать контроллер из программной среды MATLAB.

Реализация в системе управления разработанных алгоритмов построения программируемых движений на основе методов голономных автоматических систем и адаптивного ПИД-регулятора с верификацией его параметров в режиме реального времени позволила создать систему перемещений с обратными связями на датчиках Холла для реализации сложных программируемых пространственных движений с характеристиками точности 1 мкм, скорости 1 м/с и ускорения 20 м/с².

В диссертации на примере генератора изображений ЭМ-5109, производимого на ГНПО ТМ «Планар», проанализировано встраивание

разработанной системы перемещений в оптико-механическое оборудование, в результате которого обеспечиваются несомненные преимущества, связанные с объединением в единую систему пространственных перемещений координатной системы перемещений по x и y , системы автоматической фокусировки и системы поворота изображения, в результате чего значительно упрощается аппаратно-программная синхронизация работы системы, уменьшаются габариты, вес и стоимость установки. Это в конечном итоге может повысить конкурентоспособность оптико-механического оборудования, выпускаемого в Республике Беларусь.

Разработанные в диссертации математическая и компьютерная модели планарного позиционера и двухкоординатные системы на его основе, а также алгоритмы управления были использованы на предприятии «Рухсервомотор» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке и созданию многокоординатной системы перемещений для тестера печатных плат, обеспечивающей точность позиционирования ± 10 мкм, повторяемость ± 3 мкм, скорость перемещения до $0,5$ м/с и ускорение до 20 м/с².

В диссертации проанализирована возможность создания тестера печатных плат на основе разработанной в диссертации системы перемещений. В такой конфигурации тестера отпадает необходимость в собственной координатной системе зонда, кроме того, появляется возможность подвода зонда к контактной площадке под разными углами.

В главе также проанализирована возможность построения зондового оборудования на основе разработанной в диссертации системы перемещений, использование которой в качестве манипуляционной для микрозонда обеспечивает высокую точность и маневренность, низкую виброактивность, увеличенную рабочую зону, возможность построения многозондовой контрольно-измерительной системы в одной установке путем блочно-модульного расширения исполнительных механизмов.

В приложениях представлены акты о практическом использовании результатов диссертации на предприятиях «Рухсервомотор», ГНПО ТМ «Планар», в учебном процессе БГУИР, а также результаты компьютерного моделирования кривых на поверхностях второго порядка и данные экспериментальных исследований планарного позиционера для его верификации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Для решения прямой и обратной задач кинематики впервые для манипуляционного механизма системы перемещений на трех планарных позиционерах была разработана математическая модель, основанная на уравнениях голономных стационарных связей, определяющих конфигурацию исполнительного механизма, через точечное его представление в физическом пространстве; получено матричное описание положения всех звеньев и характерных точек с учетом геометрических и кинематических параметров механизма [6, 18].

2. Разработан аналитический алгоритм решения обратной задачи кинематики при выбранной конфигурации исполнительного механизма, обеспечивающий возможность формирования программируемых движений системы управления в режиме реального времени [18].

3. Разработана математическая модель планарного позиционера, ориентированная на компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink, которая позволила выполнить имитационное моделирование системы управления отдельным планарным приводом, по результатам которого с использованием предложенных в работе подходов аппаратно-программного моделирования на базе инструментариев MATLAB Real-Time Windows Target и xPC Target была осуществлена автоматическая генерация исполняемого кода из программной среды разработки в программу управления без специального программирования управляющего контроллера [1, 3, 6–11, 16, 20, 21].

4. Предложена иерархическая многоуровневая структура системы управления разработанной системой перемещений, построенная на управляющем контроллере на базе процессора TMS 320 фирмы Texas Instruments и CNC платы UC48 непосредственного управления каждым планарным позиционером, в которой каждый из уровней обладает своим входным и выходным аппаратно-программным интерфейсом [1, 2, 5, 7].

5. Разработаны математическая модель и алгоритмы построения программируемых движений на основе методов голономных автоматических систем, в которых программа движения представляется в параметрическом виде и является конечным интегралом исходной системы дифференциальных уравнений движения. Разработано программное обеспечение компьютерного моделирования в среде MATLAB различных траекторных задач на кривых и поверхностях второго порядка [4, 12–15, 17, 19, 22].

6. Разработана система прецизионных пространственных перемещений Трипланар с шестью степенями свободы на основе трех планарных позиционеров, для которой создано программное обеспечение, позволяющее генерировать программный код из среды разработки MATLAB непосредственно в контроллер системы управления, построенный на процессоре серии TMS 320, при этом достигнута точность 1 мкм, скорость 1 м/с, ускорение 20 м/с^2 при позиционных и контурных перемещениях [17, 18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для исполнительного механизма могут быть рекомендованы для компьютерного формирования рабочей области с требуемыми свойствами по кинематическим и точностным показателям при встраивании системы перемещений в конкретное оборудование для производства изделий микроэлектроники [5, 7, 18].

2. Математические и компьютерные модели ПППД, разработанные на фундаментальных представлениях электротехники, магнетизма и механики, доведены до программной реализации в среде MATLAB/Simulink и могут быть рекомендованы для использования при разработке других конфигураций линейного шагового привода, а также при формировании технических характеристик типоряда при выбранной конфигурации [5, 18].

3. Разработанные алгоритмы построения программируемых движений на базе методов голономных автоматических систем и созданное на их основе программное обеспечение могут быть использованы при программировании интерполяторов станков с ЧПУ для выполнения обработки на параллельных плоскостях и поверхностях второго порядка. При этом достигается минимальный объем и максимальное быстродействие управляющей программы [10, 12, 17].

4. Предложенный в работе подход аппаратно-программного моделирования на базе инструментария MATLAB Real-Time Window Target позволяет автоматически формировать исполняемый код контроллера. Для автоматического программирования контроллера системы управления необходимо вначале провести компьютерное моделирование системы управления с целью определения оптимальных законов и параметров регулирования, а также протестировать полученный код с помощью инструментария MATLAB Windows Target или xPC-Target [6, 16].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

- 1 Агранович, А.А. Моделирование системы управления двигателем постоянного тока в среде MATLAB/SIMULINK / А.А. Агранович // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/2. – С. 133–136.
- 2 Агранович, А.А. Использование двухканального нелинейного корректирующего устройства псевдолинейного типа для улучшения качества регулирования системы управления ЛШД / А.А. Агранович, С.Е. Карпович // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/1. – С. 17–21.
- 3 Агранович, А.А. Математическая модель планарного привода на базе линейных шаговых двигателей / А.А. Агранович, С.Е. Карпович, Д. Азентани // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/3. – С. 191–195.
- 4 Компьютерное моделирование голономных автоматических систем / А.А. Агранович, С.Е. Карпович, Д. Азентани, С.А. Русецкий // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С. 197–200.
- 5 Azentani, D. The interactive multimedia system for studying of programmable controller QLC-drive command system / D. Azentani, A. Ahranovich // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С. 261–264.
- 6 Агранович, А.А. Повышение качества регулирования системы управления планарного привода на основе ЛШД по результатам компьютерного моделирования / А.А. Агранович, Д. Азентани // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – №1(19)/1. – С. 113–120.
- 7 Компьютерное моделирование системы управления планарным приводом прямого действия / А.А. Агранович, В.В. Жарский, В.П. Огер, С.М. Аваков // Доклады БГУИР. – 2007. – №1(17). – С. 115–119.
- 8 Direct drive mathematical model design and verification / A.A. Ahranovich, S.E. Karpovich, V.V. Zharsky, S.M. Avakaw, S.A. Rusetsky // Electronics and Electrical Engineering. – 2007. – № 5(77). – P. 49–52.

Статьи в сборниках научных трудов

- 9 Ahranovich, A. Using the Argument Control in Differential Analyzers for Definite Velocity Profile Assignment for Affix Movement / A. Ahranovich, S. Karpovich // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol. 1. – P. 349–354.

10 Zimmermann, K. Analysis and synthesis of differential analyzers for holonomic automatic systems / K. Zimmermann, A. Ahranovich, S. Karpovich // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol. 1. – P. 246–251.

11 Azentani, D. The modeling of planar linear step motor functioning on basis of multimedia / D. Azentani, I. Dainiak, A. Ahranovich // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol. 2. – P. 505–510.

12 Агранович, А.А. Моделирование дифференциальных анализаторов для воспроизведения кривых, лежащих на поверхностях второго порядка, в MATLAB/Simulink / А.А. Агранович, Д. Азентани // Современные методы проектирования машин: респ. межведомственный сб. науч. трудов. – Минск: Технопринт, 2004. – Т. 6. – С. 85–89.

Материалы научных конференций

13 Агранович, А.А. Математические модели управляющих устройств на базе голономных автоматических систем / А.А. Агранович, Д. Азентани, Ю.С. Межинский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26–28 мая 2004 г.: в 2 ч. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: О.В. Мартышин [и др.]. – Новополоцк, 2004. – Ч. 1. – С. 232–235.

14 Агранович, А.А. Коррекция аргумента интеграторов голономных автоматических систем / А.А. Агранович, И.В. Темрук // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26–28 мая 2004 г.: в 2 ч. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: О.В. Мартышин [и др.]. – Новополоцк, 2004. – Ч. 1. – С. 236–239.

15 Ahranovich, A. Investigating the ability of holonomic automatic systems' dynamics control / A. Ahranovich, K. Zimmermann, S. Karpovich // Proceedings of 50th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 19–23, 2005 / TU Ilmenau. – Ilmenau, 2005. – P. 127–128.

16 Ahranovich, A. The Linear Step Motor Mathematical Model Design and Verification Using Identification Toolbox Method as a Mean for Improving the Motor's Performance / A. Ahranovich, D. Azentani, J. Zentner // Proceedings of 50th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 19–23, 2005 / TU Ilmenau. – Ilmenau, 2005. – P. 159–160.

17 Агранович, А.А. Формирование управления многокоординатной системы перемещений методами голономных автоматических систем / А.А. Агранович, С.Е. Карпович // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы IV междунар. науч.-техн. конф.,

10 Zimmermann, K. Analysis and synthesis of differential analyzers for holonomic automatic systems / K. Zimmermann, A. Ahranovich, S. Karpovich // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol. 1. – P. 246–251.

11 Azentani, D. The modeling of planar linear step motor functioning on basis of multimedia / D. Azentani, I. Dainiak, A. Ahranovich // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol. 2. – P. 505–510.

12 Агранович, А.А. Моделирование дифференциальных анализаторов для воспроизведения кривых, лежащих на поверхностях второго порядка, в MATLAB/Simulink / А.А. Агранович, Д. Азентани // Современные методы проектирования машин: респ. межведомственный сб. науч. трудов. – Минск: Технопринт, 2004. – Т. 6. – С. 85–89.

Материалы научных конференций

13 Агранович, А.А. Математические модели управляющих устройств на базе голономных автоматических систем / А.А. Агранович, Д. Азентани, Ю.С. Межинский // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26–28 мая 2004 г.: в 2 ч. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: О.В. Мартышин [и др.]. – Новополоцк, 2004. – Ч. 1. – С. 232–235.

14 Агранович, А.А. Коррекция аргумента интеграторов голономных автоматических систем / А.А. Агранович, И.В. Темрук // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы III междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26–28 мая 2004 г.: в 2 ч. / Полоц. гос. ун-т; редкол.: О.В. Мартышин [и др.]. – Новополоцк, 2004. – Ч. 1. – С. 236–239.

15 Ahranovich, A. Investigating the ability of holonomic automatic systems dynamics control / A. Ahranovich, K. Zimmermann, S. Karpovich // Proceedings of 50th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 19–23, 2005 / TU Ilmenau. – Ilmenau, 2005. – P. 127–128.

16 Ahranovich, A. The Linear Step Motor Mathematical Model Design and Verification Using Identification Toolbox Method as a Mean for Improving the Motor's Performance / A. Ahranovich, D. Azentani, J. Zentner // Proceedings of 50th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 19–23, 2005 / TU Ilmenau. – Ilmenau, 2005. – P. 159-160.

17 Агранович, А.А. Формирование управления многокоординатной системы перемещений методами голономных автоматических систем / А.А. Агранович, С.Е. Карпович // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы IV междунар. науч.-техн. конф.,

Аграновіч Аляксандр Аляксандравіч

Сістэма прэцызійных прасторавых перамяшчэнняў на аснове планарных прывадоў прамога дзеяння для абсталявання вытворчасці вырабаў электроннай тэхнікі

Ключавыя словы: мікраэлектроніка, оптыка-механічнае абсталяванне, механізм паралельнай кінематыкі, сістэма кіравання, планарны пазіцыянёр, мехатронная сістэма, верыфікацыя мадэлі.

Мэта работы: распрацоўка сістэмы прэцызійных прасторавых перамяшчэнняў з шасцю ступенямі рухавасці на трох планарных пазіцыянерах як механа-апаратна-праграмнага комплексу для рэалізацыі складаных праграміруемых рухаў у абсталяванні вытворчасці вырабаў электроннай тэхнікі.

Распрацаваны матэматычная мадэль і вылічальныя алгарытмы простага і зваротнага задач кінематыкі выканаўчага маніпуляцыйнага механізма сістэмы прэцызійных прасторавых перамяшчэнняў, пабудаванай на трох планарных пазіцыянерах.

Распрацаваны матэматычная і камп'ютэрная мадэлі планарнага пазіцыянера, на аснове якіх абгрунтаваны выбар алгарытма рэгулявання для адпаведнага кіравання планарным прывадам прамога дзеяння, ужываемым у сістэме. Распрацавана ісрархічная структура сістэмы перамяшчэнняў, заснаваная на праграмным узгадненні перамяшчэнняў планарных пазіцыянераў па сігналам сістэмы вымярэння, атрымліваемых з датчыкаў Холла, усталяваных на рухомах модулях.

Атрыманы алгарытмы і распрацавана праграмнае забеспячэнне пабудовы праграміруемых рухаў на інтэгральных разнастайнасцях у выглядзе крывых і паверхняў другога парадку з заданым профілем хуткасці на траекторыі.

Распрацавана сістэма прэцызійных прасторавых перамяшчэнняў з дакладнасцю 1 мкм, хуткасцю 1 м/с, паскарэннем 20 м/с². Прааналізавана магчымасць убудовы яе ў оптыка-механічнае, кантрольна-вымяральнае і зборчнае абсталяванне.

Распрацаваныя мадэлі, алгарытмы і праграмнае забеспячэнне могуць быць выкарыстаны пры стварэнні прэцызійных сістэм перамяшчэнняў для абсталявання мікраэлектронікі.

РЕЗЮМЕ

Агранович Александр Александрович

Система прецизионных пространственных перемещений на основе планарных приводов прямого действия для оборудования производства изделий электронной техники

Ключевые слова: микроэлектроника, оптико-механическое оборудование, механизм параллельной кинематики, система управления, планарный позиционер, мехатронная система, верификация модели.

Цель работы: разработка системы прецизионных пространственных перемещений с шестью степенями свободы на трех планарных позиционерах как механо-аппаратно-программного комплекса для реализации сложных программируемых движений в оборудовании производства изделий электронной техники.

Разработаны математическая модель и вычислительные алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики исполнительного манипуляционного механизма системы прецизионных пространственных перемещений, построенной на трех планарных позиционерах.

Разработана математическая и компьютерная модели планарного позиционера, на основании которых обоснован выбор алгоритма регулирования для адаптивного управления планарным приводом прямого действия, используемым в системе. Разработана иерархическая структура системы управления системой перемещений в целом, основанная на программном согласовании перемещений планарных позиционеров по сигналам системы измерений, получаемых от датчиков Холла, установленных на подвижных модулях.

Получены алгоритмы и разработано программное обеспечение построения программируемых движений на интегральных многообразиях в виде кривых и поверхностей второго порядка с заданным профилем скорости на траектории.

Разработана система прецизионных пространственных перемещений с точностью 1 мкм, скоростью 1 м/с, ускорением 20 м/с². Проанализирована возможность встраивания ее в оптико-механическое, контрольно-измерительное и сборочное оборудование.

Разработанные модели, алгоритмы и программное обеспечение могут быть использованы при создании прецизионных систем перемещений для оборудования микроэлектроники.

SUMMARY

Ahranovich Aliaksandr

The System of Precision Spatial Motion on the Basis of Planar Direct Drives for Microelectronics Production Equipment

Keywords: microelectronics, optical-mechanical equipment, parallel kinematics mechanism, control system, planar drive, mechatronic system, model verification.

The aim of the work: development of system of precision spatial movement with six degrees of freedom based on three planar positioners as mechanical, hardware and software complex for implementation of compound program motion in microelectronics production equipment.

Mathematical model and calculation algorithms were worked out for direct and inverse kinematic problems solution of actuating mechanism for the system of precision spatial movements built on the basis of three planar positioners.

Mathematical and computer models of planar positioner were worked out, on the basis of these models the choice of regulation algorithm for adaptive control was substantiated which was used in planar direct drive system. The hierarchical control system structure of motion system was worked out, which is based on program coordination of planar positioners' movement using measurement system signals, collected from Hall effect sensors which are installed on traveling modules.

Algorithms and software for program movement which are based on integral manifolds in a form of curves and quadric surfaces with adjustable velocity profile were worked out.

The system of precision spatial motion with accuracy 1 mkm, velocity 1 m/s and acceleration 20 m/s^2 was worked out. The possibility of this system integration in optical mechanical, control, and assembly equipment.

The worked out methods, algorithms and programs can be used when implementing and constructing the precision travel system for equipment of microelectronics.

АГРАНОВИЧ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СИСТЕМА ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНЫХ ПРИВОДОВ
ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Подписано в печать 06.07.2007. Формат 60x84 ^{1/16} .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.- изд. л. 1,4	Тираж 60 экз. Заказ 487.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6.