

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.002

Дайняк  
Игорь Викторович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ  
ПРОГРАММИРУЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБОРУДОВАНИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ 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**

Минск 2006

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
*Карпович Святослав Евгеньевич*  
(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра высшей математики)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
*Сурин Виталий Михайлович*  
(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра инженерной графики)

кандидат технических наук, доцент  
*Гульков Геннадий Игнатьевич*  
(Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов»)

Оппонирующая организация: Государственный научно-производственный концерн точного машиностроения «Планар»

Защита состоится 7 декабря 2006 г. в 16<sup>00</sup> часов 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.

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время основная тенденция развития микроэлектроники состоит в росте степени интеграции ИС при снижении их стоимости за счет уменьшения топологической нормы и увеличения размеров кремниевых пластин. Чем меньше топологическая норма и больше размер пластины, тем более функционально сложные ИС можно изготавливать и больше ИС снимать с одной пластины при прочих равных условиях.

Снижение топологической нормы и увеличение размеров кремниевых пластин кроме совершенствованных технологий производства требует также в еще большей степени совершенствования технологического оборудования, в особенности сборочного: большой точности перемещений, более высокого быстродействия, больших диапазонов перемещений. При этом производитель изделий микроэлектроники должен иметь возможность переходить на новую топологическую норму, на новые размеры кремниевых пластин с помощью действующего оборудования с минимальными затратами на модернизацию или приобретение нового.

У всех видов автоматизированного оборудования для производства ИС производительность и точность определяются работой такого устройства, как координатная система перемещений, методами, алгоритмами и средствами формирования программируемых движений, реализованных в системе управления. Это относится, в первую очередь, к установкам зондового контроля, разделения пластин на кристаллы, разварки проволочных выводов, герметизации в корпус и др. Такие системы перемещений необходимо разрабатывать как мехатронные модули перемещений с системой управления, адаптируемой к технологическому процессу. Для этого необходимо разрабатывать математические модели для углубленного математического моделирования системы перемещений и обеспечения ее повышенных характеристик точности и быстродействия путем использования алгоритмов управления, построенных на решении обратных задач динамики и сплайновой интерполяции, с возможностью программной коррекции используемых в системе управления регуляторов.

В связи с этим разработка методов и средств формирования программируемых движений для систем перемещений, построенных на базе приводов прямого действия различной конфигурации, обеспечивающих повышенные характеристики точности и быстродействия, является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

**Связь работы с крупными научными программами, 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.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состоит в разработке методов и средств формирования программируемых движений, позволяющих повысить точность и быстродействие прецизионного оборудования производства изделий микроэлектроники. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

- анализ систем перемещений современного оборудования производства изделий микроэлектроники, методов, средств и аппаратно-вычислительных возможностей построения и реализации программируемых движений;
- разработка подхода к построению программируемых движений на основе алгоритмов решения обратных задач динамики;
- разработка вычислительных методов и алгоритмов на их основе, предназначенных для формирования программы движений в виде аналитического описания характера и условий движения в фазовых координатах;
- разработка аппаратно-программных средств и технических устройств формирования и реализации программируемых движений с улучшенными характеристиками точности и быстродействия;
- разработка технического и программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований координатных систем на базе привода прямого действия;
- анализ предельных характеристик перемещений и предельных нагрузочных характеристик привода прямого действия для оценки возможностей реализации программируемых движений;
- разработка аппаратных и программных средств для реализации результатов работы в прецизионном оборудовании.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются прецизионные координатные системы перемещений на базе электропривода прямого действия. Предметом исследования являются методы, алгоритмы и средства формирования точных и качественных программируемых движений, реализуемых системами перемещений в оборудовании производства изделий микроэлектроники.

**Гипотеза.** Формирование точных и качественных программируемых движений координатными системами перемещений, используемыми в

оборудовании производства изделий микроэлектроники, возможно методами, основанными на решении обратных задач динамики путем доопределения дифференциальных уравнений движения по задаваемым интегральным многообразиям программы движения с последующим нахождением искомым неизвестных управлений из таким образом восстановленных дифференциальных уравнений. Дальнейшее повышение точности и быстродействия будет определяться уровнем используемых вычислительных алгоритмов и методов интерполяции траектории движения в сочетании с возможностями аппаратно-программных средств микрошагового управления и техническими возможностями механических узлов системы перемещений.

**Методология и методы проведенного исследования.** При решении поставленных задач использовались: аналитические методы построения уравнений движения по заданному в виде свойств движения механической системы интегральному многообразию, методы аналитической механики, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений и их систем.

Для построения контурных программируемых движений были разработаны алгоритмы, построенные на сплайновой интерполяции сплайнами 2-й и 3-й степени.

Экспериментальные исследования предельных характеристик были проведены на ГНПКГМ «Планар» и на предприятии «Рухсервомотор» на специальных стендах, включающих прецизионное измерительное оборудование с использованием статистических методов регистрации и обработки наблюдаемых в эксперименте величин.

При разработке программного обеспечения установки формирования трехмерных объектов в объеме прозрачных диэлектриков были использованы методы структурного и объектно-ориентированного программирования.

### **Научная новизна и значимость полученных результатов.**

1. Предложен подход и методы на его основе формирования программируемых движений, базирующиеся на решении обратных задач динамики путем доопределения исходных дифференциальных уравнений движения по задаваемому интегральному многообразию программы движения. При этом задача по нахождению управлений решается в аналитических функциях без решения дифференциальных систем путем анализа восстановленных дифференциальных уравнений.

2. Разработаны вычислительные методы и алгоритмы формирования программы движения в виде аналитического описания характера и условий движения исполнительного элемента системы перемещений в фазовых координатах, предложены рекуррентные параметрические интерполяционные алгоритмы программ движения, что позволяет по динамическим моделям систем перемещений находить аналитические функции управлений.

3. Разработаны вычислительные алгоритмы формирования программируемых движений для старт-стопных позиционных перемещений типа «точка-точка» и непрерывных перемещений с выходом в конечную точку по таймеру, а также контурных перемещений на основе рекуррентных

алгоритмов, построенных на сплайновой параметрической интерполяции квадратичными и кубическими сплайнами, что дает возможность оптимизации программируемых движений, исходя из максимальной производительности оборудования.

4. Разработаны алгоритмы точечной дискретизации трехмерных объектов с последующим формированием программируемых движений с синхронизацией координатных перемещений по тактовой частоте импульсного лазера. При этом обход точек дискретизированного объекта может осуществляться в старт-стопном режиме и в режиме непрерывного движения, что позволило создать программное обеспечение «Sculptor», внедренное в серийные установки ELS-3 на предприятии «ЛОТИС-ТИИ» для формирования 2D и 3D объектов в стекле и прозрачных диэлектриках.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Разработанная математическая модель формирования программируемых движений на основе решения обратных задач динамики позволяет получать алгоритмы для системы управления привода прямого действия, обеспечивая необходимое качество управления без аппаратной и программной реализации обратных связей.

2. Разработанные вычислительные алгоритмы формирования программируемых движений от точки к точке при старт-стопном режиме перемещения и при непрерывном перемещении с выходом в конечную точку по таймеру и контурных перемещений на основе рекуррентных алгоритмов предназначены для повышения точности и быстродействия прецизионного оборудования производства изделий микроэлектроники, такого, как зондовое, разделения пластин на кристаллы, разварки проволочных выводов и др.

3. Предложенный механизм шагового перемещения по двум координатам с геометрическим и силовым замыканием позволяет при позиционных перемещениях в установках скрайбирования, зондового контроля, кристаллоукладчиках и др. сохранять тяговую силу по координатам в пределах, близких к максимальному значению, за счет механической компенсации угла разворота и удержания индуктора от «опрокидывания». Это приводит к существенному упрощению аппаратно-программного комплекса системы управления координатными перемещениями при сохранении метрологической точности позиционных и контурных перемещений во всем их диапазоне.

4. Разработан и реализован способ микрошагового управления, при котором изменение скорости позиционера осуществляют в зависимости от частоты управляющих импульсов и величины дискретности перемещения, что приводит к расширению динамического диапазона работы системы управления приводом прямого действия, тем самым обеспечивая формирование программируемых движений практически с любым законом скорости и ускорения, что повышает производительность автоматизированного оборудования.

Разработанные методы и средства формирования программируемых движений имеют широкую область применения не только в прецизионном оборудовании производства изделий микроэлектроники, но и в любом другом

автоматизированном оборудовании, использующем системы перемещений на базе электроприводов прямого действия. Они были внедрены в системах перемещений, построенных на базе привода прямого действия, на предприятии «Рухсервомотор» при создании планарного привода с устройством ограничения угла разворота, на предприятии «ЛОТИС-ТИИ» в системе управления 2D и 3D перемещениями лазерной установки ELS-3.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Метод формирования программируемых движений на основе алгоритмов решения обратных задач динамики, который, в отличие от известных, основывается на восстановлении систем дифференциальных уравнений по их частному решению, задаваемому аналитической программой в фазовых координатах.

2. Вычислительные методы и алгоритмы формирования программируемых движений для старт-стопных позиционных перемещений типа «точка-точка» и непрерывных перемещений с выходом в конечную точку по таймеру, а также контурных перемещений на основе рекуррентных алгоритмов, ориентированных на аппаратную реализацию.

3. Устройство формирования программируемых движений планарного привода на основе механизма ограничения угла разворота, отличающегося тем, что подвижный индуктор удерживается специальным пантографом в положении наибольших тяговых сил, развиваемых приводом по ортогональным координатам.

4. Способ управления для формирования микрошаговых программируемых движений, обеспечивающий реализацию координатных перемещений практически с любым законом скорости и ускорения, что расширяет динамический диапазон работы и повышает производительность оборудования производства изделий микроэлектроники.

5. Алгоритмы построения программируемых движений, позволившие в оборудовании формирования объектов импульсным лазером в стекле и прозрачных диэлектриках получить производительность не менее 90% от максимально возможной.

**Личный вклад соискателя.** Содержание диссертации отражает личный вклад соискателя. Он заключается в разработке алгоритмов построения уравнений движения на основе решения обратных задач динамики, расчетных методов и алгоритмов формирования программируемых движений и интерполяционных алгоритмов планирования траектории перемещений, а также в их реализации в оборудовании производства изделий микроэлектроники. Вклад научного руководителя профессора С.Е.Карповича связан с постановкой цели и задач исследования, анализом и обобщением полученных результатов.

Экспериментальные исследования предельных характеристик, представленные в работах [3, 10] проводились на ГНПКТМ «Планар» совместно с В.П.Огером и А.В.Безлюдовым. Исследования систем управления шаговым приводом, а также разработка алгоритмов на основе квазизамкнутого управления, представленные в работах [1, 14, 26], были выполнены совместно с

Д.А.Степановым, Ю.С.Межинским, И.А.Павлюковским, С.В.Ковалевым и А.Е.Филипповичем В остальных работах соавторы принимали участие в обосновании подходов к решению поставленных задач, частично выполняли программную реализацию алгоритмов и экспериментальные исследования.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на Международных научно-технических конференциях «Новые технологии изготовления многокристалльных модулей» (Нарочь, Беларусь, 2000 г., 2002 г., 2006 г.); 45<sup>th</sup>, 47<sup>th</sup>, 48<sup>th</sup>, 49<sup>th</sup>, 50<sup>th</sup> and 51<sup>th</sup> International Scientific Colloquiums of Ilmenau Technical University (Германия, Ильменау, 2000 г., 2002-2006 гг.); International Conference «Mechatronika-2000» (Варшава, Польша, 2000 г.); 14<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> Power Electronics And Electrical Drives International Conferences (Кошице, Словакия, 2001 г., 2003 г.); на II, III и IV Международных научно-технических конференциях «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2002 г., 2004 г., 2006 г.); 1-й и 2-й Международных научно-технических конференциях «Современные методы проектирования машин. Расчет, конструирование, технология» (Минск, Беларусь, 2002 г., 2004 г.); V, VI, VII, VIII и IX Международных школах-семинарах аспирантов, магистрантов и студентов «Современные информационные технологии» (Браслав, Беларусь, 2002-2006 гг.); XII Konferencji «Diagnostyka maszyn gobiczych i pojazdów» (Быдгощ, Польша, 2005 г.); Международной научно-технической конференции «Механика – машиностроению-2005» (Минск, Беларусь, 2005 г.).

**Опубликованность результатов.** По материалам диссертации опубликовано 35 печатных работ, в том числе 13 статей в научных журналах, 5 статей в сборниках научных трудов, 11 статей в сборниках материалов научных конференций, 4 тезисов докладов. Получено 2 патента Республики Беларусь на изобретения. Общее количество опубликованных по теме диссертации материалов составляет 136 страниц.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из общей характеристики работы, шести глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений. Общий объем диссертации составляет 174 страницы, основное содержание изложено на 93 страницах. Работа включает 48 иллюстраций на 39 страницах, 12 таблиц на 21 странице, список использованных источников из 120 наименований на 9 страницах, список публикаций автора, содержащий основные научные результаты диссертации, из 35 наименований на 4 страницах и 8 приложений на 8 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обоснована актуальность и новизна темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту.



В первой главе проводится анализ методов и средств формирования программируемых движений в современном оборудовании производства изделий микроэлектроники и тенденций его развития. Основной тенденцией развития микроэлектроники можно считать уменьшение топологической нормы ИС, что обеспечивает, кроме роста степени интеграции, снижение их стоимости. Вместе с тем тенденция развития производства ИС, связанная с повышением эффективности производства, приводит также к необходимости увеличения размеров кремниевых пластин. Конец 90-х годов характеризовался переходом передовых производств на пластины диаметром 200 мм и работами по подготовке производства к переходу на пластины диаметром 300 мм, а в настоящее время уже выпускается оборудование для работы с пластинами диаметром 300 мм. Представленные тенденции, кроме совершенствования технологии производства, требуют также совершенствования технологического оборудования: большей точности перемещений и позиционирования, более высокого разрешения, более высокого быстродействия.

Все это предъявляет особые требования к методам и средствам формирования программируемых движений, реализуемых прецизионными системами перемещений. В главе дан анализ программ движений, характерных для различных видов сборочного оборудования, используемого в производстве изделий микроэлектроники, из которого видно, что все они могут быть поделены на позиционные и контурные. Разработан и описан общий алгоритм таких программируемых движений, который состоит из следующих этапов: задание программы движения; обработка траектории в позиционный или контурный алгоритм; формирование программируемого движения; формирование параметров программируемого движения с учетом динамической модели системы перемещений; определение управляющих функций и законов; аппаратно-программная реализация микрошагового управления с выходом в силовой драйвер; формирование токовых состояний, необходимых для реализации требуемой программы движений.

Во второй главе представлены результаты по разработке метода построения программируемых движений на основе алгоритмов решения обратных задач динамики. Известно, что динамическая модель многокоординатной системы перемещений, в том числе и на базе приводов прямого действия, описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$\ddot{x}_i = p_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \cdot u_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $p_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – функции правых частей уравнений динамического равновесия, получаемые для систем перемещений по методу Лагранжа, Даламбера или Ньютона;  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор фазовых координат пространства состояний системы;  $n = 2m$ , при этом  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – текущие координаты;  $x_{m+1} = \dot{x}_1, x_{m+2} = \dot{x}_2, \dots, x_n = \dot{x}_m$  – скорости по соответствующим координатам;  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  – вектор управления, в общем случае

учитываемый в уравнении (1) динамической модели через переменные коэффициенты  $b_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

В работе рассматривается задача по разработке аналитического метода построения вектора управлений  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  по заданной программе:

$$\omega_k(x_1, x_2, \dots, x_n, t) = 0, \quad k = \overline{1, r}, \quad (2)$$

которая в фазовой координатной плоскости определяет требуемый закон движения ( $r$  – число уравнений, описывающих программу движения).

Так как в этом случае известна структура (1) дифференциальных уравнений движения, конструктивные параметры, действующие на координатную систему силы, описание программы движений (2), которое, по сути, должно быть интегралами уравнения (1), то задача построения программируемых движений может быть сведена к нахождению управлений  $u_1, u_2, \dots, u_n$  таких, чтобы программа (2) явилась бы частным решением этой системы дифференциальных уравнений. Тем самым задача сводится не к решению системы (1), а к ее восстановлению или доопределению по заданным интегральным многообразиям и нахождению искомым неизвестных управлений  $u_i$  из таким образом восстановленных уравнений. Доопределение дифференциальных уравнений (1) нами осуществлялось на основании необходимого и достаточного условия, полученного Н.П.Еругиным для построения обыкновенных дифференциальных уравнений по их частному решению. Это условие для рассматриваемых в диссертации координатных систем, описываемых дифференциальными системами типа (1), было получено в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial \omega_k(x, t)}{\partial x_i} [p_i(x) + b_i(x) \cdot u_i] + \frac{\partial \omega_k(x, t)}{\partial t} \right\} = R_k(\omega_k, x, t), \quad k = \overline{1, r}, \quad (3)$$

где  $R_k(\omega_k, x, t)$  – произвольная функция, необходимая при формировании оптимального управления, такая, что при выполнении на реализуемом перемещении условия программы движения (2) она обращается в нуль.

В результате решения системы уравнений (3), определяющей необходимое и достаточное условие реализации программируемого движения, получим искомые управления  $u_i$ , которые для большого класса технических систем представляют собой аналитические функции, выражаемые через переменные фазовые координаты программы движений и параметры динамической модели рассматриваемой системы перемещений.

В диссертации представлены алгоритмы решения различных задач по построению программируемых движений трехкоординатной системы перемещений, построенные на описанном выше методе: реализация программируемого движения с участками ускорения, постоянной скорости и замедления; реализация оптимального по быстродействию программируемого движения с постоянной скоростью; реализация программируемого движения с участками ускорения, постоянной скорости и замедления и оптимизации его по

быстродействию; определение оптимальных по быстродействию управлений вдоль задаваемой траектории.

В третьей главе представлены вычислительные методы и алгоритмы, полученные на их основе, предназначенные для формирования программы движений в виде аналитического описания характера и условий движения в фазовых координатах.

В технологическом оборудовании производства изделий микроэлектроники используются координатные системы, реализующие позиционные и контурные перемещения. В обоих случаях перемещение от начальной точки до конечной состоит из трех основных участков: разгон, при котором исполнительный элемент координатной системы оборудования начинает движение с нулевой скоростью и постепенно увеличивает ее до максимальной скорости; перемещение с постоянной скоростью; торможение, при котором исполнительный элемент замедляет движение и останавливается в заданной позиции.

При формировании программы движения необходимо проводить расчет параметров движения на каждом участке траектории, желательно по рекуррентным алгоритмам, учитывающим перемещения, скорости, ускорения и ограничения на максимальные их значения. Эти алгоритмы должны быть представлены как программы движений в фазовых координатах в виде (2) с последующим их использованием при решении систем уравнений (3) для непосредственного нахождения управлений  $u_i$ .

Не менее важно иметь структурированные программы движений в виде рекуррентных алгоритмов для типовых законов перемещений также и в случае использования традиционных подходов к построению систем управления с обратными связями, в которых программа движения сравнивается с реальным движением и формируется параметр рассогласования.

В диссертации представлены разработанные вычислительные методы и алгоритмы на их основе, которые позволяют аналитически в виде параметрических полиномов описывать следующие программы движений: программу движения от точки к точке при старт-стопном законе управления и трапецеидальном профиле скорости, программу движения от точки к точке при старт-стопном законе управления и законе плавного изменения скорости, а также программу оптимального перемещения от точки к точке при старт-стопном законе управления.

Особое внимание уделено формированию программы движений по кривой, заданной множеством точек, при непрерывном движении с выходом в каждую точку по установленному таймеру. Этот режим перемещения наиболее характерен для технологического оборудования, построенного на использовании в качестве инструмента импульсного лазера, когда для повышения производительности необходима точная синхронизация его импульсного режима с перемещением координатной системы. Для оборудования такого класса в диссертации разработаны рекуррентные выражения, основанные на сплайновой интерполяции квадратичными и кубическими сплайнами задаваемой программы движения, обеспечивая при

этом возможность параметрического согласования импульсного лазера с системой перемещений.

Проведенный нами анализ построения программируемых движений показал, что для целей лазерного формирования трехмерных объектов достаточным является использование на участках дискретизации кубических сплайнов в следующем параметрическом представлении:

$$S(\lambda) = a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0, \quad a \leq \lambda \leq b. \quad (4)$$

С учетом граничных условий и нормирования параметра  $\lambda$  выражение (4) примет вид

$$S(\lambda) = h_{00}S(0) + h_{01}S(1) + h_{10}S'(0) + h_{11}S'(1), \quad 0 \leq \lambda \leq 1, \quad (5)$$

где  $h_{00}(\lambda) = 2\lambda^3 - 3\lambda^2 + 1$ ,  $h_{01}(\lambda) = -2\lambda^3 + 3\lambda^2$ ,  $h_{10}(\lambda) = \lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda$ ,  $h_{11}(\lambda) = \lambda^3 - \lambda^2$  – базовые кубические функции Эрмита, определенные для  $0 \leq \lambda \leq 1$ .

Использование сплайновых профилей скоростей, выраженных кубическими функциями, при разработке программного обеспечения для системы управления лазерной установки ELS-3 позволило существенно уменьшить динамическую погрешность, вибрации, повысить точность и производительность.

**Четвертая глава** посвящена техническим средствам формирования программируемых движений, которые в сочетании с аналитическими и вычислительными методами, представленными во второй и третьей главах, позволяют получить наибольший эффект повышения точности и быстродействия систем перемещений в составе оборудования производства изделий микроэлектроники.

В работе представлено аппаратно-программное средство формирования микрошаговых программируемых движений, построенное на запатентованном с участием автора диссертации (пат. 7005 РБ С1) способе микрошагового управления. Оно позволяет формировать программируемые движения ЛШД путем микрошагового управления при одновременном изменении частоты управляющих импульсов и модулировании величины дискретности перемещения в соответствии с рис. 1,а. В разработанном устройстве при увеличении частоты управляющих импульсов до значения  $f_0$  происходит разгон двигателя. При этом  $f_0$  рассчитывается с учетом быстродействия микропроцессора по формуле

$$f_0 = (N \cdot V_{\max}) / \tau, \quad (6)$$

где  $N$  – глубина модуляции дискретности перемещения;  $V_{\max}$  – максимальная скорость двигателя;  $\tau$  – период зубцовой структуры.

Кривая I на рис. 1,а представляет собой график изменения частоты управляющих импульсов и скорости идеализированного устройства, кривая II – график изменения частоты управляющих импульсов и скорости, реализованные в разработанном устройстве.

При достижении значения частоты управляющих импульсов, равной  $f_0$ , дискретность необходимо увеличить в 2 раза с соответствующим уменьшением управляющей частоты в 2 раза, при этом закон изменения скорости  $V(t)$  остается прежним. Процесс увеличения дискретности и периодического линейного увеличения частоты управления в 2 раза с последующим уменьшением в 2 раза необходимо продолжать до достижения заданной скорости  $V_{зад}$ .

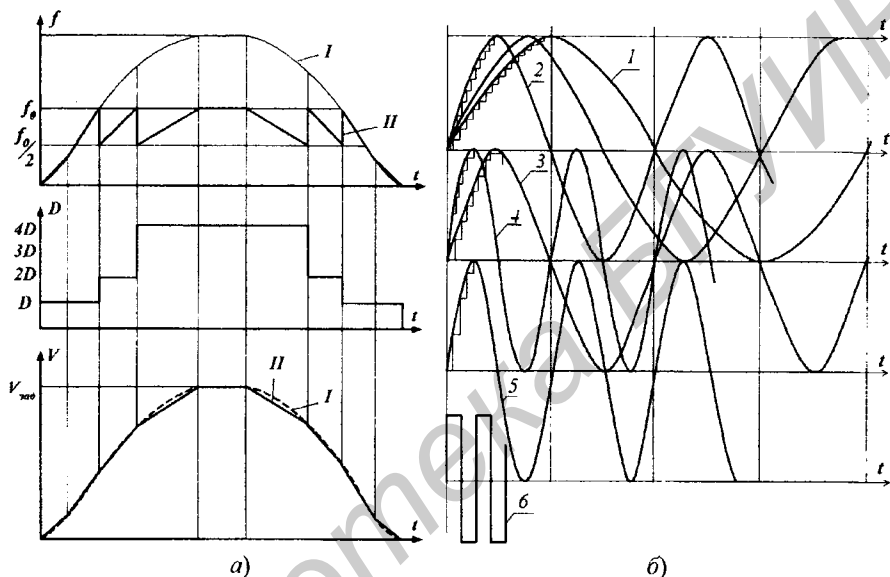


Рис. 1. Графики изменения частоты управляющих импульсов и формы выходного сигнала на цифроаналоговом преобразователе:  $f$  – частота управляющих импульсов;  $D$  – дискретность перемещения;  $V$  – скорость перемещения двигателя

Торможение двигателя производится аналогично разгону в обратном порядке. На рис. 1, б приведен анализ формы выходного сигнала с одного выхода цифроаналогового преобразователя. Синусоида 1 соответствует частоте управляющих импульсов  $f_0/2$ , а синусоида 2 – частоте  $f_0$  при дискретности  $D$ . Далее происходит переключение дискретности на  $2D$  и переход на синусоиду 3 с частотой управляющих импульсов  $f_0/2$ . Аналогично осуществляются переходы к синусоидам 4 и 5. На последней временной зависимости 6 представлен случай вырожденного микрошагового управления в обычное управление с дискретностью перемещения, равной половине механического шага двигателя.

Разработанное устройство состоит из микропроцессора, программно-управляемого генератора частоты управляющих импульсов, реверсивного счетчика с переменной разрядностью и цифроаналогового преобразователя.

Предложенное аппаратно-программное средство расширяет динамический диапазон работы системы управления синхронным приводом, обеспечивая возможность работы привода практически на любой требуемой скорости и ускорении, что повышает точность и производительность оборудования.

Наряду с аппаратно-программными средствами, в настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию конструкции механических узлов систем перемещений, улучшению таких их комплексных показателей, как статическая и динамическая добротность, точность и быстродействие перемещений по всему рабочему полю. Существенный недостаток всех систем перемещений на основе планарных ЛШД состоит в том, что подвижный индуктор не имеет геометрического и силового замыкания, а устойчивое равновесное состояние его поддерживается только благодаря восстанавливающему компенсационному моменту, возникающему при угловом смещении зубцовых структур индуктора относительно зубцовых структур статора. При этом такое смещение не должно превышать половины полюсного деления на периферии индуктора. При больших угловых смещениях происходит так называемое «опрокидывание» индуктора с выходом его из синхронизма.

В этой связи в работе представлено разработанное с участием автора диссертации и защищенное патентом 6986 РБ С1 устройство формирования плоскопараллельного планарного движения (рис. 2), предназначенного на конструктивном уровне решить проблему компенсации, ограничения разворота и предотвращения «опрокидывания» индуктора при его программируемом движении.

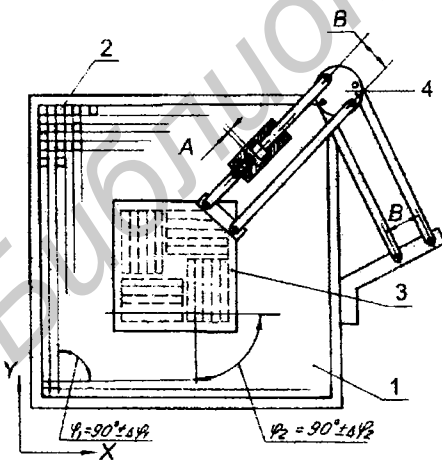


Рис. 2. Схема устройства формирования планарного движения: А – параметр настройки; В – параметр пантографа

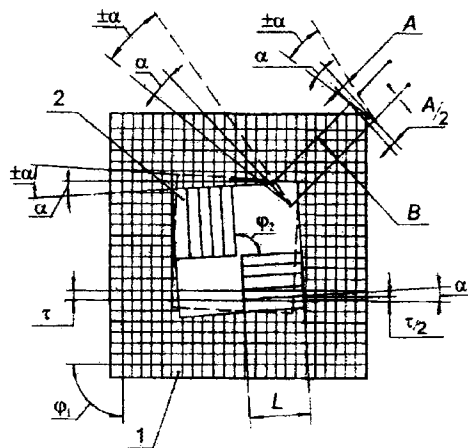


Рис. 3. Расчетная схема учета угла разворота планарного индуктора: 1 – статор; 2 – индуктор

Устройство состоит из неподвижного статора 1 с пересеченной зубцовой структурой типа «вафля» 2 и подвижного планарного индуктора 3, связанного с пантографным механизмом 4, у которого, по крайней мере, одно плечо сделано регулируемым в пределах величины  $A$ , обеспечивая при этом максимальный угол разворота индуктора  $\pm\alpha$ . Расчетная схема для определения компенсационного параметра  $A$  приведена на рис. 3, согласно которому предельный угол  $\alpha$  и настроечный параметр  $A$  рассчитываются по формуле

$$\alpha = \arcsin(\tau/(2L)), \quad A = (B \cdot \tau)/L, \quad (7)$$

где  $\tau$  – период зубцовой нарезки;  $L$  – длина зубцов электромагнитов индуктора;  $B$  – расстояние между осями поворота параллельных звеньев пантографа.

Стабилизация угла разворота в плоскости движения приводит к постоянству тяговых характеристик по ортогональным координатам привода, обеспечивая их значения, приближенные к максимальным, во всем диапазоне перемещений.

Проведенные исследования показали, что разработанное устройство позволяет повысить ускорение в 1,2...1,5 раза, а значит, и быстродействие перемещений, повысить метрологические точностные характеристики и сохранять их во время перемещения за счет отсутствия разворота индуктора по углу, исключить «опрокидывание» индуктора в процессе движения и расширить область применения на оборудование со средненагруженными планарными приводами.

Разработанное устройство может быть рекомендовано не только для применения в планарных приводах сборочного оборудования, но и в других случаях, в которых применение таких систем ограничивалось возможным «опрокидыванием» индуктора во время движения.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований двухкоординатной системы по тестовым программируемым перемещениям в виде окружности и квадрата при различных его положениях по отношению к отсчетной системе координат. Также представлены результаты экспериментальных исследований предельных характеристик перемещений и предельных нагрузочных характеристик планарного привода установки разварки проволочных выводов ЭМ-4260.

Тестовые исследования программируемых движений проводились на базе специального автоматизированного стенда, разработанного и созданного на предприятии «Рухсервомотор» для аттестации приводов прямого действия. В качестве базового метрологического устройства стенда использовался лазерный интерферометр MetrIAS101 с дискретностью отсчета 10 нм, и системой метрологического учета температуры, давления и влажности окружающей среды. Нормированная погрешность стенда по параметру точности измерений позиционных перемещений не превышает 0,1 мкм. Расчет заданных траекторий и их обработка в координатное представление фазовой плоскости выполнялось по предложенным в диссертации алгоритмам. Для синхронизации управления движением тестируемой координатной системы с временными циклами работы интерферометра и управляющего компьютера был применен контроллер на

базе процессора TMS320C32 с необходимыми периферийными устройствами (ЦАП, АЦП, усилители тока и др.). Для проведения эксперимента была использована разработанная программная оболочка для управляющей ПЭВМ, позволяющая в интерактивном режиме задавать параметры движения испытываемой координатной системы, а также устанавливать режимы измерения.

Экспериментальные исследования предельных характеристик скорости и ускорения и предельных нагрузочных характеристик проводились на ГНПКТМ «Планар» с использованием серийного двухкоординатного модуля установки разварки проволочных выводов ЭМ-4260 с диапазоном перемещений по координатам  $X$  и  $Y$  – 45 мм, максимальной скоростью по ортогональным координатам – 250 мм/с, максимальным ускорением – 25 м/с<sup>2</sup>, дискретностью задания перемещений – 0,15625 мкм.

Для верификации результатов теоретических исследований по формированию программируемых движений были проведены экспериментальные исследования динамических характеристик того же планарного привода при реализации различных режимов движения. Проведенные экспериментальные исследования и анализ их результатов позволили оценить предельные кинематические и динамические характеристики планарных систем перемещений, а также предельную нагрузочную характеристику. Учет этих характеристик необходим при формировании программируемых движений по разработанным в диссертации моделям для систем перемещений оборудования производства изделий микроэлектроники.

В шестой главе приведены сведения по реализации результатов, полученных в диссертации. Результаты работы нашли применение при выполнении ряда НИР научно-исследовательской группы «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР. Также они были использованы при разработке и создании ряда координатных систем различного назначения. На предприятии «Рухсервомотор» с использованием результатов диссертации был создан планарный привод прямого действия с устройством ограничения угла разворота индуктора в плоскости его движения. В основу реализованного технического решения были положены средство компенсации, разработанное с участием автора диссертации, и результаты исследования предельных характеристик такого привода. За счет такого решения удалось стабилизировать угловой разворот индуктора во время рабочих перемещений, повысить максимальное ускорение координатных перемещений в 1,2...1,5 раза, уменьшить погрешность перемещений, циклическую ошибку и повторяемость в среднем в 1,2 раза, повысить нагрузочную способность привода и расширить область его применения.

В рамках ГНТП «Информационные технологии» с использованием результатов диссертации была разработана и создана двухкоординатная система перемещений автоматизированной установки контроля печатных плат, которая включает контроллер и программное обеспечение системы управления. Разработанный привод позволяет в режиме покоординатного сканирования проводить контроль дефектов печатных плат, при этом разработанное ПО



обеспечивает программное согласование координатных перемещений и работы телевизионной системы распознавания. Основные характеристики разработанной системы перемещений следующие: пределы перемещения – 60×60 мм, скорость перемещений – до 100 мм/с, ускорение перемещений – до 20 м/с<sup>2</sup>, точность позиционирования печатной платы – 10 мкм. Контроллер системы управления построен на процессоре цифровой обработки сигналов ADSP2186, обеспечивает одновременное управление по двум координатам, позволяет программно задавать скорости и ускорения движения и формировать программы перемещений на внутреннем высокоуровневом языке.

На предприятии «ЛОТИС-ТИИ» в лазерной установке ELS-3 внедрена система управления 2D и 3D перемещениями, осуществляемыми по алгоритмам и программному обеспечению «Sculptor», которые разработаны с использованием результатов диссертации. Система перемещений лазерной установки обеспечивает формирование дискретизированных объектов в трехмерном объеме из стекла или другого прозрачного диэлектрика со следующими характеристиками: максимальный размер обрабатываемого объекта – 100×100×100 мм, точность перемещений – 10 мкм, повторяемость перемещений – 5 мкм, максимальное число точек дискретизации объекта для формирования программируемых движений – 2 млн.

Разработанное программное обеспечение установки ELS-3 реализует следующие функции: дискретизацию плоских и объемных изображений, подготовленных в среде 3D-Studio-Max; отображение полученного точечного объекта с возможностями настройки параметров; редактирование полученного точечного объекта с возможностью смещения, поворота и масштабирования; настройку параметров согласованного управления импульсным лазером и координатной системой в ходе технологического процесса. По методам и алгоритмам, предложенным в диссертации для формирования программируемых движений от точки к точке и сегменте из множества точек, выполнен анализ производительности установки лазерного формирования ELS-3 и подбор оптимальных параметров программируемых движений, который позволил обеспечить производительность не менее 90 точек в секунду при использовании импульсного лазера с рабочей частотой 100 Гц.

**В приложениях** представлены акты о практическом использовании результатов диссертации на предприятиях «Рухсервомотор», «ЛОТИС-ТИИ» и в учебном процессе БГУИР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен общий подход и аналитические методы на его основе формирования программируемых движений, который, в отличие от известных, построен на доопределении системы дифференциальных уравнений движения известной структуры функциональными членами с искомыми управлениями, полученными на основании задаваемой для системы перемещений программы движения. Для нахождения управлений предложена система алгебраических уравнений, полученная из необходимого и достаточного условия построения обыкновенных дифференциальных уравнений по их частному решению.

Использование предложенного подхода к нахождению управлений по задаваемой программе движения позволит программно реализовать необходимое регулирование движения по аналитическим алгоритмам [4, 15, 16, 30, 31, 33].

2. Разработаны вычислительные алгоритмы формирования позиционных и контурных программируемых движений для различных режимов перемещений, ориентированных на аппаратную реализацию, а также алгоритмы интерполяции контурных программируемых движений на основе рекуррентных параметрических алгоритмов, которые структурированы в фазовых координатах с возможностью использования их в качестве программ движения, необходимых при реализации разработанного подхода формирования программируемых движений прецизионных систем перемещений оборудования производства изделий микроэлектроники [2, 3, 8, 11, 13, 19, 21, 23, 25].

3. Предложено техническое средство реализации планарных плоско-параллельных движений с ограничением разворота и предотвращением «прокидывания» индуктора при его программируемом движении за счет усовершенствования конструкции механических узлов системы перемещений введением специального пантографного устройства, обеспечивающего геометрическое и силовое замыкание подвижного индуктора. Разработанное устройство позволило повысить ускорение перемещений в 1,2...1,5 раза с сохранением метрологических характеристик точности во всем диапазоне перемещений [10, 20, 24, 32, 34].

4. Разработан способ микрошагового управления, при котором изменение скорости перемещения индуктора координатной системы осуществляется одновременным изменением частоты управляющих импульсов и величины дискретности перемещения, что приводит к расширению динамического диапазона работы системы перемещений, построенной на базе привода прямого действия, на 15...20% и тем самым позволяет повысить производительность оборудования производства изделий микроэлектроники [1, 14, 22, 27, 35].

5. Экспериментально установлены предельные характеристики: нагрузочные, скорости и ускорения планарных приводов прямого действия, используемых в автоматическом оборудовании разварки проволочных выводов. Показано, что применение предложенного способа микрошагового управления позволило расширить динамический диапазон работы привода и качество программируемых движений [5, 6, 9, 17, 26].

6. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение установки формирования трехмерных объектов в объеме прозрачных диэлектриков, обеспечивающие реализацию безостановочных контурных программируемых движений с синхронизацией перемещений по тактовой частоте импульсного лазера. Использование разработанных алгоритмов, основанных на параметрической интерполяции программы движения по дискретизированным трехмерным объектам кубическими сплайнами, позволило обеспечить производительность лазерной установки ELS-3 не ниже 90% рабочей частоты лазера [7, 12, 18, 28, 29].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

## Статьи в научных журналах

1. Дайняк И.В., Степанов Д.А., Заведеев В.В., Павлюковский И.А., Филиппович А.Е. Система управления многокоординатным шаговым приводом на основе сигнального процессора ADSP-20165L // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – №1(11)/3. – С.165-166.
2. Дайняк И.В. Применение метода кватернионов для описания параллельных манипуляторов на базе ЛШД // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №1(13)/2. – С.236-240.
3. Огер В.П., Безлюдов А.В., Дайняк И.В. Выбор значений уровней квантования управляющих токов в линейном шаговом приводе // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №2(14)/1. – С.104-107.
4. Межинский Ю.С., Жарский В.В., Дайняк И.В. Математическая модель программного движения многокоординатных систем на базе ЛШД // Доклады БГУИР. – 2003. – Т.1. – №2. – С.99-102.
5. Дайняк И.В. Автоматизация построения предельной нагрузочной характеристики привода прямого действия // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – №1(15)/2. – С.32-37.
6. Дайняк И.В. Экспериментально-расчетная методика построения предельной нагрузочной характеристики систем позиционирования // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – №1(15)/3. – С.134-137.
7. Kuzmierowski T., Karpovich S., Dainiak I., Szewczak M. Computer simulation and visualization of the work of parallel mechanism 3D // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/3. – С.19-21.
8. Темрук И.В., Дайняк И.В. Компенсация погрешности позиционирования в поворотных приводах прямого действия // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/3. – С.61-63.
9. Темрук И.В., Жарский В.В., Межинский Ю.С., Дайняк И.В. Высокодинамичный прецизионный привод прямого действия, основанный на поворотных модулях // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С.318-322.
10. Гайков Н.И., Огер В.П., Безлюдов А.В., Карпович С.Е., Дайняк И.В. Двухкоординатный прецизионный шаговый привод прямого действия // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С.323-327.
11. Дайняк И.В., Баев В.С. Интерполяционные алгоритмы для прецизионных координатных систем // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – №2(20)/1. – С.72-76.
12. Дайняк И.В., Агранович А.А., Азентани Д.М. Мехатронные системы перемещений для прецизионных лазерных технологий // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – №2(20)/1. – С.332-339.
13. Дайняк И.В. Вычислительные алгоритмы формирования программных движений для привода прямого действия // Инженерный вестник. – 2006. – №1(21)/3. – С.55-62.

### Статьи в сборниках научных трудов

14. Дайняк И.В., Ковалев С.В., Павлюковский И.А., Заведеев В.В., Филиппович А.Е. Управление многокоординатным шаговым приводом на основе алгоритма коррекции погрешности позиционирования // Мехатроника и современная механика: Сб. науч. статей. – Минск: БГУИР, 2001. – С.36-41.

15. Дайняк И.В. Построение уравнений движения для многокоординатных систем автоматизированного оборудования // Машиностроение: Сб. научн. трудов. – Вып.18. – Минск: Технопринт, 2002. – С.290-293.

16. Карпович С.Е., Русецкий А.М., Дайняк И.В. Точные перемещения в автоматизированном оборудовании для электронного машиностроения // Машиностроение: Сб. научн. трудов. – Вып.18. – Минск: Технопринт, 2002. – С.305-310.

17. Tsianruk I., Dainiak I., Karpovich S. Highly Dynamic Precision Direct Drive Based on Rotary Modules // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol.1. – P.355-359.

18. Azentani D., Dainiak I., Ahranovich A. The Modeling of Planar Linear Step Motor Functioning on Basis of Multimedia // Scientific Proceedings. – Aachen: Shaker Verlag, 2004. – Vol.2. – P.505-510.

### Материалы научных конференций

19. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Дайняк И.В., Пушняков С.Н. Аналитические модели систем управления // Новые информационные технологии в науке и производстве: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 25-27 ноября 1998 г. – Минск: БГУИР, 1998. – С.23-24.

20. Karpovich S., Dainiak I. Program Motion Planning And Control For Multicoordinate Mechatronic Systems // Proceedings of 44-th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999. – Ilmenau: TU, 1999. – P.173-179.

21. Karpovich S., Dainiak I. Program Motion Planning And Control For Multicoordinate Robot Systems On The Base Of Linear Stepping Motors // Proceedings of International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), Koshice, November, 1999. – Koshice: TU, 1999. – P.98-103.

22. Karpovich S., Dainiak I. Calibration Algorithm for Control System of Stepping Motor // Proceedings of 45-th International Scientific Colloquium, Ilmenau Technical University (Germany), October 4-6, 2000. – Ilmenau: TU, 2000. – P.563-567.

24. Mezhytsky Y., Dainiak I., Yaroslavtsev A. Dynamics of programmed movements in multicoordinate systems // Proceedings of International Conference "Mechatronika-2000", Warszawa (Poland). – Warszawa, 2000. – P.88.

25. Orlyonok A., Karpovich S., Dainiak I. Program Motion Planning And Control For Multicoordinate Mechatronics Systems On The Base Of Linear Stepping Motors // Proceedings of the 14th Power Electronics And Electrical Drives International Conference (EDPE-2001), High Tatras, Slovakia, 3-5 October 2001. – Koshice: TU, 2001. – P.247-250.

26. Dainiak I. Quaternion Method for Trajectory Planning of Space Mechatronic Drives // Proceedings of 47th International Scientific Colloquium, Ilmenau Technical University (Germany), September 23-26, 2002. – Ilmenau: TU, 2002. – P.167-168.

27. Ahranovich A., Dainiak I., Karpovich S. Mathematical Modeling of Control System of DC Precision Drive Using MATLAB/SIMULINK // Proceedings of 48th International Scientific Colloquium, Ilmenau Technical University (Germany), September 22-26, 2003. – Ilmenau: TU, 2003. – P.429.

28. Dainiak I., Kovalev S., Pavlukovsky I. Control System of Precision Coordinate Systems Based on Linear Stepping Motors // Proceedings of 48th International Scientific Colloquium, Ilmenau Technical University (Germany), September 22-26, 2003. – Ilmenau: TU, 2003. – P.430.

29. Дайняк І.В., Трохимчук Р. Методи дискретизації трьохмерних об'єктів // Проблеми проектування і виробництва радіоелектронних засобів: Матеріали III Міжнарод. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26-28 мая 2004 г. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – Т.2. – С.109-112.

29. Dainiak I., Karpovich S. Building of Electromechanical Robot Systems with Non-Holonomic Constraints // Proceedings of 50th International Scientific Colloquium, Ilmenau (Germany), September 19-23, 2005. – TU-Ilmenau, 2005. – P.141-142.

#### Тезисы докладов

30. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Дайняк І.В. Построение программных движений в системах с линейными шаговыми двигателями // Тезисы докладов 2-го Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике "Механика-99", 28-30 июня 1999 г. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – С.386-387.

31. Дайняк І.В., Орленок А.Б. Реализация пространственных движений в прецизионном двухкоординатном приводе // Новые матем. методы и компьютер. технологии в проектировании, производстве и научн. исследованиях: Материалы VI Респ. конф., Гомель, 19-22 марта 2001 г. – Гомель: ІТУ, 2001. – С.147-148.

32. Дайняк І.В., Степанов Д.А., Ярославцев А.А. Математическое моделирование двухкоординатного линейного шагового привода // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: Сб. науч. тр. 5-го Международ. молодежного форума. – Ч.2. – Харьков: ХТУРЭ, 2001. – С.237-238.

33. Трохимчук Р., Дайняк І.В. Построение уравнений движения для многокоординатного шагового привода // Новые матем. методы и компьютер. технологии в проектировании, производстве и науч. исследованиях: Материалы VI Респ. конф., Гомель, 17-19 марта 2003 г. – Гомель: ГГУ, 2003. – С.141.

#### Патенты

34. Пат. 6986 Респ. Беларусь, СІ 2005.06.30. Механизм шагового перемещения / С.Е.Карпович, Ю.С.Межинский, А.В.Стреха, І.В.Дайняк, Д.А.Степанов. – № а 20000413; Заявл. 28.04.2000; Опубл. 30.06.2005. // Афіційны бюл. / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2005. – №2. – С.252.

35. Пат. 7005 Респ. Беларусь, С1 2005.06.30. Способ микрошагового управления шаговым двигателем и устройство для его осуществления / С.Е.Карпович, С.В.Ковалев, И.А.Павлюковский, Ю.С.Межинский, И.В.Дайняк. – № а 20000470; Заявл. 17.05.2000; Опубл. 30.06.2005. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – №2. – С.238.



Библиотека БГУИР

## РЭЗІЮМЭ

Дайняк Ігар Віктаравіч

МЕТАДЫ І СРОДКІ ФАРМІРАВАННЯ ПРАГРАМІРУЕМЫХ РУХАЎ  
У АБСТАЛЯВАННІ ВЫТВОРЧАСЦІ ВЫРАБАЎ МІКРАЭЛЕКТРОНІКІ

**Ключавыя словы:** праграміруемы рух, метады і сродкі фарміравання рухаў, прывод прамога дзеяння, мікракрокавае кіраванне, сплайнавая інтэрпаляцыя.

**Об'ектам даследавання** з'яўляюцца прэцызійныя каардынатыныя сістэмы перамяшчэнняў на базе электрапрывада прамога дзеяння.

**Прадметам даследавання** з'яўляюцца метады, алгарытмы і сродкі фарміравання дакладных і якасных праграміруемых рухаў, якія рэалізуюцца сістэмамі перамяшчэнняў у абсталяванні вытворчасці вырабаў мікраэлектронікі.

**Мэта працы** заключаецца ў распрацоўцы метадаў і сродкаў фарміравання праграміруемых рухаў, якія дазваляюць павысіць дакладнасць і хуткадзеянне прэцызійнага абсталявання вытворчасці вырабаў мікраэлектронікі.

Прапанаваны агульны падыход і аналітычныя метады на яго аснове фарміравання праграміруемых рухаў, які, у адрозненне ад вядомых, пабудаваны на давызначэнні сістэмы дыферэнцыяльных ураўненняў руху вядомай структуры функцыянальнымі членамі з шукаемымі кіраваннямі, атрыманымі на аснове праграмы руху, якая задаецца для сістэмы перамяшчэнняў. Распрацаваны вылічальныя алгарытмы фарміравання пазіцыйных і контурных праграміруемых рухаў для розных рэжымаў перамяшчэнняў, а таксама алгарытмы інтэрпаляцыі контурных праграміруемых рухаў на аснове рэкурэнтных алгарытмаў.

Прапанавана тэхнічная прылада фарміравання планарных плоскапаралельных рухаў з абмежаваннем развароту і прадухіленнем «перакульвання» індуктара, якое дазволіла павысіць паскарэнне перамяшчэнняў у 1,2...1,5 раза з захаваннем метралагічных характарыстык дакладнасці ва ўсім дыяпазоне перамяшчэнняў. Распрацаваны спосаб мікракрокавага кіравання, які прыводзіць да пашырэння на 15...20% дынамічнага дыяпазону работы сістэмы перамяшчэнняў на базе прывада прамога дзеяння і тым самым дазваляе павысіць прадукцыйнасць абсталявання.

Распрацаваныя метады і сродкі фарміравання праграміруемых рухаў, якія рэалізуюцца многакаардынатынымі прывадамі прамога дзеяння, былі выкарыстаны на прадпрыемствах «Рухсерватор» і «ЛОТІС-ТІП» пры стварэнні прэцызійнага абсталявання з павышанымі характарыстыкамі дакладнасці і хуткадзеяння. Атрыманыя вынікі могуць быць рэкамендаваны для выкарыстання ў абсталяванні любога прызначэння, у якім тэхналагічныя аперацыі пабудаваны на прэцызійных каардынатыных перамяшчэннях.

## РЕЗЮМЕ

Дайняк Игорь Викторович

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБОРУДОВАНИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

**Ключевые слова:** программируемое движение, методы и средства формирования движений, привод прямого действия, микрошаговое управление, сплайновая интерполяция.

**Объектом исследования** являются прецизионные координатные системы перемещений на базе электропривода прямого действия.

**Предметом исследования** являются методы, алгоритмы и средства формирования точных и качественных программируемых движений, реализуемых системами перемещений в оборудовании производства изделий микроэлектроники.

**Цель работы** состоит в разработке методов и средств формирования программных движений, позволяющих повысить точность и быстродействие прецизионного оборудования производства изделий микроэлектроники.

Предложен общий подход и аналитические методы на его основе формирования программируемых движений, который, в отличие от известных, построен на доопределении системы дифференциальных уравнений движения известной структуры функциональными членами с искомыми управлениями, полученными на основании задаваемой для системы перемещений программы движения. Разработаны вычислительные алгоритмы формирования позиционных и контурных программируемых движений для различных режимов перемещений, а также алгоритмы интерполяции контурных программируемых движений на основе рекуррентных параметрических алгоритмов.

Предложено техническое устройство формирования планарных плоско-параллельных движений с ограничением разворота и предотвращением «опрокидывания» индуктора, которое позволило повысить ускорение перемещений в 1,2...1,5 раза с сохранением метрологических характеристик точности во всем диапазоне перемещений. Разработан способ микрошагового управления, который приводит к расширению на 15...20% динамического диапазона работы системы перемещений на базе привода прямого действия и тем самым позволяет повысить производительность оборудования.

Разработанные методы и средства формирования программируемых движений, реализуемые многокоординатными приводами прямого действия, были использованы на предприятиях «Рухсервомотор» и «ЛОТИС-ГИИ» при создании прецизионного оборудования с повышенными характеристиками точности и быстродействия. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в оборудовании любого назначения, в котором технологические операции построены на прецизионных координатных перемещениях.



## RESUME

**Dainiak Igar**

### METHODS AND MEANS FOR THE FORMING OF PROGRAMMABLE MOTIONS IN EQUIPMENT FOR MANUFACTURING OF MICROELECTRONIC PRODUCTS

**Keywords:** Programmable motion, methods and means for the forming of motions, direct drive, microstepping control, spline interpolation.

**The research object** is precision coordinate motion systems based on direct electro-drives.

**The research subject** is methods, algorithms and means for the forming of precise and high-quality programmable motions, which are realized by motion systems within equipment for manufacturing of microelectronic products.

**The aim of thesis** is consisted of developing of methods and means for the forming of programmable motions, which allow increasing accuracy and operating speed of precision equipment for manufacturing of microelectronic products.

The general approach and analytical methods, based on it, for the forming of programmable motions is proposed, which, in contrast to known approaches, is built on determination of motion differential equation system with known structure by functional members with sought controls. These controls are obtained by means of movement program for motion system. The calculation algorithms for the forming of position and contour programmable motions of different movement modes, as well as interpolation algorithms of contour programmable motions built on recurrent parametric algorithms, are developed.

The technical device for the forming of planar plane-parallel movements with the limitation of turning and the prevention of inductor's "upset" is suggested. This device allows to increasing of motion acceleration in 1,2...1,5 times with the preservation of metrological characteristics of accuracy within whole range of movements. The method of microstepping control is developed, which leads to enlarging of dynamical working range of motion system based on direct drive by 15...20%, and thereby allows increasing the productivity of equipment.

Developed methods and means for the forming of programmable motions, which are realized by multi-coordinate direct drives, were used on enterprises "Ruchservomotor" and "LOTIS-TII" at the creating of precision equipment with higher characteristics of accuracy and operating speed. The results obtained can be recommended for using in equipment of any purpose, in which technological operations are built on precision coordinate motions.

ДАЙНЯК ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ  
ПРОГРАММИРУЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В ОБОРУДОВАНИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ 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	27.10.2006.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.		Заказ 661.

---

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. Бровки, 6.