

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.9.048:681.7.064

Дау Мохамед Азентани

**ДВУХКООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 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, доцент
Ланин Владимир Леонидович
(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра электронной техники и технологии)

кандидат технических наук, доцент
Самойленко Александр Васильевич
(Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет», кафедра робототехнических систем)

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

Защита состоится 19 октября 2006 года в 14⁰⁰ 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. Развитие микроэлектроники связано, в первую очередь, с уменьшением топологической нормы и увеличением размеров кремниевых пластин, которые, кроме совершенствования технологии производства, в первую очередь требуют совершенствования технологического оборудования, особенно такого как сборочное, предъявляя к нему требования: большей точности позиционирования, более высокого разрешения, более высокой производительности, больших диапазонов перемещений. Это, в первую очередь, установки зондового контроля, разделения пластин на кристаллы, установки экспонирования и контроля на операциях фотолитографии, установки разварки проволочных выводов и др., для которых производительность и точность работы в основном определяются техническими возможностями и характеристиками их координатных систем перемещений. При этом с каждым шагом уменьшения топологической нормы и увеличения размера кремниевых пластин еще более возрастают требования к координатным системам перемещений, которые в настоящее время, как правило, строятся на электромагнитных модулях движения, komponуемых в линейные шаговые двигатели (ЛШД) различных конфигураций с соответствующей цифровой системой управления. Они характеризуются модульностью, однотипностью независимо от характера вида движения и управления, возможностью работы по программе от ЭВМ как в разомкнутых системах, так и в системах обратной связи, позволяют обеспечивать реализацию сложных многокоординатных и точно согласованных перемещений кремниевых пластин и технологического инструмента с широким варьированием параметров движения.

Несмотря на широкую номенклатуру координатных приводов и систем перемещений, используемых в оборудовании микроэлектроники, особое место занимают двухкоординатные планарные позиционеры. Это двухкоординатные системы перемещений на базе планарных ЛШД, реализующие любые движения в плоскости по двум независимым координатам без дополнительных механических трансмиссий. Достижение более высоких характеристик точности и быстродействия таких систем невозможно без углубленного их математического и компьютерного моделирования, без использования современной контроллерной техники и современных программных средств разработки, имитационного моделирования с целью обеспечения оптимальной структуры и состава аппаратно-программной реализации.

В связи с этим задачи по разработке двухкоординатной системы перемещений на базе привода прямого действия для сборочного оборудования микроэлектроники, включающие углубленное математическое и компьютерное моделирование самого планарного привода и системы управления с аппаратно-программной реализацией на микропроцессорах последнего поколения, являются весьма актуальными для совершенствования существующего сборочного оборудования, разработки и создания нового его поколения с расширенным диапазоном динамических и точностных характеристик.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках тематики научно-исследовательских работ, выполняемых в Учебно-научной лаборатории Математического Моделирования Технических Систем и Информационных Технологий (ММТСиИТ) при кафедре высшей математики. Исследования и разработки, отраженные в диссертации, непосредственно связаны с долговременной программой научно-исследовательских работ, которые проводились и проводятся по отдельным совместным проектам лаборатории ММТСиИТ и ГНПК ТМ «ПЛАНАР», лаборатории ММТСиИТ и СП «Рухсервомотор» по разработке и созданию прецизионных координатных систем на базе электропривода прямого действия для технологического оборудования производства изделий электронной техники и других применений.

Ряд задач по разработке математических и компьютерных моделей двухкоординатной системы перемещений на базе планарного привода прямого действия, решаемых в диссертации, тематически связаны и решались в соответствии с ГПОФИ «Механика» в рамках задания «Механика-35» по теме «Исследование динамики процесса управления в мехатронных системах на базе привода прямого действия для технологического оборудования в машиностроении» (2003-2005 гг., № госрегистрации 20053974); «Построение программных движений планарных позиционеров для оборудования производства электронной техники» (2004-2006 гг., № госрегистрации 20042523) по договору Т04М-087 с БРФФИ; «Методы расчета и построения координатных систем на базе электропривода прямого действия для электронного машиностроения» (2004 г., № госрегистрации 20042077) по заданию Министерства образования РБ.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит в разработке двухкоординатной системы перемещений для сборочного оборудования микроэлектроники на основе планарного привода прямого действия с системой управления на базе процессора серии TMS 320.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Анализ систем перемещений современного сборочного оборудования, используемого в микроэлектронике.
2. Обоснование концепции блочно-модульного построения систем перемещений на базе планарного привода прямого действия.
3. Формирование и оценка статических и динамических характеристик двухкоординатной систем перемещений на планарном приводе и ее модификаций.
4. Разработка математической модели планарного привода прямого действия и системы управления мехатронной системы перемещений, построенной на ее основе.
5. Разработка компьютерной модели планарного привода и его системы управления с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink.
6. Верификация компьютерной модели планарного привода прямого действия с использованием инструментария System Identification Toolbox.
7. Аппаратно- программное моделирование системы управления планарным приводом прямого действия, построенной на основе процессора eZdsp TMS320F2812

с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink, а также инструментария Real-Time Windows Target и xPC target.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования, в соответствии с целью работы, является двухкоординатная система перемещений на базе планарного привода прямого действия. Предметом исследования является аппаратно-программная реализация двухкоординатной системы перемещений с повышенными динамическими и точностными характеристиками, достигаемыми за счет математического и компьютерного моделирования самой исполнительной системы перемещений и аппаратно-программного моделирования ее системы управления.

Гипотеза. Двухкоординатная систем перемещений на базе планарного привода прямого действия с микропроцессорным управлением и соответствующим программным обеспечением может быть использована в сборочном оборудовании микроэлектроники как автономный мехатронный узел координатного позиционирования и траекторных 2D перемещений кремниевой пластины или инструмента со своей системой управления и единой программной средой разработки и реализации требуемых перемещений с алгоритмами регулирования, формируемыми в пространстве состояний. При этом обеспечивается модульность конструкции, независимость локальной системы управления с ее аппаратно-программным интерфейсом, высокая гибкость при реализации адаптивного регулирования на основе верификационных алгоритмов, возможность использования нескольких (2-х, 3-х и более) двухкоординатных планарных систем в едином рабочем пространстве статора за счет программного согласования их взаимного позиционирования и траекторных перемещений.

Методология и методы проведенного исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач были использованы различные взаимодополняющие методы физического, математического и компьютерного моделирования.

При разработке математических моделей для расчета статических и динамических характеристик двухкоординатного позиционера были использованы методы аналитической механики, теории электрических машин, электромагнитного преобразования энергии, методы анализа и синтеза исполнительных механизмов, реализующих требуемые программные движения, аналитические и численные методы решения дифференциальных уравнений и их систем, разработанные алгоритмы и программы для выполнения численных расчетов на ПЭВМ.

Экспериментальные исследования были проведены на предприятии «Рухсервомотор» на специальном стенде, включающем двухкоординатную систему перемещений на базе планарного привода прямого действия и прецизионное измерительное оборудование с использованием статистических методов регистрации и обработки наблюдаемых в эксперименте величин.

Практическая проверка и тестирование алгоритма верификации, разработанных алгоритмов регулирования системы управления проводилось на планарных приводах PF-211.HS, производимых на предприятии «Рухсервомотор», г. Минск.

При разработке программного обеспечения локальной системы управления двухкоординатной системы перемещений на базе планарного привода прямого

действия были использованы методы структурного и объектно-ориентированного программирования.

Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставлением результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных с использованием верификационной методики.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна и значимость определяются комплексным научным подходом к решению задач, связанных с разработкой двухкоординатных систем перемещений на базе планарного привода прямого действия, который заключается в приведении рассматриваемого объекта к единому механо-аппаратно-программному комплексу с единой программой среды разработки и реализации в оборудовании. Система перемещений, построенная на основе такого подхода, в полной мере является мехатронной системой перемещений.

Наиболее значимые научные результаты заключаются в следующем:

1. Предложена математическая модель, описывающая пространство состояний планарного привода прямого действия, динамические условия построения программных движений двухкоординатных систем на базе планарного привода прямого действия с возможностью работы при любой ориентации статора в трехмерном пространстве в структурах управления как разомкнутого типа, так и с обратной связью по различным алгоритмам регулирования.

2. Разработана компьютерная модель в среде MATLAB/Simulink планарного привода двухкоординатной системы перемещений, которая выполнена в блочно-модульном представлении, причем каждый блок компьютерной модели позволяет формализовать вычислительную процедуру на базе простейших структурных схем вычислителей, используемых в MATLAB/Simulink, позволяющая проводить углубленное компьютерное исследование характеристик точности и быстродействия двухкоординатных систем перемещений с возможностью оптимального выбора алгоритмов и параметров регулирования системы управления.

3. Разработан алгоритм и программное обеспечение верификации компьютерной модели, которые позволили в режиме реального времени рассчитывать и изменять параметры пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) системы управления и, тем самым, адаптировать управление к изменяющимся условиям. Использование алгоритмов верификации в системах управления планарным приводом позволило повысить их точность в 1,2...1,5 раза, и динамику в 1,5...1,7 раза по сравнению с серийно выпускаемым на предприятии «Рухсервомотор».

4. Разработана методика компьютерного моделирования аппаратно-программного комплекса системы управления планарным приводом прямого действия двухкоординатной системы перемещений, выполнена его имитационная реализация путем компьютерного моделирования системы управления, построенной на базе контроллера с процессором серии TMS 320 и использующего программную среду разработки MATLAB/Simulink. Использование подходов xPC Target и Real-Time Windows Target позволило аппаратно и программно сконфигурировать стенд на взаимодействии двух компьютеров и реализовать аппаратно-программную систему

для тестирования и отладки сгенерированного программного кода системы управления планарным приводом с регуляторами, использующими информацию о всех учитываемых в компьютерной модели переменных пространства состояний. Проведенное компьютерное моделирование с регуляторами, построенными на основе анализа динамики и алгоритмов управления в пространстве состояний, показало, что качество регулирования может быть повышено по сравнению с ПИД- регулятором в 1,4...1,7 раз.

Практическая значимость полученных результатов.

1. Обоснован подход к блочно-модульному построению систем перемещений автоматизированного оборудования микроэлектроники. Предложена структура двухкоординатной мехатронной системы перемещений на базе планарного привода прямого действия и контроллера системы управления на основе процессора TMS 320.

2. На основании разработанных математической модели и компьютерной модели с использованием среды MATLAB/Simulink создано программное обеспечение, позволяющее при практической разработке двухкоординатных систем перемещений на базе планарного привода прямого действия проводить компьютерное имитационное моделирование, анализ динамических и точностных параметров в зависимости от выбранного регулятора системы управления с возможностью оптимального выбора его настраиваемых параметров.

3. Разработанные алгоритмы и программа верификации компьютерной модели с использованием программного инструментария System Identification Toolbox непосредственно предназначены для использования в сборочном оборудовании производства изделий микроэлектроники в программном обеспечении системы управления планарным приводом прямого действия. Они позволяют в режиме реального времени реализовать адаптивную настройку ПИД- регулятора, обеспечивая повышение точности системы перемещений в 1,2...1,5 раза и ее быстродействия в 1,5...1,7 раз.

4. Предложенная в работе методика аппаратно-программного моделирования системы управления планарным приводом прямого действия была программно реализована на основе имитационной модели выбранного в работе контроллера, построенного на базе процессора eZdsp TMS320F2812 с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink, а также инструментария Real-Time Windows Target и xPC Target. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить тестирование и отладку сгенерированного кода системы управления планарного привода прямого действия до разработки опытного образца, исключая обычное непосредственное макетирование и натурное стендовое тестирование.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Построение двухкоординатной системы перемещений на основе планарного привода прямого действия с аппаратно-программной реализацией системы управления на платформе процессора серии TMS320.

2. Обобщенная математическая модель планарного привода, позволяющая в пространстве состояний выполнять его компьютерное моделирование.

3. Компьютерная модель системы управления планарного привода двухкоординатной системы перемещений в среде MATLAB/Simulink.

4. Алгоритмы верификации компьютерной модели, позволяющей в режиме реального времени вычислять и адаптировать и адаптировать к изменяющимся условиям параметры ПИД- регулятора системы управления.

5. Методика аппаратно-программного моделирования системы управления планарным приводом в среде MATLAB/Simulink.

Личный вклад соискателя. В диссертации представлены результаты работ, которые были выполнены автором самостоятельно и в соавторстве. Большинство из них автор был инициатором, разрабатывал математические и компьютерные модели и методики исследований, проводил расчеты и эксперименты, осуществлял обработку, анализ и обобщение полученных результатов. Определение структуры целей и задач теоретической и экспериментальной частей, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследования проводилось совместно с научным руководителем д.т.н., проф. С.Е. Карповичем. Интерпретация и обобщение полученных результатов на сборочное автоматизированное оборудование микроэлектроники выполнялось совместно с С.А. Русецким. В работах [1,3-6,12] опубликованы результаты, полученные совместно с А.А. Аграновичем. В остальных работах, написанных автором совместно, соавторы принимали участие в обосновании подходов к решению поставленных задач, частично выполняли программную реализацию алгоритмов и экспериментальные исследования.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы были опубликованы в научных изданиях и доложены, обсуждены и опубликованы в трудах и тезисах международных и республиканских симпозиумов, научно-технических конференций и семинаров. Среди них: III Международная научно-техническая конференция «Проблемы проектирования и производства радиолетронных средств» (Новополоцк, Беларусь, 2004 г.); IX и X Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (Нарочь, Беларусь, 2004 г., 2005 г.); VIII и IX Международная школа-семинар аспирантов, магистрантов и студентов «Современные информационные технологии» (Браслав, Беларусь, 2005 г., 2006 г.); 49-th и 50-th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (Ilmenau, Germany, 2004 г., 2005 г.), VII и VIII Республиканская научная конференция молодых ученых «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, Беларусь, 2004 г., 2005 г.); 41 и 42 научно-техническая конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь, 2004 г., 2005 г.).

Опубликованность результатов.

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 16 печатных работах, из которых 4 статьи в научных журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов, 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 3 тезисов докладов на научных конференциях. Общий объем опубликованных по теме диссертации материалов составляет 48 страниц. В совместно опубликованных научных работах автору принадлежит 23 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы и 6 глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников, списка публикаций автора и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 171 страницу, в том числе 91 страница основного текста, 81 рисунок на 32 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 119 наименований на 12 страницах, список публикаций автора, содержащий основные научные результаты диссертации из 16 наименований на 2 страницах и 6 приложений на 32 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В общей характеристике работы обосновано направление, актуальность и новизна выбора темы диссертации, перспективность поставленных в работе научно-исследовательских задач, вытекающих из сформулированной цели. Сформулированы основные положения диссертации, выносимые на защиту, приведены основные научные и практические результаты, определена новизна и области применения аппаратно-программных модулей планарных систем перемещений.

В первой главе на основе анализа научно-исследовательских работ, материалов патентной и периодической литературы, конструктивных особенностей сборочного оборудования для производства изделий микроэлектроники проведена классификация систем перемещений по числу и характеру координатных движений, необходимых для выполнения сборочных операций, включая следующие основные операции: зондовый контроль; разделение полупроводниковых пластин на кристаллы; нанесение защитных покрытий; посадка отдельных кристаллов в корпус; сортировка и классификация кристаллов; монтаж проволочных выводов ультразвуковой сваркой; монтаж проволочных выводов термокомпрессионной сваркой.

Показано, что базовыми являются двухкоординатные перемещения в плоскости, и поэтому двухкоординатная система перемещений на базе планарного привода прямого действия является наиболее востребованной при создании и серийном производстве автоматизированного оборудования производства изделий микроэлектроники.

Необходимость перехода к новым топологическим нормам, постоянно растущие требования производства по повышению точности, быстродействия, гибкости самого оборудования, модульности и унификации различных его базовых узлов и анализ путей решения этой проблемы привели к разработке и необходимости реализации подхода к построению систем перемещений на основе многоцелевого модульного построения и использования планарного привода, который должен рассматриваться как мехатронная система в виде базового механо-аппаратно-программного модуля перемещений оборудования с автономными каналами энергообеспечения, подачи воздуха и информационным каналом системы управления от персонального компьютера. В этом случае полностью обеспечивается слияние технологических и транспортных перемещений, осуществляемых в плоскости координатного стола.

Проанализированы структурные схемы систем управления наиболее типового серийного сборочного оборудования, в результате показано, что современная электронная база и программное обеспечение позволяют разрабатывать новые более совершенные алгоритмы управления, реализуемые в пространстве состояний по

результатам углубленного математического моделирования, которое в сочетании с программными возможностями среды MATLAB/Simulink существенно повышают эффективность разработки как планарного привода, так и двухкоординатной системы перемещений, обеспечивая ей повышение характеристики точности и быстродействия. На основании проведенного в главе анализа сформулированы цель и задачи исследования диссертационной работы.

Во второй главе представлен анализ типовых конструкций и их модификации, состав и принцип действия, варианты исполнения элементарных электромагнитных модулей движения, а также анализ статических и динамических характеристик планарного привода прямого действия с оценкой основных факторов, влияющих на устойчивость его работы. Обоснован выбор в качестве элементарного электромагнитного модуля движения (рис. 1) индукторного электромагнитного модуля с однофазной обмоткой управления и промежуточным постоянным магнитом.

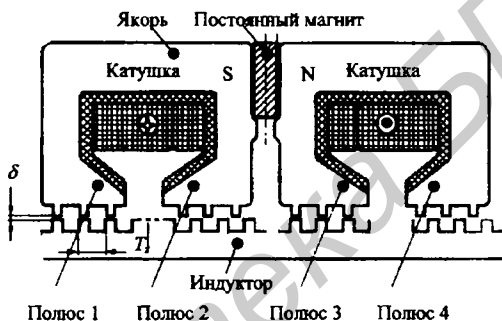


Рис. 1. Элементарный электромагнитный модуль движения

При этом каждая координата x и y планарного привода формируется из набора определенного количества элементарных модулей движения, симметрично расположенных относительно центра масс индуктора (рис. 2).

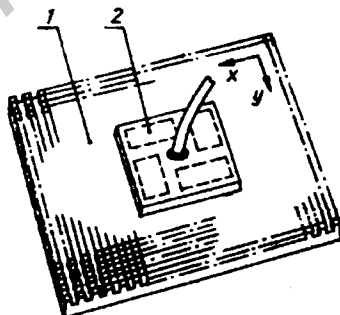


Рис. 2. Двухкоординатный планарный ЛШД:
1- статор; 2- элементарный модуль движения

Теоретическое ускорение привода может быть рассчитано по формуле

$$a_T = \frac{F_{\max}}{m_n + m_{\text{нагр}}}, \quad (1)$$

где m_u – масса индуктора; $m_{нагр}$ – масса нагрузки.

Замечательной особенностью при этом является то, что его теоретическое ускорение (1) практически не зависит от размеров индуктора, так как с увеличением активной площади индуктора $S_{акт}$ электромагнитная сила $F_{max} = \beta_S \cdot S_{акт}$ при $\beta_S = const$ и масса индуктора $m_u = \mu_u \cdot S_{акт}$ изменяются пропорционально

$$\frac{F_{max}}{m_u} = \frac{\beta_S}{\mu_u} = const, \quad (2)$$

где β_S – удельная тяговая сила; μ_u – удельная масса индуктора.

Следует отметить, однако, что нарушение нормальной работы привода через внешние воздействия регулярного или случайного характера приводят к снижению динамической добротности, поскольку сводятся в конечном итоге к уменьшению тягового усилия F_{max} на величину ΔF . Это в свою очередь приводит к уменьшению теоретического ускорения на величину

$$\Delta a = \frac{\Delta F}{m_u + m_{нагр}}, \quad (3)$$

что может привести к непредусмотренному изменению программы движения.

Поддержание высокой функциональности планарного привода прямого действия возможно только путем построения развитой системы управления с регулированием динамики движения в пространстве состояний по специальным алгоритмам, которые могут быть получены только углубленным математическим и компьютерным моделированием двухкоординатной системы перемещений как мехатронной системой, представляющей механо-аппаратно-программный комплекс.

Планарный привод (рис. 2) позволяет выполнять независимые ортогональные перемещения по координатам x и y , при этом практически исключается разворот индуктора в плоскости движения за счет развиваемого планарным приводом синхронизирующего момента, удерживающего платформу координатной системы в положении, ориентированном вдоль осей x и y статора.

Этот момент возникает при любой попытке платформы к развороту и ограничивает фактический угол поворота весьма малыми значениями, которые зависят от геометрии зубцовой структуры воздушного зазора и размещения магнита на активной поверхности индуктора. В связи с тем, что достаточно просто может быть реализовано раздельное управление в обоих плечах одной координаты, то возможна реализация управляемого разворота индуктора в пределах малых углов. В работе рассмотрены две другие конструктивные модификации планарного привода с ортогональными независимыми перемещениями и конструктивная модификация, построенная на основе двух планарных ЛШД, позволяющая реализовать независимые координатные перемещения x и y , а также независимый неограниченный поворот платформы в плоскости координатных перемещений (рис. 3).

Подвижная платформа состоит из общего корпуса и двух индукторов I и II, каждый из которых представляет собой двухкоординатный электромагнитный модуль. Индукторы I и II укреплены с возможностью вращения относительного общего корпуса вокруг осей O_I , O_{II} , перпендикулярных плоскости статора. При коммутации обмоток управления каждый индуктор развивает при перемещении

усилие, максимальное значение которого пропорционально амплитуде токов обмоток управления индукторов.

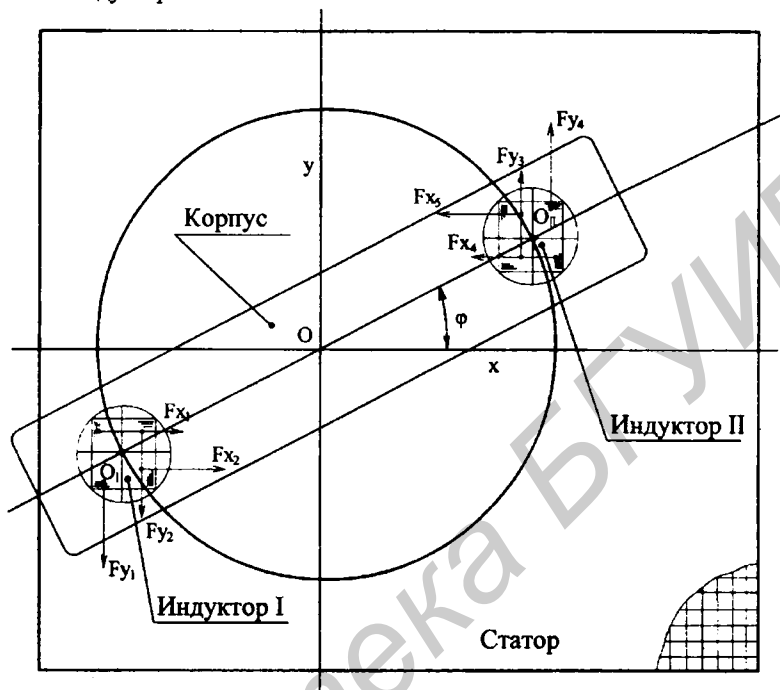


Рис. 3. Конструктивное исполнение планарного ЛШД с неограниченным углом разворота в плоскости движения

Усилия симметричных плеч одноименных координатных зон каждого из модулей I и II при коммутации обмоток обеспечиваются одинаковыми. Так, для координаты x будем иметь:

$$F_{x1} = F_{x2} = \frac{F_{xI}}{2};$$

$$F_{x3} = F_{x4} = \frac{F_{xII}}{2},$$
(4)

где F_{xI} и F_{xII} — усилия, развиваемые, соответственно I и II индукторами по координате x .

Аналогичные выражения справедливы для координаты y .

Коммутация обмоток токами одинаковой амплитуды и частоты вызывает плоскопараллельное перемещение общего корпуса индукторов, при этом должно выполняться условие:

$$F_{xI} = F_{xII}, \quad F_{yI} = F_{yII}.$$
(5)

Для осуществления движения корпуса индукторов по любой траектории с изменением угла поворота следует коммутировать обмотки управления индукторов I и II токами различной частоты, амплитуды и с различным чередованием электрических состояний.

Например, для осуществления кругового вращения корпуса требуется обеспечить следующее изменение усилий индукторов I и II:

$$\begin{aligned} F_{xI} &= -F_{xII} = F_{x\max} \cdot \sin \varphi ; \\ F_{yI} &= -F_{yII} = F_{y\max} \cdot \cos \varphi . \end{aligned} \quad (6)$$

Основное достоинство конструкции подвижной платформы, показанной на рис. 3, заключается в том, что в процессе движения полностью исключается влияние перекоса зубцов, а значит и потеря тяговой силы. При этом синхронизирующие усилия и синхронизирующий момент поддерживаются неизменными, независимо от уровня динамического рассогласования, определяемого нагрузкой.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследований по разработке математической модели электромагнитного взаимодействия в планарном приводе прямого действия.

Разработанная математическая модель базируется на уравнениях, описывающих электрические, магнитные и механические состояния электромагнитной системы индуктор-статор планарного привода, совместный анализ которых позволил получить аналитическую функцию для расчета координатного тягового усилия планарного привода как функцию от соответствующих потоков и текущей координаты:

$$F = R_{G0} \frac{4\pi k_G}{\tau} \left(\Phi_{23} \Phi_{pm.A} \cos \frac{2\pi x}{\tau} - \Phi_{67} \Phi_{pm.B} \sin \frac{2\pi x}{\tau} \right), \quad (7)$$

где $\Phi_{23} = \Phi_2 + \Phi_3$ – общий поток через электрическую обмотку в фазе А;

$\Phi_{67} = \Phi_6 + \Phi_7$ – общий поток через электрическую обмотку в фазе В;

$\Phi_{pm.A}$ и $\Phi_{pm.B}$ – магнитные потоки постоянного магнита, соответственно в фазах А и В;

R_{G0} – постоянная составляющая магнитного сопротивления воздушного зазора;

k_G – нормализованная амплитуда магнитного сопротивления воздушного зазора;

τ – период зубцовой структуры;

x – текущая координата, в качестве которой может выступать как x , так и y .

При разработке обобщенной математической модели учитывались: нелинейный характер зависимости магнитного сопротивления от геометрии воздушного зазора индуктор-статор; текущая координата смещения индуктора относительно статора; положение рабочей точки двигателя на кривой намагничивания.

Разработанная математическая модель позволяет физическую модель планарного привода представить в пространстве состояний с возможностью формулирования и решения задач компьютерного моделирования в самых разных постановках и при самых различных начальных условиях.

В четвертой главе представлена разработанная компьютерная модель планарного привода прямого действия в среде MATLAB/Simulink, полученная на основе дифференциальных уравнений, описывающих динамическое состояние привода. Компьютерная модель является модульной, состоящей из отдельных

вычислительных блоков:

- блок генерации потоков Φ_i ;
- блок расчета магнитного сопротивления R_i на различных участках магнитопровода индуктор- статор;
- блок расчета тягового усилия по координате x и y ;
- блок вычисления параметров регулятора.

Разработанное программное обеспечение позволяет анализировать динамику покоординатного движения планарного шагового двигателя в пространстве состояний, в соответствии с полученной системой дифференциальных уравнений первого порядка, для которой задаваемыми величинами являлись токи i_A , i_B , а расчетными являлись тяговое усилие F , координата смещения индуктора x и ее производная \dot{x} . Структурная блок-схема системы управления, воспроизведенная в работе в среде MATLAB/Simulink, представлена на рис. 4.

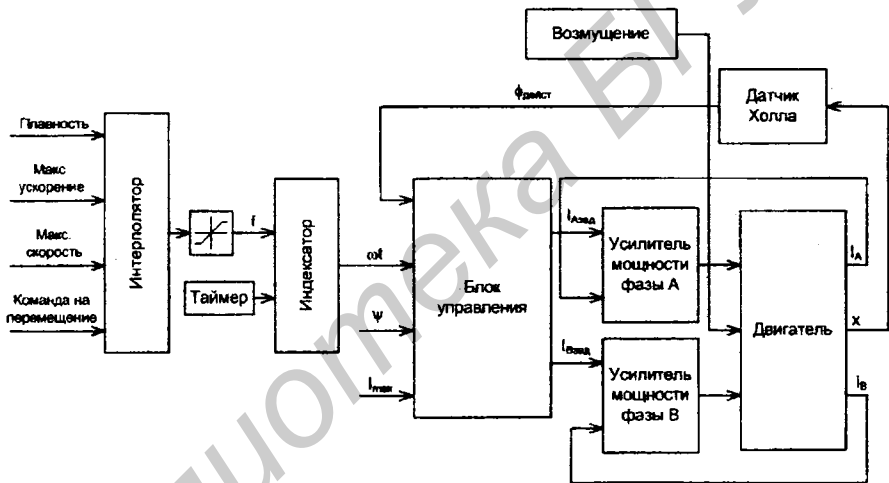


Рис. 4. Структурная схема системы управления

Система управления планарным приводом состоит из следующих основных модулей: интерполятора; индеклятора; блока управления; усилителей мощности фазы А и фазы В; шагового двигателя, реализующего раздельное управление по координатам x и y .

Интерполятор представляет собой программную реализацию заданной скорости перемещения индуктора. Индексатор определяет заданное положение по входному сигналу скорости. Блок управления предназначен для преобразования сигналов управления в шаговые команды. Усилители, соответственно для фазы А и В, представляют собой блоки, преобразующие токовую команду в электрический ток, подаваемый на фазные обмотки.

Наиболее сложным элементом модели компьютерной системы управления является компьютерная модель самого шагового двигателя. Его блок-схема, разработанная в среде MATLAB/Simulink, представлена на рис. 5.

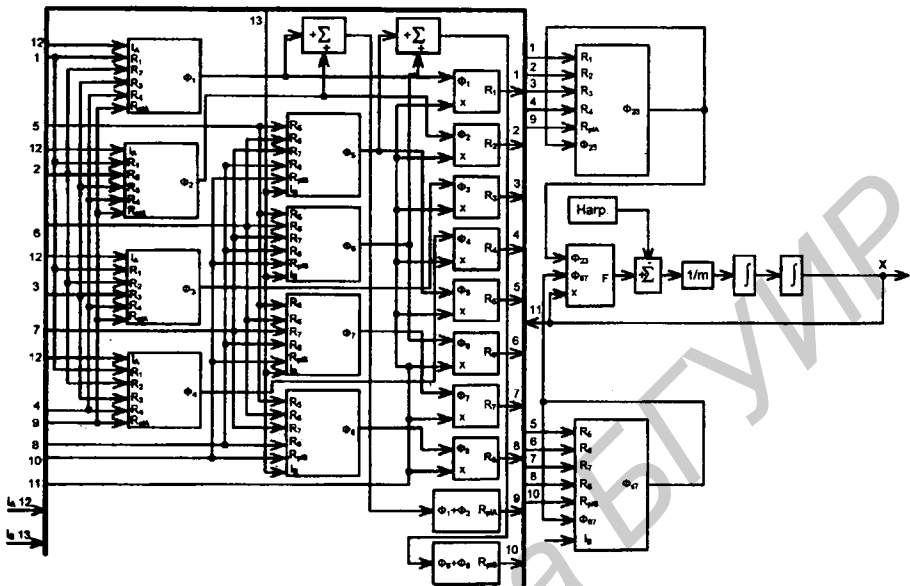


Рис. 5. Блок-схема модели шагового двигателя

Разработанная компьютерная модель позволяет моделировать динамику планарного привода прямого действия отдельно и независимо по каждой координате x и y при различных алгоритмах регулирования и различных начальных условиях.

Разработанное программное обеспечение компьютерного моделирования по схеме управления, представленной на рис. 4, с использованием ПИД-регулятора позволило получить динамические характеристики планарной системы перемещений при различных величинах ступенчатого воздействия и различных коэффициентах регулирования. Модель позволяет через параметры регулирования влиять на стадии движения разгон и торможение, которые, как известно, в наибольшей степени определяют быстродействие и точность системы перемещений.

В пятой главе представлены результаты по верификации разработанной компьютерной модели планарного привода, которая предполагает оперирование при анализе как экспериментальными данными, так и данными, полученными в ходе компьютерного эксперимента. Для получения необходимых экспериментальных данных для верификации компьютерной модели был разработан и создан измерительный стенд на базе планарного привода прямого действия LSM-PF 211.HS, серийно изготавливаемого на предприятии «Рухсервомотор». Структурная схема стенда показана на рис. 6.

Для целей верификации в работе была предложена и реализована система управления с возможностью проведения измерения параметров, необходимых для построения передаточной функции привода. Были получены экспериментальные данные реакции системы на ступенчатые воздействия, позиционной ошибки и

управляющих токов. Обработка этих данных позволила получить экспериментальную передаточную функцию для привода LSM-PF 211.HS, по которой и проводилась верификация.

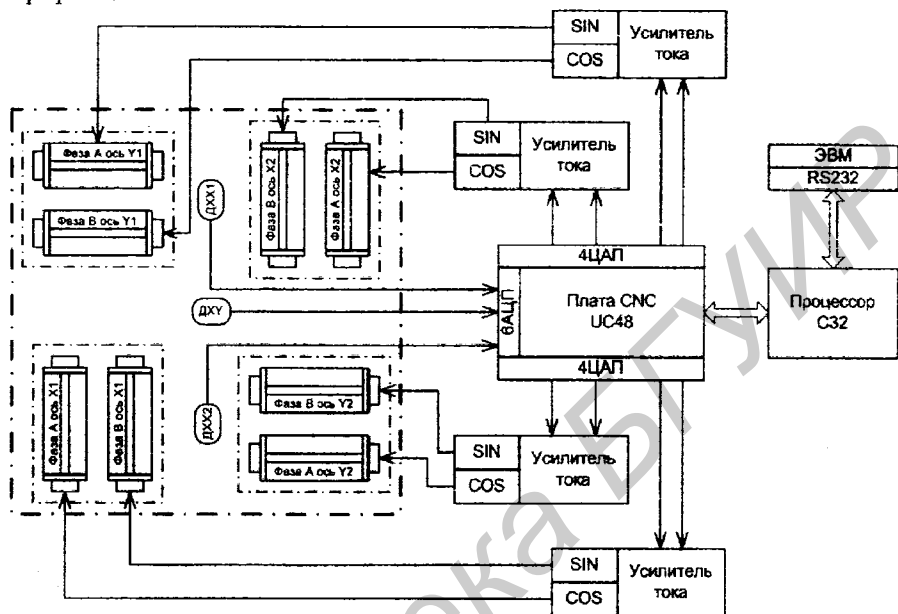


Рис. 6. Структурная схема стенда для верификации компьютерной модели

Согласно предложенной методике и алгоритму верификации, разработанному на ее основе, экспериментальные данные анализировались в три этапа. На первом этапе анализа с помощью инструментария MATLAB строится передаточная функция системы $W_o(s)$. На втором этапе передаточная функция $W_f(s)$ строится исходя из данных, полученных на первой половине временного интервала, а данные, полученные на втором интервале измерений, использовались для построения передаточной функции $W_2(s)$. После этого строится усредненная передаточная функция системы $W_{exp}(s)$. По результатам компьютерного моделирования производится построение передаточной функции модели $W_{mod}(s)$ и последующее сравнение ее с передаточной функцией $W_{exp}(s)$. На основании анализа этих двух передаточных функций с помощью инструментария MATLAB System Identification Toolbox делается вывод об адекватности построенной модели.

Инструментарий MATLAB System Identification Toolbox предоставляет возможность анализировать данные с использованием ряда верификационных методов: ARX, PEM и др.

Передаточная функция системы управления планарного привода, полученная в результате верификации, имеет вид:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{0.9389s + 0.5411}{s^2 + 0.6211s + 0.5335}, \quad (8)$$

где $X(s)$ и $U(s)$ – функции преобразования Лапласа соответственно для входного и выходного сигналов; s – комплексная переменная.

Разработанный алгоритм и программное обеспечение верификации предложенной модели позволяет в режиме реального времени по результатам пересчета коэффициентов ПИД-регулятора менять передаточную функцию системы управления и адаптировать ее к изменившимся условиям. Использование этого алгоритма в системе управления планарным приводом позволяет существенно повысить их точность и быстродействие.

В шестой главе представлены результаты по реализации расширенных возможностей системы управления планарным приводом на базе разработанной математической и компьютерной моделей при использовании новой серии контроллеров, построенных на процессорах фирмы Texas Instruments, программируемых в MATLAB/Simulink.

В этом случае среда разработки системы управления планарным приводом, использованная в работе, и среда программирования процессора контроллера двухкоординатной системы перемещений становится единой. Это дает принципиально новые возможности в разработке любой мехатронной системы перемещений и, в частности, двухкоординатной. Становится возможным проводить углубленное компьютерное моделирование разрабатываемой системы при различных условиях и по его результатам автоматически программировать контроллер из программной среды MATLAB/Simulink.

Появляется возможность моделирования аппаратно-программные комплексы мехатронных систем перемещений в целом по структурной схеме, разработанной в диссертации. Для рассмотренного в работе привода была разработана и реализована практическая модель аппаратно-программного моделирования, построенная на взаимодействии двух компьютеров. При построении модели использовались подходы xPC Target и Real-Time Windows Target, позволяющие реализовать аппаратно-программную систему для тестирования и отладки сгенерированного программного кода системы управления планарным приводом. Для аппаратно-программного моделирования был разработан регулятор, использующий информацию о переменных состояния двухкоординатной системы, базирующийся на эстиматоре и фильтре Кальмана и позволяющий повысить качество регулирования в 1,4...1,7 раз по сравнению с ПИД-регулятором.

Для расчета параметров регулятора в соответствии с предложенной в работе блок-схемой была написана программа в MATLAB, листинг которой приведен в приложении диссертации. В программе использовалась модель планарного привода, представленная через передаточную функцию.

Использование программного обеспечения на базе фильтра Кальмана, разработанного в диссертации, позволило уменьшить время переходного процесса в 1,3...1,5 раз по сравнению с ПИД-регулятором. Это дает основание рекомендовать разработанный регулятор для применения в системах управления планарным приводом. Разработанное программное обеспечение является универсальным и может быть использовано для определения параметров подобных регуляторов, а также при генерировании программного обеспечения для контроллера при реализации системы

управления с использованием подходов xPC Target и Real-Time Windows Target.

В приложениях представлены: акт о внедрении компьютерной модели и алгоритмов верификации в системах управления планарным приводом на предприятии «Рухсервомотор» (г. Минск) для тестера печатных плат; тексты программ для верификации и реализации разработанных моделей (на внутреннем языке MATLAB), а также результаты экспериментального исследования планарного привода LSM PF-211.HS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа научно-исследовательских работ, накопленного опыта расчета и проектирования планарных систем перемещений предложено рассматривать последние как мехатронные системы перемещений с аппаратно-программной реализацией на процессорах серии TMS320 и платформе MATLAB/Simulink [8,11,14].

2. Разработана обобщенная математическая модель планарного привода мехатронной системы перемещений, которая позволила осуществлять компьютерное моделирование системы управления в пространстве состояний, с возможностью оптимального выбора алгоритмов регулирования [1,7,9,11,13].

3. На основании обобщенной математической модели разработана компьютерная блочно-модульная модель планарного привода, позволяющая проводить углубленное исследование характеристик точности и быстродействия мехатронной системы перемещений [2,5,6,10,15].

4. Предложена методика и алгоритм верификации разработанной математической модели и ее компьютерной реализации по результатам вычислений и экспериментальных исследований на созданном стенде на базе планарного привода LSM-PF 211.HS предприятия "Рухсервомотор" [4,12,13].

5. Предложен ПИД-регулятор для системы управления планарным приводом типа LSM-PF 211.HS, который внедрен в программное обеспечение системы управления серийно-выпускаемого оборудования на предприятии "Рухсервомотор" [3,4,11].

6. Предложена аппаратно-программная реализация системы управления на базе контроллера серии TMS320 со средой разработки и реализации управления MATLAB/Simulink, обеспечивающая точность и повторяемость перемещений без физических обратных связей [12,14,16].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Статьи в научных журналах

1. Агранович А.А., Карпович С.Е., Азентани Д. Математическая модель планарного привода на базе линейных шаговых двигателей // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/3. – С.191-195.
2. Агранович А.А., Карпович С.Е., Азентани Д., Русецкий С.А. Компьютерное моделирование голономных автоматических систем // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С.197-200.
3. Azentani D., Ahranovich A. The interactive multimedia system for studying of programmable controller QLC-drive command system // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С.261-264.
4. Агранович А.А., Азентани Д. Повышение качества регулирования системы управления планарного привода на основе ЛШД по результатам компьютерного моделирования // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – №1(19)/1. – С.113-120.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Azentani D., Dainiak I., Ahranovich A. The Modeling of Planar Linear Step Motor Functioning on Basis of Multimedia // Scientific Proceedings. – Vol.2. - Aachen: Shaker Verlag, 2004. - P.505-510
6. Агранович А.А., Азентани Д. Моделирование дифференциальных анализаторов для воспроизведения кривых, лежащих на поверхностях второго порядка, в MATLAB/Simulink // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомственный сб. науч. трудов. – Мн.: Технопринт, 2004. – Вып.2. – Т.6. – С.85-89.
7. Темрук И.В., Жарский В.В., Агранович А.А., Азентани Д. Высокодинамичный прецизионный привод прямого действия, основанный на поворотных модулях // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомственный сб. науч. трудов. – Мн.: Технопринт, 2004. – Вып.2. – Т.6. – С.186-189.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

8. Карпович С.Е., Агранович А.А., Азентани Д. Управляющие устройства систем автоматического управления на базе голономных автоматических систем // Доклады БГУИР. – 2004. – №5 / Технические средства защиты информации: Материалы докладов и краткие сообщения II Белорусско-российской науч.-технич. конф., 17-21 мая 2004 г. – С.98.
9. Агранович А.А., Азентани Д. Математическая модель планарного позиционера в интерактивном мультимедийном представлении // Доклады БГУИР. – 2004. – №5 / Технические средства защиты информации: Материалы докладов и краткие сообщения II Белорусско-российской науч.-технич. конф. 17-21 мая 2004 г. – С.99.
10. Азентани Д., Агранович А.А., Карпович С.Е. Построение мультимедийной

страницы для изучения привода прямого действия // Высшее техническое образование: проблемы и пути развития: Материалы Междунар. науч.-метод. конф., Минск, 17-18 марта 2004 г. - Мн.: БГУИР, 2004. - С.154.

11. Агранович А.А., Азентани Д., Межинский Ю.С. Математические модели управляющих устройств на базе голономных автоматических систем // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 26-28 мая 2004 г. – Новополоцк: ПУ, 2004. – Т.2. – С.232-235.

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

13. Ahranovich A., Azentani D., Zentner J. The Linear Step Motor Mathematical Model Design and Verification Using Identification Toolbox Method as a Mean for Improving the Motor's Performance / Электронная публикация: ISBN 3-932633-98-9. – TU-Ilmenau, 2005.

Тезисы докладов

14. Azentani D. The Interactive Teaching System of Command System of Logical Controller "QLC-drive" // Новые матем. методы и компьютер. технологии в проектировании, производстве и научн. исследованиях: Материалы VII Респ. конф., Гомель, 22-24 марта 2004 г. – Гомель: ГТУ, 2004. – С.198-199.

15. Агранович А.А., Азентани Д. Система управления линейным шаговым двигателем в режиме двигателя постоянного тока // Новые матем. методы и компьютер. технологии в проектировании, производстве и научн. исследованиях: Материалы VII Респ. конф., Гомель, 22-24 марта 2004 г. – Гомель: ГТУ, 2004. - С.200.

16. Азентани Д. Создание прецизионных линейных шаговых приводов с системами управления без обратной связи по положению // Новые матем. методы и компьютер. технологии в проектировании, произв. и научн. исследованиях: Материалы VIII Респ. конф., Гомель, 14-16 марта 2005 г. – Гомель: ГТУ, 2005. – С.116.



Дау Мохамэд Азэнтані

Двухкаардынатная сістэма перамяшчэнняў для зборачнага абсталявання вытворчасці вырабаў мікраэлектронікі

Ключавыя словы: мікраэлектроніка, зборачнае абсталяванне, планарны прывад, сістэма кіравання, мехатронная сістэма, верыфікацыя мадэлі, праграмае забяспэчэнне.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца двухкаардынатная сістэма перамяшчэнняў на базе планарнага прывада прамога дзеяння. **Прадметам даследавання** з'яўляюцца апаратна-праграмавая рэалізацыя двухкаардынатнай сістэмы перамяшчэнняў з павышанымі дынамічнымі і дакладнаснымі характарыстыкамі, дасягнутымі за конт матэматычнага і кампутэрнага мадэліравання самой выканальнай сістэмы рухаў і апаратна-праграмавага мадэліравання яе сістэмы кіравання.

Мэта працы складаецца ў распрацоўцы двухкаардынатнай сістэмы перамяшчэнняў для зборачнага абсталявання мікраэлектронікі на падставе планарнага прывада прамога дзеяння з сістэмай кіравання на базе працэсара серыі TMS 320.

Прапанавана разглядаць двухкаардынатную сістэму перамяшчэнняў на базе прывада прамога дзеяння як механа-апаратна-праграмавы комплекс.

Прапанавана матэматычная мадэль, па якой распрацавана кампутэрная мадэль у асяроддзі MATLAB/Simulink планарнага прывада двухкаардынатнай сістэмы перамяшчэнняў, якая дазваляе праводзіць паглыбленае кампутэрнае даследаванне характарыстык дакладнасці і хуткадзейнасці двухкаардынатных сістэм рухаў з магчымасцю аптымальнага выбару алгарытмаў і параметраў рэгулявання сістэмы кіравання. Методыка апаратна-праграмавага мадэліравання сістэмы кіравання планарным прывадам прамога дзеяння рэалізавана праграма на падставе імітацыйнай мадэлі абранага ў працы кантролера, пабудаванага на базе працэсара eZdsp TMS320F2812 з выкарыстаннем праграмавага забяспэчэння MATLAB/Simulink, а таксама сродкаў Real-Time Windows Target і xPC Target.

Распрацаваныя алгарытмы і праграма верыфікацыі кампутэрнай мадэлі забяспечваюць павелічэнне дакладнасці сістэмы перамяшчэнняў у 1,2..1,5 разы і яе хуткадзейнасці ў 1,5..1,7 разы. Яны былі выкарыстаны на прадпрыемстве "Рухсерватор" пры распрацоўцы чатырохкаардынатнага модуля тэстэра мнагаслойных пячатных плат.

Распрацаваныя метады, алгарытмы і праграмы могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы і стварэнні прэцызійных сістэм перамяшчэнняў усёй наменклатуры зборачнага абсталявання для мікраэлектронікі.

РЕЗЮМЕ

Дау Мохамед Азентани

Двухкоординатная система перемещений для сборочного оборудования производства изделий микроэлектроники

Ключевые слова: микроэлектроника, сборочное оборудование, планарный привод, система управления, мехатронная система, верификация модели, программное обеспечение.

Объектом исследования является двухкоординатная система перемещений на базе планарного привода прямого действия. **Предметом исследования** является аппаратно-программная реализация двухкоординатной системы перемещений с повышенными динамическими и точностными характеристиками, достигаемыми за счет математического и компьютерного моделирования самой исполнительской системы перемещений и аппаратно-программного моделирования ее системы управления.

Цель работы состоит в разработке двухкоординатной системы перемещений для сборочного оборудования микроэлектроники на основе планарного привода прямого действия с системой управления на базе процессора серии TMS 320.

Предложено рассматривать двухкоординатную систему перемещений на базе привода прямого действия как механо- аппаратно- программный комплекс.

Предложена математическая модель, по которой разработана компьютерная модель в среде MATLAB/Simulink планарного привода двухкоординатной системы перемещений, позволяющая проводить углубленное компьютерное исследование характеристик точности и быстродействия двухкоординатных систем перемещений с возможностью оптимального выбора алгоритмов и параметров регулирования системы управления. Методика аппаратно-программного моделирования системы управления планарным приводом прямого действия программно реализована на основе имитационной модели выбранного в работе контроллера, построенного на базе процессора eZdsp TMS320F2812 с использованием программного обеспечения MATLAB/Simulink, а также инструментария Real-Time Windows Target и xPC Target.

Разработанные алгоритмы и программа верификации компьютерной модели обеспечивают повышение точности системы перемещений в 1,2...1,5 раза и ее быстродействия в 1,5...1,7 раз. Они были использованы на предприятии «Рухсервомотор» при разработке четырехкоординатного модуля тестера многослойных печатных плат.

Разработанные методы, алгоритмы и программы могут быть использованы при разработке и создании прецизионных систем перемещений всей номенклатуры сборочного оборудования для микроэлектроники.

SUMMARY

Daw Mohamed Azentani

Two-Coordinate Motion System for Assembly Equipment
for the Manufacturing of Microelectronic Products

Keywords: microelectronics, assembly equipment, planar drive, control system, mechatronic system, model verification, software.

The object of research is two-coordinate motion system based on direct planar drive. **The subject of research** is hardware and software implementation of two-coordinate motion system with increased precision and dynamical characteristics which are achieved by mathematical and computer simulation of motion system and hardware-in-the-loop simulation of control system.

The aim of the work is development of two-coordinate motion system for assembly equipment based on direct planar drive with control system based on TMS 320 processor.

The two-coordinate motion system is considered as a mechanical-hardware-software complex.

The mathematical model of two-coordinate motion system is proposed which is based on computer model in MATLAB/Simulink. The model allows carrying out of deep computer investigation of accuracy and dynamics characteristics of the system with possibility of optimal algorithms and regulators parameters selection. The hardware-in-the-loop simulation methodology of planar drive control system is implemented on the base of simulation model of eZdsp TMS320F2812 processor with MATLAB/Simulink and Real-Time Windows Target, and xPC Target software utilization.

The worked out algorithms and computer model verification algorithms increase the accuracy of motion system by 1,2...1,5 times, and its performance by 1,5...1,7 times. These were used in Ruchservomotor enterprise while developing of four-coordinate circuit board tester.

The methods, algorithms and software developed can be used in the developing and creating of precision motion systems for all spectrum of assembly equipment in microelectronics.

ДАУ МОХАМЕД АЗЕНТАНИ

**ДВУХКООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 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	13.09.2006.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.		Заказ 543.

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.