

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.9.048:681.7.064

ЛИТВИНОВ
Егор Алексеевич

**РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ
КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СБОРОЧНОМ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОМ
ОБОРУДОВАНИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

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 2012

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

Научный руководитель: **Карпович Святослав Евгеньевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры высшей математики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Ланин Владимир Леонидович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Соломахо Владимир Леонтьевич, д-р техн. наук, профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация: Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»

Защита состоится 17 мая 2012 г. в 14⁰⁰ 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, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Анализ технологического оборудования для производства изделий электронной техники: оптико-механического для генерирования изображений, проекционного совмещения и экспонирования полупроводниковых пластин, контроля изображений; сборочного, включая установки зондового контроля пластин, разделения пластин на кристаллы, посадки кристаллов, монтажа проволочных выводов и других видов, показывает, что основными узлами, в значительной степени определяющими его производительность, точность, динамику, являются устройства координатных перемещений, которые представляют собой автономные механо-аппаратно-программные мехатронные комплексы, предназначенные для осуществления рабочих, установочных и юстировочных перемещений кристаллов, полупроводниковых пластин, инструментов и элементов проекционной оптической системы.

Для обеспечения всё возрастающих требований к функциональным характеристикам назначения необходимы новые подходы и решения в разработке и создании систем перемещений с существенно повышенными характеристиками точности, динамических показателей и производительности по сравнению с применяемыми системами последовательной компоновки. Поэтому разработка принципиально новых систем перемещений, в том числе и на механизмах параллельной кинематики, предложенных в диссертационной работе, является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение для создания современного технологического оборудования для производства изделий электронной техники.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема диссертации утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 1 от 29 сентября 2008 г.) и соответствует направлению «1. Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии производства конкурентоспособной продукции», раздел «Микроэлектроника. Производство оптико-механического, контрольно-измерительного и сборочного оборудования» приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2006–2010 гг., утвержденных указом Президента Республики Беларусь № 315 от 6.07.2005 г.

Диссертационная работа выполнялась в БГУИР в научно-исследовательской группе 3.2 «Мехатроника и микросистемы» в рамках

заданий Государственной комплексной программы научных исследований (ГКПНИ) «Механика»:

– задание 1.07, тема «Разработка математических моделей для исследования электрических машин и их компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink», 2006–2010 гг., № госрегистрации 20066758;

– задание 1.23, тема «Разработка математической модели и алгоритмов управления мобильной системы на основе мотор-колес», 2006–2010 гг., № госрегистрации 20066756;

– задание 2.02, тема «Разработка методов алгоритмизации динамических моделей и их интерактивная визуализация», 2006–2008 гг., № госрегистрации 20066757.

Научные исследования по диссертационной работе выполнялись также в соответствии с грантом Министерства образования на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами, студентами по теме «Имитационное моделирование системы пространственных перемещений на базе механизмов параллельной кинематики» 2009–2010 гг., № госрегистрации 20090647.

Цель и задачи исследования

Цель работы состоит в разработке реконфигурируемых исполнительных механизмов параллельной кинематики с шестью степенями свободы для многокоординатных систем перемещений на прецизионных приводах прямого действия для сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, обладающего повышенными совокупными характеристиками точности и быстродействия.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

– анализ текущего состояния и возможностей построения нового поколения координатных систем перемещений для оборудования производства изделий электронной техники на основе механизмов параллельной кинематики с приводами прямого действия;

– анализ структурных особенностей механизмов параллельной кинематики, включая возможные кинематические пары, звенья и параллельные цепи;

– структурный синтез механизмов параллельной кинематики с шестью степенями свободы и их структурное модифицирование для реализации программируемых движений ограниченной мобильности;

– разработка единого подхода и математической модели формализованного описания и исследования любых систем перемещений, разрабатываемых на предложенных в диссертации схемах;

- постановка, формализация и решение прямой задачи кинематики, включая компьютерное моделирование в среде MATLAB/Simulink;
- разработка математической модели, алгоритмов и программы для компьютерного моделирования и интерактивной визуализации решения обратной задачи кинематики в среде MATLAB/Simulink для предложенных исполнительных механизмов систем перемещений;
- разработка имитационной динамической модели для компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink решения прямой и обратной задач динамики исполнительного механизма общей структуры с шестью степенями свободы;
- разработка исполнительных механизмов систем координатных перемещений на основе механизмов параллельной кинематики и многокоординатного привода прямого действия для сборочного и оптико-механического оборудования;
- разработка имитатора перемещений рабочей платформы в пространстве с шестью степенями свободы.

Объектом исследования являются реконфигурируемые исполнительные механизмы параллельной кинематики на прецизионных приводах прямого действия. Выбор объекта исследования обусловлен острой потребностью технологии микроэлектроники в системах перемещений нового поколения с более высокими показателями назначения. **Предметом исследования** являются математические и компьютерные модели и алгоритмы исследования структуры, кинематики и динамики для разработки систем многокоординатных перемещений с повышенными характеристиками точности и быстродействия.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика синтеза схем механизмов параллельной кинематики на основе метода реконфигурирования структурных групп в зависимости от кинематических возможностей приводов линейного, поворотного и планарного исполнения, обеспечивающая создание многокоординатных систем перемещений оборудования микроэлектроники повышенной точности с максимальным числом степеней свободы до шести включительно.

2. Математическая модель в виде аналитического решения в явном виде функций положений всех звеньев реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики на приводах прямого действия, алгоритмы и программное обеспечение в среде MATLAB/Simulink, позволившие оптимизировать кинематические характеристики движения конечного звена по трём линейным и трём угловым координатам одновременно в диапазоне рабочих областей от долей миллиметра до сотен миллиметров в зависимости от

конструктивного исполнения звеньев и их ориентации с предельными характеристиками скорости 1...2 м/с и ускорения 20...50 м/с² на реализуемых траекториях.

3. Имитационная модель динамики реконфигурируемых механизмов в виде модульного описания их механической структуры с возможностью автоматического импортирования структурно-параметрического представления механизмов из современных CAD платформ разработки (Pro/ENGINEER, SolidWorks), позволяющая решать прямую и обратную задачи динамики с интерактивной визуализацией в среде MATLAB/Simulink для обеспечения прецизионных программируемых движений конечного звена многокоординатных систем перемещений с точностью 0,2...0,3 мкм.

4. Разработанные исполнительные механизмы параллельной кинематики для многокоординатных систем перемещений нового поколения с повышенными в 2...3 раза показателями точности и шестью степенями свободы для сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, включая адаптивные проекционные системы нанометрового разрешения с программной коррекцией положения оптических элементов в процессе эксплуатации.

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 исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводились совместно с научным руководителем, д-м техн. наук, проф. С.Е. Карповичем. Вклад канд. техн. наук И.В. Дайняка и канд. техн. наук М.А. Ареби определяется их участием в разработке алгоритмов и программ компьютерного моделирования для исполнительного механизма параллельной кинематики на сегментном приводе прямого действия. Вклад д-ра техн. наук В.В. Жарского связан с разработкой поворотных, линейных, планарных, а также поворотных сегментных приводов прямого действия.

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, представленные в диссертации, были доложены и обсуждены на республиканских и международных научно-технических конференциях и семинарах: 12-я Международная научно-

техническая конференция «Современные средства связи», Минск, Беларусь, 24–28 сентября 2007 г.; 4-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», Севастополь, Украина, 21–25 апреля 2008 г.; XL Республиканский научно-методический семинар «Научно-методические основы применения информационных технологий в преподавании механики и научных исследованиях», Минск, Беларусь, 3–4 февраля 2009 г.; IV Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика 2009», Минск, Беларусь, 22–24 декабря 2009 г.; 44, 45, 46 и 47-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 2008–2011 гг.; VII Konferencja naukowo-praktyczna «Energia w nauce i technice», Белосток–Суваики, Польша, 2008 г.; 53-th International Scientific Colloquium «Prospects in mechanical engineering», Ильменау, Германия, 8–12 сентября 2008 г.; 54-th International Scientific Colloquium «Information Technology and Electrical Engineering – Devices and Systems, Materials and Technologies for the Future», Ильменау, Германия, 7–10 сентября 2009 г.; 55-th International Scientific Colloquium «Crossing Borders within the ABC – Automation, Biomedical Engineering and Computer Science», Ильменау, Германия, 13–17 сентября 2010 г.; 56-th International Scientific Colloquium «Innovation in Mechanical Engineering – Shaping the Future», Ильменау, Германия, 12–16 сентября 2011 г.

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ. В их числе 6 статей в рецензируемых журналах, 7 статей в сборниках материалов научных конференций, 1 тезисы доклада, 2 статьи в сборниках научных трудов, 1 патент на полезную модель, 2 заявки на изобретение.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. В **первой главе** дан анализ современного технического уровня систем перемещений сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники. Сформулированы цель и задачи исследования. Во **второй главе** представлены результаты, полученные автором по теории анализа и синтеза реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики на

гибридных приводах прямого действия. В третьей главе приведены предложенные математические модели, алгоритмы и интерфейсы разработанных программ для компьютерного моделирования прямой и обратной задач кинематики в среде MATLAB/Simulink. Четвёртая глава посвящена имитационному моделированию динамики исполнительных механизмов параллельной кинематики, предложенных в диссертации. В пятой главе описаны результаты реализации в технических системах микроэлектроники и имитаторах пространственных движений основных положений диссертации. В приложениях приведены результаты компьютерного моделирования точности и рабочих областей реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики, описание программы формирования управляющих команд имитатора пространственных движений, документы об использовании результатов диссертации.

Общий объем диссертации составляет 208 страниц. Из них 96 страниц основного текста, 92 рисунка на 48 страницах, 21 таблица на 13 страницах, библиографический список из 122 наименований на 9 страницах, список собственных публикаций автора из 19 наименований на 2 страницах и 8 приложений на 40 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ современного состояния и тенденций развития спецтехнологического оборудования, включая сборочное и оптико-механическое для микроэлектроники, современный этап развития которой характеризуется быстрым снижением топологической нормы и увеличением размеров кремниевых пластин. Проведенный сравнительный анализ современного сборочного оборудования мировых производителей, таких, как Samsung (Южная Корея), KLA-Tencor (США), ACCRETECH (Япония), SET (Франция), Kulicke & Soffa (Германия), ГНПО «Планар» (Беларусь) и др. показал, что структура конструктивного исполнения, состав компонентов, элементная база исполнительных механизмов систем перемещений и аппаратно-программных средств достаточно близки, поэтому точность и производительность незначительно отличаются для оборудования аналогичного назначения различных производителей. Так, достигнутая в серийном сборочном оборудовании точность позиционирования, равная $\pm 2... \pm 5$ мкм, максимальная скорость перемещений, равная $1...1,2$ м/с,

максимальное ускорение, равное $10...30 \text{ м/с}^2$, определяются в первую очередь работой такого устройства, как координатная система перемещений.

Проведенный в диссертации анализ оптико-механического оборудования таких ведущих мировых производителей, как ASML (Нидерланды), Nikon (Япония), Canon (Япония), ГНПО «Планар» (Беларусь) показал, что уровень топологической нормы интегральных схем, в первую очередь, определяется достигнутыми характеристиками назначения проекционной и координатной систем степперов, степ-сканов и контрольно-измерительного оборудования, в лучших образцах которого погрешность совмещения составляет $10...20 \text{ нм}$, общее разрешение – $40...100 \text{ нм}$. Современное оптико-механическое оборудование наряду с совершенствованием координатных систем предъявляет повышенные требования к оптическому разрешению проекционных систем, поддержанию их параметров точности и разрешения по всему полю в течение всего времени эксплуатации установки. Для этого в конструкции объективов проекционных систем, в отличие от существующей жесткой установки оптических элементов в корпусе с помощью оправок, необходимо дополнительно предусматривать адаптивные многокоординатные механизмы юстировки и стабилизации координат позиционирования оптических элементов, позволяющих подстраивать их как при изготовлении объектива, так и в процессе эксплуатации оборудования.

Проведенный в диссертации анализ сборочного и оптико-механического оборудования показал, что его центральным узлом, определяющим возможности по дальнейшему уменьшению топологической нормы, повышению производительности, снижению брака при изготовлении ИМС, являются прецизионные координатные системы. При этом наращивание функциональных возможностей координатных систем путем традиционного подхода к пространственной компоновке и интеграции нескольких отдельных базовых координатных модулей в одном исполнительном устройстве не позволяет обеспечить повышенной точности на больших скоростях и ускорениях, что является существенным ограничением к увеличению производительности оборудования микроэлектроники. Показано, что решение данной проблемы возможно путем перехода к построению прецизионных координатных систем на базе реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

Во второй главе представлены результаты теоретического исследования структурных особенностей построения механизмов параллельной кинематики, предназначенных для пространственного перемещения рабочей платформы с шестью степенями свободы. Проанализирована возможность реконфигурирования предложенной базовой схемы в исполнительные механизмы с числом степеней свободы, равным шести и меньше.

В результате решения диофантова уравнения $6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 = 0$, в котором 6, 5, 4 и 3 – целочисленные коэффициенты, а n, p_5, p_4, p_3 – целочисленные неизвестные, подлежащие определению, получены реконфигурируемые структурные пространственные группы Ассур, которые позволили синтезировать три базовых исполнительных механизма параллельной кинематики, обеспечивающие без пассивных связей и лишних степеней свободы управляемые движения рабочей платформы с шестью степенями свободы в трёхмерном пространстве. Для нахождения функции положения звеньев в диссертации предложена геометро-аналитическая модель, согласно которой свободные шарниры базовой группы в разомкнутом состоянии лежат на шести сферах с центрами на платформе и радиусами, равными длинам соответствующих шатунов. Используемые в работе уравнения шести связанных точечных множеств имеют вид:

$$(x^{N_i} - x^{A_i})^2 + (y^{N_i} - y^{A_i})^2 + (z^{N_i} - z^{A_i})^2 = l_i^2 \quad (i = 1, 2, \dots, 6), \quad (1)$$

где $x^{A_i}, y^{A_i}, z^{A_i}$ – координаты векторов \vec{R}^{A_i} , задающих центры сфер на платформе;

$x^{N_i}, y^{N_i}, z^{N_i}$ – координаты траектории сопрягаемой точки i -го привода;

l_i – длина i -го шатуна, задающего радиус сферы.

В третьей главе приведены разработанные математические модели, алгоритмы и интерфейсы программ в среде MATLAB/Simulink, предложенные в диссертации для компьютерного моделирования исполнительных реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики с шестью степенями свободы по кинематическим условиям и параметрам.

Предложена математическая модель решения прямой задачи кинематики на основе математического описания положения всех звеньев исполнительного механизма параллельной кинематики в виде параметрических функций от обобщённых координат, реализуемых многокоординатным приводом. Алгоритм решения построен на многокоординатном условии замкнутости аналогичном условию (1), только выраженному через геометрические параметры конкретного механизма. Путём аналитических преобразований в диссертации получена система из шести нелинейных трансцендентных уравнений, связывающих входные параметры $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ – обобщённые координаты подвижных элементов двигателей и выходные переменные $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ – независимые координаты положения и ориентации платформы исполнительного механизма.

Компьютерное моделирование прямой задачи кинематики рассматриваемого семейства механизмов осуществлялось с помощью

инструмента Optimization Toolbox среды MATLAB. Интерфейс разработанной программы позволяет пользователю в интерактивном режиме менять исходные условия, включая обобщённые координаты многокоординатного привода, метод оптимизации, начальное приближение, а также анализировать полученное решение на трёхмерном изображении механизма с помощью программы визуализации.

Для решения обратной задачи кинематики в диссертации предложен подход, основанный на аналитической геометрии в трёхмерном пространстве, который позволил получить в явном аналитическом виде все обобщённые координаты многокоординатного привода $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ в зависимости от координат $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$ положения и ориентации платформы, что не удавалось сделать другими методами. При разработке математической модели решения учитывались различные особенности функционирования механизма в рабочей области, включая условие сохранения исходной конфигурации механизма во всём диапазоне угловых перемещений привода. Алгоритм учёта последнего условия имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma_1 = \tau_1 - \delta_1, & x_{M_1} < x_{O_1}, & \sigma_1 = \tau_1 + \delta_1, & x_{M_1} > x_{O_1}, \\ \sigma_2 = \tau_2 - \delta_2, & x_{M_2} < x_{O_2}, & \sigma_2 = \tau_2 + \delta_2, & x_{M_2} > x_{O_2}, \\ \sigma_3 = \tau_3 - \delta_3, & x_{M_3} > x_{O_3}, & \sigma_3 = \tau_3 + \delta_3, & x_{M_3} < x_{O_3}, \\ \sigma_4 = \tau_4 - \delta_4, & x_{M_4} < x_{O_4}, & \sigma_4 = \tau_4 + \delta_4, & x_{M_4} > x_{O_4}, \\ \sigma_5 = \tau_5 - \delta_5, & x_{M_5} > x_{O_5}, & \sigma_5 = \tau_5 + \delta_5, & x_{M_5} < x_{O_5}, \\ \sigma_6 = \tau_6 - \delta_6, & x_{M_6} < x_{O_6}, & \sigma_6 = \tau_6 + \delta_6, & x_{M_6} > x_{O_6}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\text{где } \tau_i = \arccos \frac{(O_i M_i)^2 + r_i^2 - l_i^2 + h_i^2}{2(O_i M_i) \cdot r_i};$$

$$\delta_i = \frac{|z^A|}{O_i M_i};$$

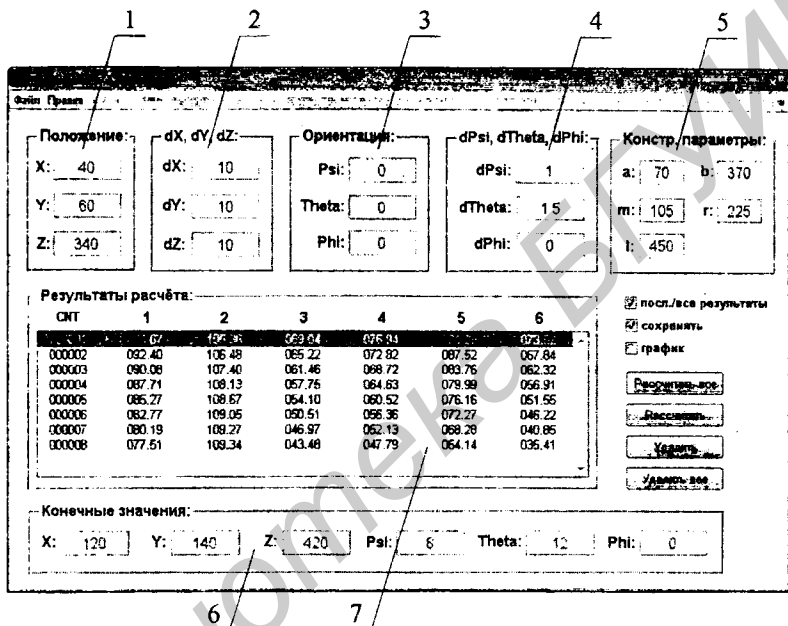
$$O_i M_i = \sqrt{(x_{M_i} - x_{O_i})^2 + (y_{M_i} - y_{O_i})^2 + (z_{M_i} - z_{O_i})^2};$$

$x_{O_i}, y_{O_i}, z_{O_i}$ – координаты точек O_i на соответствующих осях двигателей;

$x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i}$ – координаты i -й рабочей точки M_i механизма параллельной кинематики.

Интерфейс разработанной программы решения обратной задачи кинематики представлен на рисунке 1. Программа позволяет проводить моделирование с визуализацией результатов в виде динамически меняющихся трёхмерных изображений механизма при переходе платформы из исходного положения в заданное.

Разработанные программы решения прямой и обратной задач кинематики позволяют проводить углубленное исследование на персональном компьютере любого механизма параллельной кинематики, получаемого из исходной структуры путём её реконфигурирования. При этом достаточно учесть отличительные признаки конкретного механизма на интерфейсном уровне, описав траекторию рабочей точки привода. Базовая программа является инвариантным расчётным модулем для всего рассматриваемого в работе семейства механизмов параллельной кинематики.



1 – координаты положения платформы; 2 – инкрементные приращения по x, y, z ;
 3 – ориентация платформы; 4 – инкрементные приращения по φ, θ, ψ ; 5 – конструктивные параметры механизма; 6 – конечная ориентация и положение платформы; 7 – рассчитанные значения $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_6$ обобщённых угловых координат

Рисунок 1 – Интерфейс разработанной программы моделирования решения обратной задачи кинематики

В четвёртой главе представлены математические модели и результаты имитационного моделирования динамики предложенных исполнительных механизмов параллельной кинематики. Разработанная динамическая модель базируется на уравнениях связи силовых характеристик многокоординатного привода с текущим пространственным положением и перемещениями рабочей платформы в трёхмерном пространстве. На основании динамической модели и предложенных алгоритмов решения прямой и обратной задач динамики было

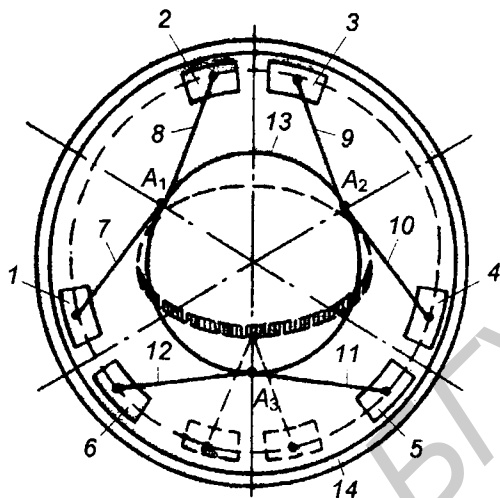
разработано программное обеспечение в среде MATLAB/Simulink для исследования динамических характеристик рассматриваемых механизмов. Динамическая модель в среде MATLAB/Simulink строится в виде блок-схемного описания механической структуры с помощью соответствующих функциональных элементов. Массогабаритные параметры структурных частей задаются в соответствующих настроечных формах. В процессе компьютерного моделирования автоматически осуществляется преобразование блок-схемы в эквивалентную математическую модель на базе одного из типов уравнений Ньютона, Лагранжа, Ньютона-Эйлера или других, имеющихся в MATLAB/Simulink. Поддержка интеграции с CAD платформами, такими, как Pro/ENGINEER, SolidWorks и др. позволяет автоматически импортировать структурно-параметрическое описание модели исполнительного механизма в среду MATLAB/Simulink.

В диссертации приведены численные результаты имитационного моделирования базового механизма параллельной кинематики, полученные по разработанной в среде MATLAB/Simulink программе, включая координатное представление текущего состояния платформы и механизма в целом, изменение скорости и ускорения движения платформы по всем шести независимым координатам $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)$, полный набор расчётных силовых характеристик, необходимых для выбора исполнительных двигателей многокоординатного электропривода.

В пятой главе представлены результаты по реализации предложенных в работе с участием автора диссертации кольцевого многокоординатного привода на автономно управляемых сегментах (заявка на изобретение Республики Беларусь № а 20111239) и манипулятора параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы (заявка на изобретение Республики Беларусь № а 20100779). Многокоординатный синхронный двигатель может иметь от двух до шести подвижных сегментов. На рисунке 2 показана структурно-кинематическая схема манипулятора на автономно управляемых сегментах кольцевого привода, основывающаяся на вышеуказанных заявках на изобретение.

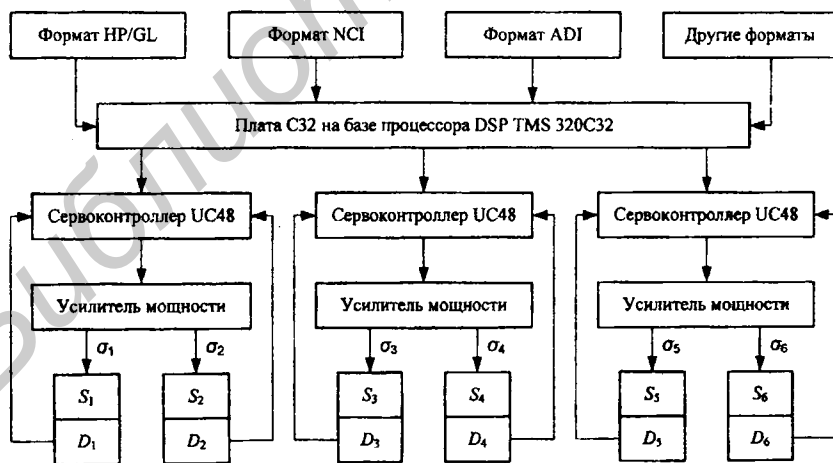
Статор двигателя состоит из магнитопровода и постоянных магнитов, расположенных с чередующейся полярностью магнитных полюсов по делительному диаметру. Работа предложенного многокоординатного синхронного двигателя основана на взаимодействии бегущего электромагнитного поля якоря со стационарным гармоническим полем статора. Для управления перемещениями подвижных сегментов предлагается аппаратно-программный комплекс на основе контроллера LSMC-х, разработанного на предприятии «Рухсервомотор» совместно с НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы», который позволяет одновременно управлять

шестью сегментами в замкнутом режиме. Структурная схема системы управления показана на рисунке 3.



1, 2, 3, 4, 5, 6 – подвижные сегменты; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – шатуны; 13 – подвижная платформа; 14 – кольцевой статор; A_1, A_2, A_3 – сферические соединения подвижной платформы с шатунами

Рисунок 2 – Структурно-кинематическая схема манипулятора на автономно управляемых сегментах кольцевого привода

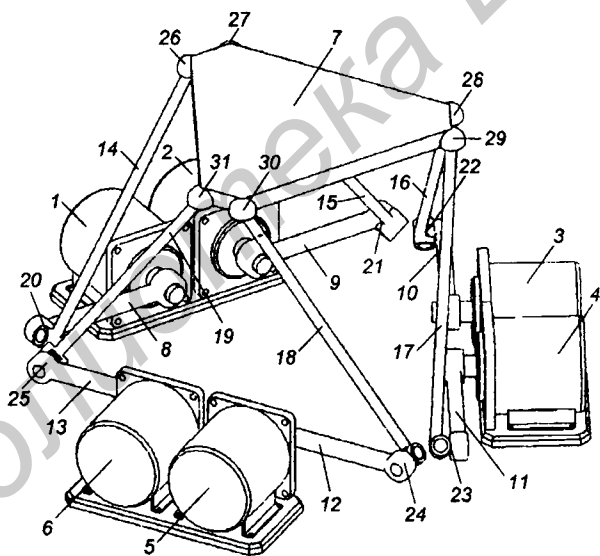


S_1, S_2, \dots, S_6 – подвижные сегменты; D_1, D_2, \dots, D_6 – позиционные датчики

Рисунок 3 – Иерархическая структура системы управления на базе контроллера LSMC-х

Система перемещений, представленная на рисунке 2, обладает повышенной точностью и быстродействием и предназначена для встраивания в сборочное и оптико-механическое оборудование взамен координатных систем на ЛШД. Также в диссертации впервые предложено использовать этот механизм для адаптивной стабилизации координат позиционирования оптических элементов в виде конструктива из двух колец, одно из которых неподвижно в корпусе с электромагнитными модулями движения, а другое – подвижное с оправкой для оптического элемента, управляемое через промежуточные кинематические цепи.

Для реализации перемещений рабочей платформы с инструментом или заготовкой в трёхмерном пространстве с большими линейными и угловыми перемещениями, чем можно получить на кольцевом многокоординатном приводе, в работе предложена и запатентована (патент Республики Беларусь № 6657) система перемещений под названием «Манипулятор параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы». Структурно-кинематическая схема манипулятора показана на рисунке 4.



- 1, 2, 3, 4, 5, 6 – поворотные приводы прямого действия; 7 – подвижная платформа;
 8, 9, 10, 11, 12, 13 – входные кривошипы; 14, 15, 16, 17, 18, 19 – промежуточные шатуны;
 20, 21, 22, 23, 24, 25 – карданные соединения; 26, 27, 28, 29, 30, 31 – сферические соединения

Рисунок 4 – Структурно-кинематическая схема манипулятора параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы

Теоретические результаты по разработке математических моделей и алгоритмов компьютерного моделирования прямой и обратной задач кинематики и динамики этого манипулятора были использованы в НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР для создания гаммы имитаторов пространственных движений рабочей платформы по трём линейным и трём угловым координатам в трёхмерном пространстве. Имитатор TVR-4D-6DOF-8S был разработан и создан при участии автора диссертации на предприятии «Технологии виртуальной реальности» (г. Минск, Беларусь). Конфигурационная структура разработанного имитатора включает предложенный манипулятор (рисунок 4), персональный компьютер, контроллер управления, инверторы Mitsubishi Electric FR-S 500, асинхронные двигатели Siemens 1LA7096-4AA с редукторами MTC62A, угловые датчики ДК1-С.

В приложениях представлены результаты компьютерного моделирования точности и рабочих областей реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики, описание программы формирования управляющих команд имитатора пространственных движений, а также документы об использовании результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа систем перемещений сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники показано, что при всём их многообразии современные тенденции развития, направленные на наращивание функциональных возможностей при существенно больших скоростях и ускорениях, повышенных характеристиках точности и быстродействия, связаны в первую очередь с переходом к построению прецизионных координатных систем на базе механизмов параллельной кинематики и цифрового привода прямого действия [1–А, 10–А].

2. Предложена методика структурного синтеза схем механизмов параллельной кинематики, основанная на структурных группах, не влияющих на подвижность механизма, в соответствии с которой получены исполнительные механизмы реконфигурируемой структуры, обеспечивающие перемещения рабочей платформы с шестью независимыми степенями свободы, точность реализации которых не менее чем в 2...3 раза может быть выше, чем в системах на ЛЩД [4–А, 13–А].

3. Разработан общий подход и математическая модель формализованного описания и исследования реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики, построенных на предложенных в

диссертации структурных группах, приводящихся в движение поворотными, линейными, сегментными или планарными двигателями цифрового привода прямого действия [5–А, 14–А].

4. Предложена математическая модель решения прямой задачи кинематики для базового исполнительного механизма, согласно которой вычислительное её решение по нахождению линейных и угловых координат платформы по заданным обобщённым угловым координатам серводвигателей выполняется по аналитическому описанию векторного условия многоконтурной замкнутости параллельных кинематических цепей в виде фундаментальной нелинейной системы из шести уравнений. В среде MATLAB/Simulink разработана программа численного поиска решений в соответствии с выбранным по критерию сходимости методом оптимизации [11–А, 15–А].

5. Предложена впервые математическая модель аналитического решения в явном виде обратной задачи кинематики для базового механизма. Решение осуществлено на базе геометро-аналитического подхода, основанного на уравнениях аналитической геометрии в трёхмерном пространстве и матричных преобразованиях в однородных координатах. При этом алгоритмически обеспечено сохранение начальных конфигурационных условий во всём диапазоне изменений искоемых переменных с обеспечением однозначного визуального отображения на ПК положения платформы, всех звеньев и механизма в целом в режиме реального времени [6–А, 9–А, 12–А].

6. Предложенная алгоритмизация математической модели решения в явном виде функций положения всех звеньев реконфигурируемых механизмов и программное обеспечение на её основе в среде MATLAB/Simulink позволили оптимизировать кинематические характеристики движения конечного звена по трём линейным и трём угловым координатам одновременно в рабочих областях от долей до сотен миллиметров в зависимости от конструктивного исполнения звеньев и их ориентации с предельными характеристиками скорости $1...2$ м/с и ускорения $20...50$ м/с² на реализуемых траекториях [6–А, 8–А, 15–А, 16–А].

7. Разработана имитационная модель динамики реконфигурируемых механизмов в виде модульного описания их механической структуры в среде MATLAB/Simulink, которая позволила выполнить решение прямой и обратной задач динамики с интерактивной визуализацией пространственных состояний всех подвижных звеньев при реализации прецизионных программируемых движений многокоординатными системами перемещений с точностью $0,2...0,3$ мкм [2–А, 8–А, 16–А].

8. Предложены новые исполнительные механизмы для систем координатных перемещений на основе механизмов параллельной кинематики и многокоординатного привода прямого действия, позволяющие разрабатывать

новое поколение таких систем для оборудования производства изделий электронной техники с повышенными не менее чем в 2...3 раза показателями точности и быстродействия по сравнению в системами на ЛШД [3-А, 17-А, 18-А, 19-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Сравнительный анализ многокоординатных систем перемещений на линейных шаговых двигателях и систем перемещений, конфигурируемых из предложенных механизмов параллельной кинематики, управляемых поворотными, сегментными, линейными и планарными приводами прямого действия показал, что дальнейшее повышение в 2...3 раза показателей назначения, таких как точность и быстродействие, в новом поколении оборудования возможно только путём внедрения систем перемещений на реконфигурируемых механизмах параллельной кинематики, в которых прямое электромагнитное преобразование движения реализуется через параллельные механические структуры [3-А, 7-А, 8-А].

2. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение решения прямой и обратной задач кинематики, имитационного моделирования динамики разработанного базового механизма могут быть рекомендованы для компьютерного формирования рабочей области, калибровки возможных траекторий по кинематическим, динамическим и точностным показателям, необходимым для обеспечения условий реализаций соответствующих технологических операций в сборочном и оптико-механическом оборудовании [1-А, 9-А, 15-А].

3. Предложенную систему перемещений на кольцевом сегментном многокоординатном приводе рекомендуется использовать в оптико-механическом оборудовании микроэлектроники при создании адаптивных проекционных систем с программной коррекцией положения оптических элементов в процессе сборки и эксплуатации. Это в первую очередь оборудование с проекционными системами нанометрового разрешения, в которых важнейшими являются точность позиционирования элементов и стабильность поддержания геометрических параметров в процессе эксплуатации [2-А, 18-А].

4. Предложенные исполнительные механизмы параллельной кинематики могут быть рекомендованы для использования в качестве технологических и транспортных систем при разработке и создании автоматических линий по производству прецизионных деталей и изделий в приборостроении, а также в производстве изделий общемашиностроительного назначения [4-А, 5-А, 17-А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Литвинов, Е.А. Аппаратно-программное обеспечение системы перемещений с шестью степенями свободы / Е.А. Литвинов, В.В. Жарский, С.Е. Карпович // Инженерный вестник. – 2006. – № 1(21)/5. – С. 110–115.

2–А. Аппаратно-программное моделирование системы управления многокоординатной системы перемещений / Е.А. Литвинов, В.В. Жарский, И.В. Дайняк, М.А. Ареби // Доклады БГУИР. – 2007. – № 6. – С. 50–55.

3–А. Литвинов, Е.А. Построение аппаратно-программного прототипа системы управления параллельным манипулятором / Е.А. Литвинов // Доклады БГУИР. – 2009. – № 2 (40). – С. 45–50.

4–А. Литвинов, Е.А. Построение многокоординатной системы перемещений на базе механизма параллельной кинематики / Е.А. Литвинов, В.В. Жарский, М.А. Ареби // Доклады БГУИР. – 2009. – № 8 (46). – С. 79–84.

5–А. Симулятор программных движений с тремя степенями свободы / Е.А. Литвинов, Н.И. Кекиш, В.В. Жарский, С.Е. Карпович // Инженерный вестник. – 2010. – № 3(29). – С. 52–55.

6–А. Литвинов, Е.А. Компьютерное моделирование исполнительных механизмов параллельной кинематики с шестью степенями свободы / Е.А. Литвинов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 4 (13). – С. 45–48.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7–А. Управление электромеханическим приводом прямого действия на основе методов голономных автоматических систем / В.В. Жарский, А.А. Агранович, С.А. Русецкий, Е.А. Литвинов // Современные средства связи: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Респ. Беларусь, 2007 г. / ВГКС. – Минск, 2007. – С. 100–101.

8–А. Litvinau, Y. The 6-DOF spatial parallel mechanism control system computer simulation / Y. Litvinau, S. Karpovich, A. Ahranovich // Computer science meets automation: Proceedings of 52th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 10–13, 2007 / Ilmenau University of Technology. – Ilmenau, 2007. – Vol. I. – P. 477–482.

9–А. Литвинов, Е.А. Решение обратной задачи кинематики параллельного механизма в среде MATLAB / Е.А. Литвинов, М.А. Ареби // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: Бюллетень КД междунар. Установа адукацыі "БЕЛАРУСКИ ДЗЯРЖАЎНЫ УНІВЕРСІТЭТ ІНФАРМАТЫКІ І РАДЫЭЛЕКТРОНІК"

молодежн. науч.-техн. конф., Севастополь, 21–25 апр. 2008 г./ Севаст. науч.-техн. ун-т; [редкол: Е.В. Пашков и др.]. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 404.

10–А. Karpovich, S. The 6-dof spatial parallel mechanism control system computer simulation / S. Karpovich, V. Zharsky, Y. Litvinau // Energy in Science and Technology: Proceedings of VII International Scientific Conference, Białystok – Suwalki, July 22–23, 2008 / Białystok Technical University. – Białystok, 2008. – С. 226–232.

11–А. Litvinau, Y. The simulation of parallel mechanism in MATLAB/Simulink development environment / Y. Litvinau, V. Jarski, M. Arebi // Prospects in mechanical engineering: Proceedings of 53th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 8–12, 2008 / Ilmenau University of Technology. – Ilmenau, 2008. – P. 73–74.

12–А. Litvinau, Y. Simulation of the electric drives for the 6-dof movement system / Y. Litvinau // Information Technology and Electrical Engineering – Devices and Systems, Materials and Technologies for the Future: Proceedings of 54th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 7–10, 2009 / Ilmenau University of Technology. – Ilmenau, 2009. – P. 107–108.

13–А. Litvinau, Y. Three degree-of-freedom movement simulator control system / Y. Litvinau // Crossing Borders within the ABC – Automation, Biomedical Engineering and Computer Science: Proceedings of 55th International Scientific Colloquium, Ilmenau, September 13–17, 2010 / Ilmenau University of Technology. – Ilmenau, 2010. – P. 476–478.

Тезисы докладов на научных конференциях

14–А. Литвинов, Е.А. Многокоординатная система перемещений для технологического производства изделий микроэлектроники / Е.А. Литвинов, С.Е. Карпович // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: тез. Междунар. науч.-техн. конф., Минск–Нарочь, 25–29 сентября 2006 г. / Белорус. гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2006. – С. 92.

Статьи в сборниках научных трудов

15–А. Литвинов, Е.А. Компьютерное моделирование прямой и обратной задачи кинематики пространственной системы перемещений с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink / Е.А. Литвинов, С.Е. Карпович, В.В. Жарский // Теоретическая и прикладная механика. – 2008. – № 23. – С. 112–117.

16–А. Литвинов, Е.А. Моделирование динамики параллельного механизма с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink / Е.А. Литвинов // Теоретическая и прикладная механика. – 2009. – № 24. – С. 267–272.

Патенты

17–А. Манипулятор параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы: пат. на полезную модель 6657 Респ. Беларусь, МПК7 В 25 J 7/00, В 25 J 11/00, В 25 J 17/00 / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № u 20100168; заявл. 19.02.10 ; опубл. 30.10.10 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 5(76). – С. 188.

Заявки на изобретения

18–А. Манипулятор с шестью степенями свободы на кольцевом сегментном двигателе: заявка на изобретение Респ. Беларусь, МПК7 В 25 J 11/00, В 25 J 17/00 / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, М.А. Ареби ; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № а 20100779; заявл. 17.05.2010.

19–А. Многокоординатный синхронный двигатель: заявка на изобретение Респ. Беларусь, МПК7 Н 02К 41/02, Н 02К 41/03 / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, В.В. Жарский; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № а 20111239; заявл. 23.09.2011.

Литвин, Е.А.

Літвінаў Ягор Аляксеевіч

Рэканфігураваньня механізмы паралельнай кінематыкі для шматкаардынатных сістэм перамяшчэнняў у зборачным і оптыка-механічным абсталяванні мікраэлектронікі

Ключавыя словы: мікраэлектроніка, рэканфігураваньня механізмы паралельнай кінематыкі, структурны сінтэз, дынамічная мадэль, сістэма кіравання, шматкаардынатная сістэма перамяшчэнняў.

Мэта работы: распрацоўка рэканфігураваных выканаўчых механізмаў паралельнай кінематыкі з шасцю ступенямі свабоды для шматкаардынатных сістэм перамяшчэнняў на прэцызійных прывадах прамога дзеяння для зборачнага і оптыка-механічнага абсталявання мікраэлектронікі, якое валодае павышанымі сукупнымі характарыстыкамі дакладнасці.

Атрыманьня вынікі і навізна: Прапанавана методика сінтэзу схем механізмаў паралельнай кінематыкі на аснове метаду рэканфігуравання структурных груп у залежнасці ад кінематычных магчымасцяў прэцызійных прывадаў прамога дзеяння лінейнага, паваротнага і планарнага выканання для пабудовы шматкаардынатных сістэм абсталявання мікраэлектронікі. Распрацаваны аналітычныя алгарытмы, матэматычныя мадэлі і праграмае забеспячэнне рашэння прамой і зваротнай задач кінематыкі, якія забяспечваюць камп'ютэрнае мадэляванне рэканфігураваных механізмаў у асяроддзі MATLAB/Simulink, разлік рабочай вобласці і інтэрактыўную візуалізацыю. Прапанавана імітацыйная мадэль дынамікі рэканфігураваных механізмаў у выглядзе модульнага апісання іх механічнай структуры, якая дазваляе вырашаць прамую і зваротную задачы дынамікі з інтэрактыўнай візуалізацыяй у асяроддзі MATLAB/Simulink. Распрацаваныя выканаўчыя механізмы паралельнай кінематыкі на прэцызійных прывадах прамога дзеяння здольны забяспечыць перамяшчэнне выхаднога зв'язна з павышанымі ў 2...3 разы паказчыкамі дакладнасці і гранічнымі характарыстыкамі хуткасці 1...2 м/с і паскарэння 20...50 м/с² на рэалізуемых траекторыях.

Ступень выкарыстання: атрыманьня ў рабоце вынікі былі выкарыстаны пры распрацоўцы прэцызійных шматкаардынатных сістэм перамяшчэнняў на ТАА «Рухсерваматор» і шэрагу імітатараў прасторавых рухаў на ПУП «Тэхналогіі віртуальнай рэальнасці».

Галіна прымянення: зборачнае і оптыка-механічнае абсталяванне мікраэлектронікі, шматкаардынатныя сістэмы перамяшчэнняў.

РЕЗЮМЕ

Литвинов Егор Алексеевич

Реконфигурируемые механизмы параллельной кинематики для многокоординатных систем перемещений в сборочном и оптико-механическом оборудовании микроэлектроники

Ключевые слова: микроэлектроника, реконфигурируемые механизмы параллельной кинематики, структурный синтез, динамическая модель, система управления, многокоординатная система перемещений.

Цель работы: разработка реконфигурируемых исполнительных механизмов параллельной кинематики с шестью степенями свободы для многокоординатных систем перемещений на прецизионных приводах прямого действия для сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, обладающего повышенными совокупными характеристиками точности и быстродействия.

Полученные результаты и их новизна: предложена методика синтеза схем механизмов параллельной кинематики на основе метода реконфигурирования структурных групп в зависимости от кинематических возможностей прецизионных приводов прямого действия линейного, поворотного и планарного исполнения для построения многокоординатных систем оборудования микроэлектроники. Разработаны аналитические алгоритмы, математические модели и программное обеспечение решения прямой и обратной задач кинематики, обеспечивающие компьютерное моделирование реконфигурируемых механизмов в среде MATLAB/Simulink, расчет рабочей области и интерактивную визуализацию. Предложена имитационная модель динамики реконфигурируемых механизмов в виде модульного описания их механической структуры, позволяющая решать прямую и обратную задачи динамики с интерактивной визуализацией в среде MATLAB/Simulink. Разработанные исполнительные механизмы параллельной кинематики на прецизионных приводах прямого действия способны обеспечить перемещения выходного звена с повышенными в 2...3 раза показателями точности и предельными характеристиками скорости 1...2 м/с и ускорения 20...50 м/с² на реализуемых траекториях.

Степень использования: полученные в работе результаты были использованы при разработке прецизионных многокоординатных систем перемещений на ООО «Рухсервомотор» и ряда имитаторов пространственных движений на ЧУП «Технологии виртуальной реальности».

Область применения: сборочное и оптико-механическое оборудование микроэлектроники, многокоординатные системы перемещений.

RESUME

Litvinov Yegor Alekseevich

Reconfigurable parallel mechanisms for multi-axis motion systems in assembly and optical-mechanical equipment of microelectronics

Keywords: microelectronics, reconfigurable parallel mechanisms, structural synthesis, dynamic model, control system, multi-axis motion system.

The aim of the work: development of reconfigurable executable parallel mechanisms having six degrees of freedom for multi-axis motion systems built on high-precision direct-drive actuators for assembly and optical-mechanical equipment of microelectronics with the enhanced cumulative characteristics of precision and performance.

The obtained results and their novelty: The synthesis methodology based on the reconfiguration method of structural groups depending on kinematic features of high-precision direct-drive actuators of linear, rotary and planar designs was proposed for parallel mechanisms schemes to construct multi-axis motion systems of microelectronics equipment. Analytical algorithms, mathematical models and software for direct and inverse kinematics problems solving were developed, which realize computer modeling of the reconfigurable mechanisms within MATLAB/Simulink environment, calculation of workspace and interactive visualization. The dynamics simulation model of the reconfigurable mechanisms was proposed, which is represented in the form of modular definition of their mechanical structure. The dynamics simulation model enables direct and inverse dynamics problems solving with an interactive visualization within MATLAB/Simulink environment. The developed parallel mechanisms combined with high-precision direct-drive actuators are capable to provide the motions of an output link with 2...3 times increased characteristics of accuracy and boundary characteristics of velocity at 1...2 m/s and acceleration at 20...50 m/s² on the realized trajectories.

Degree of utilization: The results obtained were used to develop high-precision multi-axis motion systems at «Ruchservomotor» Ltd and a number of spatial movements simulators at PUE "Virtual reality technologies".

Field of application: assembly and optical-mechanical equipment of microelectronics, multi-axis motion systems.

Научное издание

ЛИТВИНОВ ЕГОР АЛЕКСЕЕВИЧ

**РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ
КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В СБОРОЧНОМ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОМ
ОБОРУДОВАНИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность 05.27.06 –Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 09.04.2012.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 163.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6