

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.9.048:681.7.064:621.313.04

Межинский Юрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ
КООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ЛИНЕЙНЫХ
ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Специальность 05.27.07 – “Оборудование производства
электронной техники”

Специальность 05.13.07 – “Автоматизация технологических
процессов и производств
(в промышленности)”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск – 2000 г.

Работа выполнена в Белорусском государственном университете
информатики и радиоэлектроники

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Карпович С.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Суходольский А.М.

кандидат технических наук, доцент
Гульков Г.И.

Оппонирующая организация: НПО «Интеграл», г. Минск

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития микроэлектроники характеризуется интенсивным созданием широкой номенклатуры интегральных схем (ИС) малой и средней интеграции массовых серий, а также резким ростом степени интеграции приборов на одном кристалле в больших и сверхбольших интегральных схемах (БИС и СБИС).

Однако интенсивное увеличение объемов производства ИС и БИС при дальнейшем повышении их степени интеграции, увеличение процента выхода годных и снижение стоимости становится невозможным без оснащения производства высокопроизводительным прецизионным технологическим оборудованием.

Анализ технологического оборудования производства изделий электронной техники: оптико-механического для генерирования микроизображений промежуточных фотошаблонов, лазерной ретуши и корректировки топологии фотошаблонов, проекционного совмещения и экспонирования полупроводниковых пластин, контроля микроизображений; сборочного, включая установки контроля структур на пластинах (зондового контроля), разделения пластин на кристаллы, посадки кристаллов, монтажа проволочных выводов и других, показывает, что основными узлами, в значительной степени определяющими его производительность, точность, динамику являются устройства координатных перемещений. Эти устройства представляют собой многокоординатные системы и объединяют большую группу пространственных прецизионных механизмов, предназначенных для осуществления рабочих и установочных перемещений объектов (кристаллов, полупроводниковых пластин, инструмента и так далее).

Успехи микроэлектроники и связанные с ними успехи микропроцессорной управляющей техники позволили в конце 70х - начале 80х годов в КБТЭМ (г. Минск) создать гамму нетрадиционных электромеханических координатных устройств на базе линейных и многокоординатных шаговых двигателей с микропроцессорным управлением для прецизионного технологического оборудования микроэлектроники. Основным элементом таких устройств, определяющим их эксплуатационные характеристики, является управляемый электромагнитный модуль (УЭММ). Следовательно, одним из путей создания новых высокоэффективных линейных шаговых двигателей (ЛШД) и координатных систем на их основе является разработка УЭММ с улучшенными параметрами и характеристиками. Как правило, расчет и проектирование УЭММ и ЛШД основываются на эмпирических правилах и подходах, приближенных инженерных расчетах и методах на основе экспериментов и анализа прототипов. При этом сложность

дальнейшего развития таких систем заключается в необходимости использования нелинейных материалов, сложной геометрии зубцовой структуры индуктор-статор, необходимости анализа работы электропривода, как в установившемся, так и в переходном режимах.

Обеспечение требуемого уровня функциональных характеристик линейного шагового привода и координатных систем на его основе в настоящее время уже невозможно на основе конструкторского подхода, например, путем форсирования режимов и ужесточения требований к точности изготовления узлов и деталей. Поэтому разработка математических и программных методов и средств построения таких систем является актуальной научной задачей, которая в полной мере отвечает потребностям конструкторов-проектировщиков по созданию современного технологического оборудования для электронного машиностроения.

Цель работы состоит в повышении точностных, динамических и эксплуатационных характеристик прецизионных координатных систем на базе ЛШД путем математического моделирования, программных средств проектирования, корректирующих алгоритмов и их реализации в системе управления многокоординатного шагового привода для гибкого автоматизированного технологического оборудования в микроэлектронике.

Основные задачи исследования:

- Анализ современного уровня и разработка требований к прецизионным координатным системам автоматизированного оборудования для электронного машиностроения.
- Разработка аналитической и численных моделей расчета распределения магнитного поля и других магнитных характеристик в электромагнитном модуле ЛШД.
- Разработка алгоритмов расчета статических и динамических характеристик координатных систем на основе известных и разработанных моделей и комплекса программ, реализующих эти модели.
- Разработка алгоритмов и средств программной коррекции прецизионных перемещений в координатных системах на базе ЛШД.
- Проведение теоретических и экспериментальных исследований и апробация результатов математического и компьютерного моделирования и корректирующих алгоритмов.
- Внедрение полученных в работе научных результатов при разработке и создании устройств координатных перемещений прецизионного сборочного оборудования производства изделий электронной техники.
- Разработка и создание гибкого производственного комплекса «TurboPlane» на основе многоцелевого использования линейного шагового привода с программной коррекцией координатных движений в контроллере

нижнего уровня, и осуществление программного согласования всех производственных и транспортных движений центральным контроллером с возможностью управления комплексом от ПЭВМ.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования и разработки, отраженные в диссертационной работе, непосредственно связаны с долговременной программой научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках совместной лаборатории ГНПК-ТМ «Планар» и БГУИР, лаборатории САПР завода «Планар-ТМ» по разработке и созданию прецизионных координатных систем на базе ЛШД для технологического оборудования производства изделий электронной техники.

Вышеназванные задачи решались также в рамках Государственной научно-технической программы «Белэлектроника» - раздел: "Разработать и освоить в серийном производстве изделия микроэлектроники и высокоточной, интеллектуальной, многофункциональной и промышленной техники", (1994-1996 гг.); раздел: "Разработать и освоить в серии цифровых, цифро-аналоговых, аналоговых и дискретных полупроводниковых приборов, комплекты специального технологического оборудования для приоритетных отраслей промышленности и бытовой техники." (1997-1999 гг.)

Диссертационная работа выполнялась в рамках 5 хоздоговорных НИР, 6 госбюджетных НИР и трех договоров о международном научно-техническом сотрудничестве.

Методы исследования. При разработке аналитических и численных математических моделей, алгоритмов и комплекса программ расчета и проектирования прецизионных координатных систем на базе линейных шаговых двигателей использовались известные и разработанные аналитические и численные методы: теории электрических машин (методы основанные на: энергетическом подходе, векторном потенциале и использовании метода конечных элементов); теории построения пространственных многокоординатных систем (методы основанные на: теории линейных пространств подвижностей и условий связей, построении дифференциальных уравнений по их частным решениям, поисковых методах оптимизации, теории оптимального управления); численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений и их систем.

Исследования проведены с широким применением компьютерного моделирования и экспериментальных методов измерения статических и динамических характеристик координатных систем, точности позиционирования, повторяемости и предельных характеристик скорости и ускорения.

Научная новизна работы заключается в разработке математической модели управляемого линейного шагового двигателя, которая позволяет

выполнять все необходимые расчеты на ЭВМ, направленные на обеспечение повышения динамических, точностных и эксплуатационных характеристик проектируемого на его основе оборудования.

Разработаны математические модели и созданы пакеты прикладных программ моделирования распределения магнитного поля в рабочем зазоре ЛШД, оценки интегральных характеристик разрабатываемых электромагнитных модулей (точность, тяговая сила и др.) ЛШД любого исполнения.

Разработаны алгоритмы и аппаратные средства, позволяющие реализовать квазизамкнутое управление линейным шаговым приводом на основе анализа изменения магнитной индукции в рабочем зазоре и осуществления программной коррекции.

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Комплекс программ моделирования электромагнитного модуля линейного шагового двигателя внедрен при проектировании прецизионных координатных систем сборочного оборудования выпускаемого серийно на ГНПК-ТМ «Планар» (автоматические установки зондового контроля электрических параметров микросхем – ЭМ-690М и автоматические установки присоединения проволочных выводов – ЭМ-4260).

2. Разработан гибкий производственный комплекс TurboPlane, основанный на концепции жесткого программного согласования в единой системе координат всех производственных и транспортных движений, обеспечиваемых многокоординатным линейным шаговым приводом с магнитовоздушными опорами.

3. Разработано программное обеспечение для системы управления трех- и пятикоординатной прецизионными машинами, обеспечивающими сложное фрезерование, гравирование и сверление на плоских и тороидальных поверхностях.

4. Математические модели, алгоритмы и программы были внедрены в учебный процесс в курсах лекций, при проведении практических занятий и лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов по специальностям: «Электронное машиностроение», «Автоматическое управление в технических системах», «Вычислительные машины, системы и сети».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Численная модель электромагнитного модуля линейного шагового двигателя, которая основана на решении системы векторных уравнений Максвелла с использованием предложенного сведения ее к двумерному скалярному квазигармоническому уравнению со скалярными граничными условиями.

2. Алгоритмы, реализующие предложенные и известные модели, методы и методики расчета и проектирования, положенные в основу комплекса программ моделирования линейного шагового привода, который позволяет проводить наиболее полное и точное моделирование, модификацию, оптимизацию и разработку новых типов электромагнитных модулей и прецизионных координатных устройств на их основе.

3. Постановка и решение задачи повышения точности программных движений многокоординатных систем на базе ЛШД на основе разработанных алгоритмов программной коррекции шагового привода без внешних обратных связей.

4. Разработанные координатные системы на магнитовоздушной опоре на основе электромагнитного модуля – индукторного ЛШД с возбуждением от постоянных магнитов, обладающие повышенными динамическими и точностными характеристиками и использованные при создании автоматических установок зондового контроля электрических параметров микросхем на полупроводниковых пластинах (ЭМ-690М) и автоматов присоединения проволочных выводов методом термозвуковой сварки (ЭМ-4260).

5. Разработанный гибкий производственный комплекс TurboPlane, в части: концепции его построения на основе многоцелевого использования и конфигурирования линейного шагового привода; алгоритмического и программного обеспечения управления отдельными двухкоординатными системами с их инструментами; управления комплексом из нескольких двухкоординатных систем с соответствующими инструментами в целом; взаимодействия комплекса с управляющим компьютером.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты работ, которые были выполнены автором самостоятельно и в соавторстве. Большинство из них автор был инициатором, разрабатывал математические модели и методики исследований, проводил расчеты и эксперименты, осуществлял обработку, анализ и обобщение полученных результатов.

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 Международная НТК "Актуальные проблемы фундаментальных наук", Москва, 1991; Республиканская НМК "Пути и средства совершенствования подготовки специалистов", Минск, МРТИ, 1992; Международная НТК "Маркетинг, технология и оборудование микросварки и пайки в производстве ИЭТ", Воронеж, 1992; 38 International Kolloquium "Tendenzen in Entwicklung, Konstruktion und Anwendung der Feinwerktechnik und Mikrotechnik", Ilmenau,

Germany, 1993; Республиканская НТК, посвященная 30-летию БГУИР, Минск, 1994; International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, CSFR, Kosice, 1994; 39 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Germany, 1994; V-th International Symposium on Creep and Coupled Processes, Bialystok, Poland, 1995; 41th Internationales wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, Germany, 1996; 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Budapest, Hungary, 1996; International Conference on Electrical Drives and Power Electronics, Kosice, Slovakia, 1996; II-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и Информатика - 97», Москва, 1997; 8-я международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 1998; 2nd Polish-German Workshop "Tools of Mechatronics", Ilmenau, Germany, 1998; МНТК «Новые информационные технологии в науке и производстве», Минск, 1998; 2-й белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике "Механика-99", 28-30 июня 1999 г.; 44-th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999.

Опубликованность результатов диссертации.

По теме диссертации опубликовано 44 работы, в том числе 2 статьи в научно-технических журналах, 7 статей в научно-технических сборниках, 21 статья в материалах международных конференций и 12 тезисов докладов в сборниках трудов научных конференций, 2 учебных пособия. Общее количество опубликованных материалов составило 348 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 31 иллюстрацию и 4 таблицы. Список использованных источников включает 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *общей характеристике работы* обоснована актуальность и новизна рассматриваемой темы, сформулированы цели и основные задачи исследования, представлены основные положения диссертации выносимые на защиту.

В *первой главе* на основе анализа научно-исследовательских работ, материалов патентной и периодической литературы, руководящих материалов сформулированы требования к техническим и эксплуатационным характеристикам координатных позиционеров гибких производственных систем для электронного машиностроения. В результате анализа принципиальных циклограмм работы, требований технологии выполнения операций на установках зондового контроля, разделения полупроводниковых

пластин на кристаллы, монтажа проволочных выводов, а также на основе накопленного отечественного и зарубежного опыта, полученного при разработке и создании автоматизированного оборудования для микроэлектроники показано, что основными устройствами, в значительной степени определяющими производительность и точность, являются различные координатные системы. Они должны обеспечивать реализацию сложных многокоординатных и точно согласованных перемещений полупроводниковых пластин, кристаллов и инструмента с широким варьированием параметров движения, а также точное и быстрое их позиционирование.

Уровень требований к характеристикам координатных систем определяется размерами контактных площадок интегральных схем и кристаллов, размерами полупроводниковых пластин и рабочих полей перемещений позиционирования.

К координатным системам дополнительно предъявляются такие требования как модульность, однотипность независимо от вида движения (по управлению и принципу преобразования энергии), возможность построения как разомкнутых систем, так и систем с обратной связью, высокая скорость восстановления после отказа, возможность конструктивного объединения подвижных частей нескольких координатных систем в один многокоординатный исполнительный орган с обеспечением автономности управления каждой координатой.

В результате рассмотрения различных схем и конструкций координатных позиционеров обоснована перспективность их построения на основе многоцелевого использования линейных шаговых двигателей на магнитовоздушной опоре.

Проведен анализ методов расчета ЛШД и координатных систем на их основе, рассмотрены основные факторы, влияющие на максимальное синхронизирующее тяговое усилие ЛШД, которое в значительной степени определяет динамические и точностные характеристики оборудования. Определены основные теоретические и практические пути повышения характеристик координатного привода.

Во второй главе рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования координатных систем на базе ЛШД. Здесь представлены результаты исследований по математическому моделированию и экспериментальному определению основных характеристик координатных позиционеров.

Проведенные исследования показали, что линейная модель дает высокую сходимость с экспериментом при расчете ненасыщенных линейных систем ЛШД, когда рабочая точка на кривой В/Н лежит в линейной области. Но, несмотря на несомненные достоинства этой модели (главное достоинство -

аналитическое представление результатов), для магнитных систем, работающих в глубоком насыщении, необходимы другие математические методы и подходы. В настоящее время проектирование таких устройств базируется преимущественно на эмпирических правилах и методах, полученных в результате экспериментов или анализа прототипов. Проблема еще более усложняется из-за использования существенно нелинейных материалов и систем со сложной геометрией, а также необходимости проводить анализ как в статическом, так и в переходном и в установившемся режимах. В этих случаях только САПР позволяет проводить наиболее точное и полное моделирование, модификацию, оптимизацию и создание новых типов электромагнитных исполнительных механизмов. Для этих целей предложены алгоритмы и пакет программ математического моделирования, которые включают аналитический расчет характеристик ЛШД без учета насыщения и моделирование статических и динамических характеристик ЛШД с учетом насыщения.

Предложенные алгоритмы *аналитического расчета* основаны на энергетическом подходе, согласно которому удельное тяговое усилие рассчитывается по формуле:

$$f = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 Q, \quad (1)$$

где B_δ - магнитная индукция в рабочем зазоре δ . Безразмерная функция Q , входящая в (1), определяется из выражения:

$$Q = \delta_0 \left[\sum_{k=1}^{2p+2} \frac{\partial C_k}{\partial x_0} \int_{\frac{-a_{10}}{2}}^{\frac{a_{10}}{2}} U_k(\xi) d\xi + \sum_{k=1}^{2p+2} C_k \int_{\frac{-a_{10}}{2}}^{\frac{a_{10}}{2}} \frac{\partial U_k}{\partial x_0} d\xi - \sum_{k=1}^{2p+2} \frac{\partial D_k}{\partial x_0} \int_{\frac{-a_{20}}{2}}^{\frac{a_{20}}{2}} U_k(t) dt - \sum_{k=1}^{2p+2} D_k \int_{\frac{-a_{20}}{2}}^{\frac{a_{20}}{2}} \frac{\partial U_k}{\partial x_0} dt \right], \quad (2)$$

где $x_0 = \frac{x}{\tau}$ - относительный сдвиг индуктора и статора, $\delta_0 = \frac{\delta}{\tau}$ - относительная величина воздушного зазора, $\varphi(\xi)$ и $\psi(t)$ - функции определяемые на основе расчета магнитного поля в рабочем зазоре индуктор-статор по уравнению Лапласа параболического типа, $U_k(\xi)$ и $U_k(t)$ - параметрические функции магнитного потенциала в рабочем зазоре, C_k и D_k - параметрические коэффициенты.

Нахождение математического выражения для тягового усилия F однокоординатного ЛШД, используемого при расчетах статических и

динамических характеристик с учетом насыщения, основывается на анализе *изменения магнитной энергии* в рабочем зазоре индуктор-статор. Для случая однокоординатного двухфазного линейного шагового двигателя с постоянными магнитами в электромагнитных модулях индуктора функции F_1 и F_2 тягового усилия, соответственно для фаз 1 и 2, окончательно будут иметь вид:

$$F_1 = l \left[\frac{dS_a}{dx} \int_0^{H_a} B_a dH + \frac{dS_b}{dx} \int_0^{H_b} B_b dH \right]; F_2 = l \left[\frac{dS_c}{dx} \int_0^{H_c} B_c dH + \frac{dS_d}{dx} \int_0^{H_d} B_d dH \right], \quad (3)$$

где B_i , H_i - индукции и напряженности магнитного поля, dS_i/dx - производные площадей перекрытия под наконечниками магнитопроводов, l - средняя длина линии интенсивности в магнитопроводе.

Выражения (3) для тяговых усилий F_1 , F_2 и суммарного $F = F_1 + F_2$ получены с учетом влияния воздушного зазора, наличие которого учтено через напряженность внешнего поля, совпадающего по направлению с напряженностью поля внутри замкнутой магнитной цепи фазы двигателя.

Для разработки многоцелевого программного обеспечения, встраиваемого в САПР линейного шагового привода и позволяющего проводить наиболее полное и точное моделирование, модификацию, оптимизацию, разработку новых электромагнитных модулей, ЛШД и координатных систем на их основе, разработаны алгоритмы и программы моделирования характеристик ЛШД посредством анализа магнитного поля *методом конечных элементов*.

Математические модели и многоцелевое программное обеспечение позволяет проводить:

- двумерное нелинейное динамическое моделирование произвольных электромагнитных систем в интерактивном режиме;
- исследование и выбор рабочих режимов магнитных материалов;
- вариацию геометрии моделируемой системы магнитопровода;
- моделирование электромагнитных устройств или их частей в динамике.

Для математического описания распределения магнитного поля в электромагнитном модуле ЛШД в качестве исходной использовалась система уравнений Максвелла в формулировке, основанной на векторном потенциале:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_e; \text{div } \mathbf{B} = 0; \mathbf{H} = \nu \mathbf{B} + \mathbf{H}_e; \mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E}, \quad (4)$$

где \mathbf{E} - напряженность электрического поля, \mathbf{H} - напряженность магнитного поля, \mathbf{B} - магнитная индукция, \mathbf{J} - плотность источников тока, \mathbf{J}_e - плотность вихревых токов, \mathbf{H}_e - коэрцитивная сила, ν - магнитная проводимость, σ - электрическая проводимость.

Для рассматриваемых в работе ЛШД выполнялось численное моделирование по скалярному квазигармоническому уравнению, полученному на основании (4):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + Q - \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \lambda \left(V_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} + V_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

со следующими граничными условиями:

$$K_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} l_y + q + h(\varphi - \varphi_0) = 0, \quad \varphi = \varphi_b, \quad (6)$$

где φ - магнитный векторный потенциал, K_x и K_y - коэффициенты удельной магнитной проводимости, Q - плотность тока, λ - удельная электрическая проводимость, V_x и V_y - скорости по координатам, l_x и l_y - направляющие косинусы вектора нормали к поверхности, q - коэрцитивная сила постоянного магнита, h - граничный коэффициент на бесконечности, φ_0 - значение потенциала на бесконечности, φ_b - фиксированное значение магнитного потенциала.

Решение уравнения поля осуществлялось методом конечных элементов с предложенными модификациями, которые направлены на преодоление основных трудностей, связанных с большим объемом вычислений, подготовкой данных и обеспечением сходимости вычислительной процедуры. Предложенное программное обеспечение позволяет уменьшить эти проблемы, благодаря: а) использованию специальных алгоритмов в моделировании и вычислениях; б) графическому интерактивному интерфейсу, разработанному для обработки данных и направленному на быстрое изображение геометрии магнитопровода на дисплее с необходимой дискретностью и удобным представлением результатов.

В качестве примера представлены результаты исследования ЛШД со следующими параметрами: период зубцовой структуры индуктор-статор, $\tau = 480$ мкм, воздушный зазор $h = 20$ мкм; длина зуба $l = 28$ мм; на каждом полюсе нарезано 8 зубцов; электрическое дробление шага – 64 состояния за период τ , при максимальном токе $I = 1,5$ А.

Магнитная характеристика была аппроксимирована по разработанной программе на основе метода наименьших квадратов. Вычислительная процедура была реализована с помощью разработанного программного пакета DANF методом конечных элементов. На рис. 1 показан пример автоматически генерируемой сетки из 2000 конечных элементов с 1007 степенями свободы, для случая смещения между зубцами индуктора и статора равном 60 мкм. При этом грубая сетка конечных элементов была сгенерирована сразу, а затем

улучшена в несколько раз в соответствии с достигнутыми решениями. В рассматриваемом примере в процессе решения моделируется распределение магнитного потенциала в рабочем зазоре (на рис. 2 показано в виде эквипотенциальных линий векторного магнитного потенциала). Распределение индукции, при необходимости, тоже может выводиться на экран. Распределение индукции для рассматриваемого примера показано на рис. 3.

Основной результат моделирования по этой части – это определение значения синхронизирующего тягового усилия. Разработанная математическая модель позволяет получить динамическую синхронизирующую силу, которая рассчитывалась с дискретностью смещения 100 мкм, как повторение всех предыдущих расчетов на каждом смещении. Далее динамическое тяговое усилие строится с необходимым фазовым сдвигом. Сумма характеристик по всем четырем полюсам и есть график результирующего динамического тягового усилия двигателя. На основании полученных характеристик изменения тягового усилия рассчитывается циклическая погрешность позиционирования.

В диссертации приведены результаты экспериментальных исследований координатных позиционеров на основе ЛШД, которые показывают высокую сходимость результатов математического моделирования и эксперимента.

Для проведения экспериментальных исследований координатных позиционеров на ЛШД был создан планарный двухкоординатный X, Y позиционер с возбуждением от постоянных магнитов на аэростатической

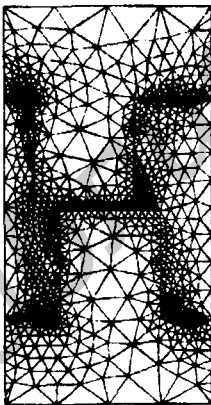


Рис. 1 Автоматически генерируемая сеть конечных элементов на одном периоде зубцовой структуры

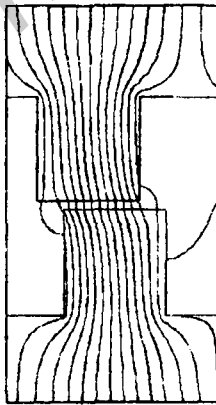


Рис. 2 Эквипотенциальные линии магнитного потенциала на одном периоде зубцовой структуры

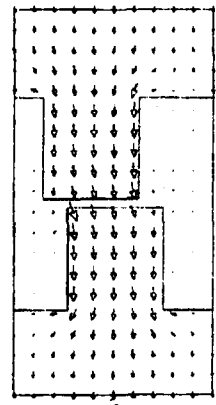


Рис. 3 Распределение индукции магнитного поля на одном периоде зубцовой структуры.

опоре, состоящий из индуктора и статора. По результатам экспериментальных исследований были получены зависимости синхронизирующего тягового усилия для различных сочетаний геометрических и конструктивных параметров зубцовых зон индуктора и статора ЛШД, как со сплошным длинным зубом, так и с пересеченными зубцовыми структурами. По экспериментальным результатам также были получены зависимости погрешности позиционирования и динамические характеристики при различных сочетаниях конструктивных параметров линейных шаговых двигателей координатных позиционеров. Сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает высокую их сходимость и позволяет рекомендовать полученные в диссертации результаты в практику проектирования прецизионного технологического оборудования для микроэлектроники.

В главе 3 предложен алгоритм повышения точности позиционирования ЛШД при разомкнутом управлении. Целью данного алгоритма является уменьшение погрешности позиционирования ШД посредством минимизации его остаточного динамического тягового усилия за счет изменения формы токов управления с учетом результатов измерения индуктивностей обмоток. Алгоритм позволяет учесть насыщение магнитопроводов ШД, несинусоидальный характер изменения магнитного сопротивления зубцовой структуры полюсных наконечников, модуляцию магнитного потока постоянного магнита в полюсных наконечниках.

Погрешность позиционирования, как периодическая функция координаты, вызывает две проблемы при движении ЛШД.

1. Отклонение положения ЛШД от желаемого при позиционном управлении с амплитудой примерно от 5 до 50 мкм;
2. Небольшие колебания индуктора с частотой, пропорциональной скорости движения, и амплитудой, резко возрастающей вблизи резонансной частоты ЛШД.

Причины погрешности позиционирования можно разделить на две группы.

1. Дополнительные силы, действующий на индуктор кроме тягового усилия, такие как силы трения, нагрузки и остаточные силы из-за индукционных и вихревых токов, а также намагничивание статора.
2. Физические взаимосвязи, которыми пренебрегли при проектировании и моделировании ЛШД, такие как отклонение изменения магнитной проводимости в воздушном зазоре от синусоидальной формы, нелинейная зависимость магнитного потока от тока в обмотке вследствие насыщения магнитных материалов и рассеяния магнитного поля в воздушном зазоре, и,

наконец, гистерезисное явление при перемагничивании полюсов индуктора и статора.

Согласно конструкции и принципу действия идеального шагового двигателя, подача синусоидальных управляющих сигналов вызывает движение ШД без погрешности позиционирования. Стремление повысить тяговое усилие увеличением уровня токов в обмотках управления приводит к насыщению магнитных материалов ШД, и, как следствие, реальный ШД, имеющий идеальную геометрию, движется с погрешностью. Теоретически, идеальное движение без погрешности возможно, однако управляющие токи должны для этого быть несинусоидальными.

Процесс компенсации погрешности позиционирования ЛШД путем калибровки токов в обмотках управления проводится с помощью внутреннего датчика измерения индуктивности. В работе показаны принцип измерения индуктивности и его реализация в контроллере SoftStep, разработанным в рамках договора о сотрудничестве между БГУИР и научным центром I.ST Laser & Strahl Technik (г. Вена, Австрия).

ЛШД запитывается синусоидальными токами и на медленной скорости (1 мм/с для исключения влияния динамических составляющих) происходит измерение индуктивностей фазовых обмоток на нескольких периодах зубцовой структуры. Массив измерений затем заполняется и усредняется для исключения явных погрешностей измерений.

Приведены расчетные индуктивности ЛШД по результатам измерений, а также среднее (или суммарное) значение индуктивности, которое было бы константой для идеального ЛШД без погрешностей. Отклонение этого среднего значения индуктивности от константы и может служить простейшим критерием качества движения при проведении итераций калибровки, а также при квазизамкнутом управлении ЛШД, т.е. при использовании результатов измерений как внутреннего датчика обратной связи.

Для тестирования процесса калибровки и проведения измерений использовался ЛШД портального типа производства концерна «Планар» с токами управления до 1.5 А и периодом нарезки зубцовой структуры 1 мм. Исходная погрешность позиционирования для серийного привода при управлении синусоидальными токами в разомкнутом режиме составляет 50-60 мкм. Каждая итерация процесса калибровки токов позволяет уменьшить эту погрешность в 3-4 раза и на 3-ей итерации достигнуть точности позиционирования в пределах 2..5 мкм.

В главе 4 представлены результаты по разработке и созданию автоматизированного технологического оборудования для микроэлектроники, основанные на теоретических исследованиях, экспериментальных результатах и математическом моделировании магнитной системы ЛШД, статических и

динамических характеристик координатных позиционеров. Эти результаты были использованы при разработке технической документации автоматического сборочного оборудования, выпускаемого научно-производственным концерном «Планар». Результаты исследований настоящей работы были исследованы при разработке и создании ряда специального технологического оборудования, выпускаемого на ГНПК-ТМ «Планар», в том числе автомата присоединения проволочных выводов ЭМ-4260, установки зондового контроля ЭМ-690М и других.

Автомат присоединения проволочных выводов предназначен для автоматического присоединения проволочных выводов из золота к контактным площадкам и выводам корпусов ИС методом термозвуковой сварки.

Двухкоординатный X-Y линейный шаговый двигатель с разработанной системой программной коррекции обеспечивает высокую точность и скорость перемещения сварочной головки. Автомат оснащен системой контроля качества сварки. Основные параметры технологического процесса (скорость перемещения, диаметр шарика, усилие сварки и др.) программируются.

Встроенная программно – управляемая библиотека петель и высокая точность исполнительных механизмов обеспечивает разварку различных типов изделий с длиной перемычки («пегли») до 7 мм, в том числе многовыводных СБИС и ИС в тонких корпусах.

В главе также представлены результаты исследований по созданию гибкого производственного комплекса для прецизионных производств TurboPlane (рис. 4), который был создан в рамках договора о сотрудничестве между БГУИР и научным центром LST Laser & Strahl Technik (г. Вена, Австрия). В качестве элементной базы для «TurboPlane» были использованы электромеханические модули - координатные позиционеры (КП) на линейных шаговых двигателях.

Основой данного комплекса являются 5 КП, расположенных на 2

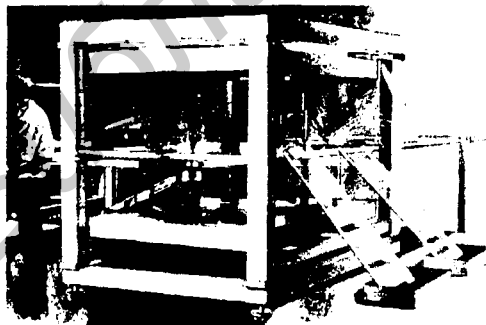


Рис. 4. Гибкий производственный комплекс лазерной обработки TurboPlane

параллельных статорах размером 800x1500 мм каждый. Верхние позиционеры используются для монтажа на них технологического оборудования: 5-координатного робота, манипулятора, СО₂-лазера, YAG-лазера (плоттера). Нижние позиционеры используются для транспортировки материала заготовки и сбора готовых деталей. Каждый из КП управляется контроллером, построенным на базе

микропроцессорной системы управления. Контроллер содержит в своем составе транспьютер T425 фирмы SGS-Thomson, процессор цифровой обработки сигналов ADSP-2100 фирмы Analog Devices, микросхему программируемой логики фирмы Xilinx. В задачи транспьютера входит взаимодействие с внешними устройствами управления комплексом, прием и декодирование инструкций в формате языка HPGL, а также расчет траекторий перемещения. Микросхема программируемой логики Xilinx запрограммирована таким образом, что является буферным регистром между транспьютером и DSP и одновременно управляет лазером. DSP непосредственно управляет самим КП в реальном времени через ЦАП и АЦП, получает информацию о реальном положении индуктора ЛШД и проводит коррекцию погрешности перемещения. Точность позиционирования составляет порядка 2...5 мкм.

Разработано программное обеспечение, которое позволяет осуществить программное согласование в единой системе координат всех производственных и транспортных движений, осуществляемых центральным контроллером, предоставляет удобный интерфейс с пользователем и возможность управления комплексом с персонального компьютера.

Исходя из структуры комплекса, определены следующие уровни управления:

Уровень управления отдельным инструментом - управление отдельной двухкоординатной системой как функционально законченным устройством. Эта функция возложена на отдельный контроллер SoftStep, разработанный совместно с фирмой LST.

Уровень управления комплексом в целом – координация работы нескольких двухкоординатных систем в едином рабочем пространстве. Для этой цели в систему введен дополнительный специализированный контроллер, содержащий в своем составе 2 транспьютера T800.

Уровень взаимодействия комплекса с ПЭВМ оператора – отображение текущего состояния комплекса, ввод новых заданий на специальном языке описания техпроцесса. Эту функцию реализуют совместно ПЭВМ пользователя с установленным там специальным программным обеспечением.

В соответствии с уровнями управления выделены и отдельные модули, составляющие систему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа различных схем и конструкций координатных систем обоснована перспективность их дальнейшего построения на основе многоцелевого использования линейных шаговых двигателей на магнитовоздушной опоре, т.к. они обеспечивают реализацию сложных многокоординатных и точно согласованных перемещений полупроводниковых

пластин, кристаллов, инструмента и др. с широким варьированием параметров движения: скорость – 0...2 м/с, ускорение – 0...100 м/с², точность позиционирования $\pm 50... \pm 0.02$ мкм [1-3, 8, 16-18, 31-32].

2. Разработаны аналитические модели расчета зависимости тягового усилия, развиваемого электромагнитным модулем, от соотношения магнитных потоков, создаваемых постоянными магнитами и обмотками управления, геометрии зубцовых зон индуктора и статора, позволяющие определять оптимальные их соотношения без учета и с учетом магнитного насыщения ЛЩД [5, 14, 16-17, 20, 28-30, 32-33, 41].

3. Разработана численная модель электромагнитного модуля линейного шагового двигателя, основанная на решении системы векторных уравнений Максвелла с использованием предложенного в диссертации сведения ее к двумерному скалярному квазигармоническому уравнению со скалярными граничными условиями. Решение уравнения поля осуществлялось методом конечных элементов с предложенными модификациями, которые направлены на преодоление основных трудностей, связанных с большим объемом вычислений, подготовкой данных и обеспечением сходимости вычислительной процедуры [6, 10, 13-14, 22, 30, 39-40].

4. Разработаны алгоритмы, реализующие предложенные и известные математические модели расчета и проектирования, положенные в основу комплекса программ моделирования линейного шагового привода, который позволяет проводить наиболее полное и точное моделирование, модификацию и оптимизацию электромагнитных модулей и прецизионных координатных систем, благодаря использованию специальных алгоритмов в моделировании и вычислениях, графическому интерактивному интерфейсу, разработанному для обработки данных и направленному на быстрое изображение разрабатываемого объекта с необходимой дискретностью и удобным представлением результатов [7, 12, 15, 18-23, 26-27, 43-44].

5. Разработан алгоритм повышения точности позиционирования координатных систем на базе ЩД и ЛЩД при разомкнутом управлении, основанный на уменьшении погрешности позиционирования посредством минимизации остаточного динамического тягового усилия за счет изменения формы токов управления с учетом результатов измерения индуктивностей обмоток. Алгоритм позволяет учесть насыщение магнитопроводов ЛЩД, несинусоидальный характер изменения магнитного сопротивления зубцовой структуры полюсных наконечников, модуляцию магнитного потока в полюсных наконечниках. В результате использования разработанного алгоритма исходная погрешность позиционирования для серийного привода снижена с 50..60 мкм при управлении синусоидальными токами в разомкнутом

режиме до 2..5 мкм при скорректированном управлении [2, 19-21, 24, 26-27, 41-42].

6. Разработаны координатные системы на магнитовоздушной опоре на основе электромагнитного модуля с возбуждением от постоянных магнитов, обладающие повышенными динамическими (в 1,2..1,5 раза) и точностными (в 5..8 раз) характеристиками и использованные при создании установок зондового контроля электрических параметров микросхем на полупроводниковых пластинах (ЭМ-690М) и автоматов присоединения проволочных выводов методом термозвуковой сварки (ЭМ-4260) [1, 8, 15, 31, 39].

7. Разработан и реализован гибкий производственный комплекс TurboPlane на основе многоцелевого использования линейного шагового привода с программной коррекцией координатных движений в контроллере нижнего уровня и осуществления программного согласования всех производственных и транспортных движений центральным контроллером с возможностью управления комплексом от компьютера [16-19, 23-25, 31, 35-38, 41].

Полученные теоретические, практические и экспериментальные результаты направлены на расширение функциональных возможностей, в том числе точности и быстродействия прецизионных координатных систем оборудования производства электронной техники, приборостроения и др.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, материалы конференций

1. Карпович С.Е., Белявский Е.И., Межинский Ю.С. Линейные шаговые двигатели для производства изделий электронной техники // Сборник трудов Международной НТК "Актуальные проблемы фундаментальных наук". - М., 1991. - С. 46-49.
2. Карпович С.Е., Межинский Ю.С. Исследования однокоординатного двухфазного линейного шагового двигателя // Сборник трудов Международной НТК "Актуальные проблемы фундаментальных наук". - М., 1991. - С. 42-45.
3. Karpovich S., Mezhinsky Y. Linear stepping motor: mathematical modelling and estimation of performance and possibilities // Proceedings of International Conference on Electrical Drives and Power Electronics.- CSFR, Kosice, 1992. - P. 331-335.
4. Karpovich S., Mezhinsky Y. Optimization of speed loading conditions for tests forcing // Proceedings of V International Symposium Creep and Coupled Processes.- Bialystok, Poland, 1992. - P. 115-120.
5. Karpovich S., Mezhinsky Y., Tsemkalo W. Modelling problems and estimation of performances of Linear stepping motor // Proceedings of International Kolloquium

- Tendenzen in Entwicklung, Konstruktion und Anwendung der Feinwerktechnik und Mikrotechnik.- Ilmenau, Germany, 1993. - P. 151-158.
6. Karpovich S., Mezhinsky Y. Finite Element Modelling and Computer - Aided Design of Electromagnetic Devices // Proceedings of International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. Slovakia, Kosice, - 1994. - Vol. 2. - P. 346-352.
 7. Karpovich S., Mezhinsky Y. A problem of trajectory forming in linear stepping motor control // Proceeding of 3rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. - Ilmenau, Germany, 1994. - P. 121 – 128.
 8. Karpovich S., Mezhinsky Y. Design Aspects of Flexible Manufacturing Systems with Linear Stepping Motors // Proceedings of 41th Internationales wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, Germany, 1996. - P. 166-170.
 9. Karpovich S., Mezhinsky Y., Rusetsky A. Dynamics of Programmed Movements in Multicoordinate Systems // Selected and Rev. Papers. 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Budapest, Hungary, 1996. - P. 15-17.
 10. Karpovich S. E., Mezhinsky Y. Finite Element Modelling of Stepping Motors // 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Budapest, Hungary, 1996. - P. 215-219.
 11. Karpovich S. E., Mezhinsky Y. S. Influence Investigation of Stepping Load Parameters for Test Forcing // Selected and Revived Papers of 5-th International Symposium on Creep and Coupled Processes. Bialystok, 1996. - P. 201-205.
 12. Karpovich S., Mezhinsky Y., Kobzhev A. Construction of Optimal Program Movements for Multicoordinate Stepping Motors // Proceedings of International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. Kosice, Slovakia, 1996. - P. 184-189.
 13. Mezhinsky Y., Karpovich S. Analysis of Performance of Linear Stepping Motor Using Finite Element Method // Proceedings of 41 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, Germany, 1996. - P. 181-186.
 14. Mezhinsky Y., Karpovich S. E., Stepanov D. Prediction of Force-Displacement and Position Error Characteristics of Linear Stepping Motors Using Finite Element Method // Proceedings of International Conference on Electrical Drives and Power Electronics. - Kosice, Slovakia, 1996. - P. 57-62.
 15. Rusetsky A., Mezhinsky Y., Karpovich S. Flexible Automated Systems for Integrated Circuit-Control and Assembly Operations. // Proceedings of 42 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, Germany, 1997– P. 237-241.
 16. Space Electromechanical Robot Systems with Non-holonomic Constraints. Part 1. Construction of the Motion Equations for Electromechanical Robot System / Karpovich S., Mezhinsky Y., Rusetsky A., Matjushkov V. // Algoritmization of

Mathematical Models for Non-holonomic Constraints System and Nonlinear Mechanics in the Biaxial Stress States of Solid Bodies. Publishers of Bialystok Technical University, Bialystok, 1998. – P. 87-105.

17. Space Electromechanical Robot Systems with Non-holonomic Constraints. Part 2. Program motion planning and control for multicoordinate robot systems with non-holonomic constrains / Karpovich S., Mezhinsky Y., Rusetsky A., Matjushkov V. // *Algoritmization of Mathematical Models for Non-holonomic Constraints System and Nonlinear Mechanics in the Biaxial Stress States of Solid Bodies*. Publishers of Bialystok Technical University, Bialystok, 1998. – P. 105-123.

18. Межинский Ю.С., Карпович С.Е., Степанов. Д.А. Программное обеспечение системы управления гибкого автоматизированного комплекса TurboPlane // *Материалы МНТК «Новые информационные технологии в науке и производстве»*, Минск, 1998. – С. 25-29.

19. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Кузьменков С.В. Автоматизированная система лазерной маркировки // *Материалы МНТК «Новые информационные технологии в науке и производстве»*, Минск, 1998. – С. 121-123.

20. Аналитические модели систем управления / Межинский Ю.С., Карпович С.Е., Дайняк И.В., Пушняков С.Н. // *Материалы МНТК «Новые информационные технологии в науке и производстве»*, Минск, 1998. – С. 23-25.

21. Mezhinsky Yu., Stepanov D. Control Systems and Software design of multi-level coordinate systems. // *Proceedings of 2nd Polish-German Workshop “Tools of Mechatronics”*. – Ilmenau, Germany, 1998. - P. 48 – 54.

22. Karpovich S., Mezhinsky Y. Prediction Of Force-Displacement And Position Error Characteristics Of Linear Stepping Drives // *Proceedings of 44-th International Scientific Colloquium*, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999. – P. 168-172.

23. Mezhinsky Y., Stepanov D., Kuzmenkov S. Control System For Multirobot "Turboplane" // *Proceedings of 44-th International Scientific Colloquium*, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999. – P. 227-229.

24. Алгоритм калибровки и квазизамкнутого управления / Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Степанов Д.А., Кузьменков С.В., Дайняк И.В. // *Веснік сувязі*, 1999. - №1. - С. 198-200.

25. Система управления многокоординатным комплексом / Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Степанов Д.А., Кузьменков С.В. // *Веснік сувязі*, 1999. - №1. – С. 195-198.

26. Межинский Ю.С. Построение программных движений координатных систем и механизмов // В кн. "Теория построения прецизионных механизмов оборудования производства электронной техники", Минск, 1999 г. – С. 219-237.

27. Межинский Ю.С. Алгоритмы выбора траектории в пространстве параметров // В кн. "Теория построения прецизионных механизмов оборудования производства электронной техники", Минск, 1999 г. – С. 113-129.
28. Межинский Ю.С. Принципы действия и конструкции электромагнитных координатных позиционеров // В кн. "Оптимизационное проектирование прецизионных координатных систем и механизмов оборудования производства электронной техники", Минск, 1999 г. – С. 96-117.
29. Межинский Ю.С. Определение оптимальной геометрии зубцовых зон линейного шагового двигателя // В кн. "Оптимизационное проектирование прецизионных координатных систем и механизмов оборудования производства электронной техники", Минск, 1999 г. – С. 126-148.
30. Математические модели расчета и проектирования координатных систем / Межинский Ю.С., Карпович С.Е., Матюшков В.Е., Аваков С.М. // в кн.: «Построение математических моделей автоматизированного проектирования прецизионного оптико-механического оборудования для электронного машиностроения». Под ред. д.т.н., проф. С.Е. Карповича. – Минск, 2000. – С. 46-68.

Тезисы докладов

31. Построение устройств координатных перемещений для ГПС и прецизионного сборочного оборудования на базе ЛШД / Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Ярош А.В., Цемкало В.Н. // Международная НТК "Маркетинг, технология и оборудование микросварки и пайки в производстве ИЭТ", Воронеж, 1992. – С. 195-198.
32. Карпович С.Е., Межинский Ю.С. Применение вектор-функции к исследованию механизмов // Тезисы НМК "Пути и средства совершенствования подготовки специалистов", Минск, МРТИ, 1992 – С. 212-213.
33. Межинский Ю.С., Карпович С.Е. Моделирование шаговых двигателей на основе теории поля // Тезисы докладов научной конференции посвященной 30-летию БГУИР, Минск, 1994. – С. 95-96.
34. Mezhinsky Y., Rusetsky A., Karpovich S. Influence Investigation of stepping load parameters for test forcing // Abstracts of Vth International Symposium on Creep and Coupled processes, Bialystok/ Bialowiesza, 1995. – P. 111-113.
35. Модульное построение гибкого производственного комплекса лазерной обработки. Межинский Ю.С., Кобжев А.Б., Степанов Д.А., Свирский А.Г. // Сборник тезисов докладов республиканской СНТК, Минск, 1997. – С. 153-154.
36. Межинский Ю.С., Кобжев А.Б., Степанов Д.А. Разработка программного обеспечения гибкого производственного комплекса "TurboPlane" // Сборник тезисов докладов республиканской СНТК, Минск, 1997. – С. 179-181.

37. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Степанов Д.А. Построение гибкого производственного комплекса TurboPlane // Тезисы докладов II Всероссийской Научно-технической конференции «Электроника и Информатика 97». Москва, 1997. – С. 326-329.
38. Межинский Ю.С., Степанов Д.А. Програмное обеспечение гибкого производственного комплекса TurboPlane // Тезисы докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и информатика-97», Москва, 1997. – С. 93-94.
39. Карпович С.Е., Межинский Ю.С. Dynamics of multicoordinate systems with linear stepping motors // Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике. – Минск, 1998.– С. 265-269.
40. Межинский Ю.С., Карпович С.Е. Finite Element Modelling and Computer – Aided Design of Electromagnetic Devices // 8-я международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Украина, 1998 г. – С. 236-238.
41. Mezhinsky Yu., Stepanov D. Steuerungssysteme und Softwaredesign von Mehrkoordinatensystemen für die Mechatronik // Abstracts of 2nd Polish-German Workshop “Tools of Mechatronics”. – Ilmenau, Germany, 1998. - P. 16-17.
42. Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Дайняк И.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. – С. 386-387.

Учебные пособия:

43. Карпович С.Е., Яковлюк А.И., Межинский Ю.С. Прикладные задачи по высшей математике. Учебное пособие. Часть 1. – Минск, БГУИР, 1998. – 67 с.
44. Прикладные задачи по высшей математике / Карпович С.Е., Яковлюк А.И., Межинский Ю.С., Русецкий А.М. Учебное пособие. Часть 2. – Минск. БГУИР, 1999. – 98 с.



Распрацоўка і даследаванне прэцызійных каардынатных сістэм з лінейнымі шагавымі рухавікамі для электроннага машынабудавання

Ключавыя словы: мікраэлектроніка, прэцызійнае тэхналагічнае абсталяванне, гібкі аўтаматызаваны комплекс, лінейны шагавы рухавік, дакладнасць пазыцыяніравання, каліброўка, матэматычнае мадэліраванне.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца прэцызійныя каардынатныя сістэмы з лінейнымі шагавымі рухавікамі для электроннага машынабудавання.

Прадмет даследавання – параметры і характарыстыкі лінейных шагавых рухавікоў, а таксама пабудаванне прэцызійных каардынатных сістэм на іх падставе.

Мэта працы – павелічэнне дакладнасных, дынамічных і эксплуатацыйных характарыстык прэцызійных каардынатных сістэм з лінейнымі шагавымі рухавікамі з дапамогай матэматычнага мадэліравання, праграмных сродкаў праектавання, карэктуючых алгарытмаў і іх рэалізацыя ў сістэме кіравання шматкаардынатнага шагавага прывада для гібкага тэхналагічнага абсталявання ў мікраэлектроніцы.

Распрацаваны аналітычныя і лікавыя алгарытмы аналізу магнітнага поля лінейнага шагавага рухавіка, дазваляючыя мадэліраваць яго статычныя і дынамічныя характарыстыкі (цягавое намаганне, пагрэшнасць пазыцыяніравання, хуткасць і паскарэнне); праведзена матэматычнае мадэліраванне і аптымізацыйнае праектаванне каардынатных сістэм оптыка-механічнага і сварачнага абсталявання; распрацаваны алгарытмы каліброўкі шматкаардынатнага лінейнага шагавага прывада; рэалізаваны кантролер шагавага прывада з квазізамкнёным кіраваннем для сярэйна вытвараемага прэцызійнага тэхналагічнага абсталявання, а таксама для шмат-інструментальнага гібкага вытворчага комплексу.

Набытыя тэарэтычныя, практычныя і эксперыментальныя вынікі накіраваны на пашырэнне функцыянальных магчымасцей, у тым ліку дакладнасці і хуткасці прэцызійных каардынатных сістэм абсталявання вытворчасці электроннай тэхнікі, прыборабудавання і інш.

Вынікі дысертацыйнай працы былі стасаваны на канцэрне “Гланар” пры правядзенні навукова-даследчых і вопытна-канструктарскіх работ, а таксама скарыстаны ў Беларускім дзяржаўным універсітэце інфарматыкі і радыёэлектронікі пры правядзенні навучальнага працэсу.

РЕЗЮМЕ

Межинский Юрий Сергеевич

Разработка и исследование прецизионных координатных систем на базе линейных шаговых двигателей для электронного машиностроения

Ключевые слова: микроэлектроника, прецизионное технологическое оборудование, гибкий автоматизированный комплекс, линейный шаговый двигатель, точность позиционирования, калибровка, математическое моделирование.

Объектом исследования являются прецизионные координатные системы на базе линейных шаговых двигателей (ЛШД) для электронного машиностроения.

Предмет исследований – параметры и характеристики ЛШД, а также построение прецизионных координатных систем на их основе.

Цель работы – повышение точностных, динамических и эксплуатационных характеристик прецизионных координатных систем на базе ЛШД путем математического моделирования, программных средств проектирования, корректирующих алгоритмов и их реализации в системе управления многокоординатного шагового привода для гибкого технологического оборудования в микроэлектронике.

Разработаны аналитические и численные алгоритмы анализа магнитного поля ЛШД, позволяющие моделировать его статические и динамические характеристики (тяговое усилие, погрешность позиционирования, скорость, ускорение); проведено математическое моделирование и оптимизационное проектирование координатных систем оптико-механического и сборочного оборудования; разработаны алгоритмы калибровки многокоординатного линейного шагового привода; реализован контроллер шагового привода с квазизамкнутым управлением для серийно выпускаемого прецизионного технологического оборудования, а также для многоинструментального гибкого производственного комплекса.

Полученные теоретические, практические и экспериментальные результаты направлены на расширение функциональных возможностей, в том числе точности и быстродействия прецизионных координатных систем оборудования производства электронной техники, приборостроения и др.

Результаты диссертационной работы были внедрены на концерне «Планар» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также использованы в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники при проведении учебного процесса.

SUMMARY

Mezhinsky Yu. S.

Development and Research of Precision Coordinate Systems
with Linear Stepping Motors for Electronic Machinery

Keywords: microelectronics, precision technological equipment, flexible automated complex, linear stepping motor, positioning accuracy, calibration, mathematical modeling.

Object of research is precision coordinate systems with linear stepping motors for electronic machinery.

Subject of research is parameters and characteristics of linear stepping motors, and also construction of precision coordinate systems on their basis.

Purpose of the work is to increase accuracy, dynamic and operating performances of precision coordinate systems with linear stepping motors by means of mathematical modeling, software for computer-aided design, calibration algorithms and their implementation in control systems of multi-coordinate stepping drives for flexible technological equipment in microelectronics.

Analytical and numerical algorithms of magnetic field simulation for linear stepping motors were developed to simulate its static and dynamic characteristics (motive force, positioning accuracy, speed, acceleration); mathematical modeling and optimization designing of coordinate systems for optical-mechanical and assembly equipment were conducted; algorithms of calibration of multi-coordinate linear stepping drive were developed; control unit of the stepping drive with quasi-closed control was realized for serially produced precision technological equipment, as well as multi-tool flexible industrial complex.

Theoretical, practical and experimental results received in the work are directed on the extension of functional capabilities, including accuracy and fast-action of precision coordinate systems for production equipment of electronic technology, instrument making, etc.

Results of the dissertation were applied at concern "Planar" for research and development works, and also utilized at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics for educational process.

Межинский Юрий Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ КООРДИНАТНЫХ
СИСТЕМ НА БАЗЕ ЛИНЕЙНЫХ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Специальность 05.27.07 – “Оборудование производства
электронной техники”

Специальность 05.13.07 – “Автоматизация технологических
процессов и производств
(в промышленности)”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.04.2000.

Формат 60x84 1/16.

Бумага ПИСЧАЯ.

Печать ризографическая.

Усл. печ.л. 1,62.

Уч.изд.л. 1,0

Тираж 90 экз.

Заказ 169.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП №156

220027, г. Минск, ул. П. Бровки, 6