

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.382.002

ОГЕР ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ
ДИСКРЕТНОСТИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Минск, 2007

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

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

Официальные оппоненты: Баранов Валентин Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии, учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Самойленко Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры робототехнических систем, учреждение образования «Белорусский национальный технический университет»

Оппонирующая организация: Научно-производственное объединение «Интеграл»

Защита состоится 20 сентября 2007 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, 1-й уч. корп., ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Рост степени интеграции интегральных схем за счет уменьшения топологической нормы, а также увеличение размеров кремниевых пластин предъявляют более высокие требования к таким показателям назначения технологического оборудования микроэлектроники, особенно сборочного, как точность и производительность при высоком показателе выхода годных, которые в первую очередь определяются более высокими характеристиками быстродействия и точности при перемещениях и позиционировании инструмента и пластины, реализуемых прецизионными системами перемещений. При этом для сохранения конкурентоспособности желательно, чтобы производитель ИС имел возможность максимально долго использовать существующее оборудование, совершенствуя только его алгоритмическое и аппаратно-программное обеспечение.

В связи с тем, что у большинства видов сборочного оборудования, включая установки зондового контроля, разделения пластин на кристаллы, присоединения проволочных выводов, герметизации в корпус и др., используется линейный шаговый привод с системой управления без обратных связей, то проблему повышения точности и быстродействия необходимо решать на уже сложившемся механо-аппаратном конструктиве путем совершенствования алгоритмического и программного обеспечения, используемого при изготовлении, наладке и эксплуатации систем перемещений, применяемых в составе конкретной единицы сборочного оборудования.

В связи с этим разработка математических моделей, методов, методик и алгоритмов для повышения точности позиционирования систем перемещений без обратных связей по положению, построенных на базе линейных шаговых приводов различной конфигурации, является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Работа выполнялась в рамках научно-исследовательской работы «Подготовка и освоение производства оптико-механического и контрольного оборудования для производства СБИС с топологическими элементами 0,8...0,5 мкм» совместной Программы Беларуси и России «Разработка и создание оптико-механического и контрольного оборудования для производства СБИС» (1998–2001 гг., № госрегистрации 19984182), опытно-конструкторской работы «Разработка прецизионного комплектного привода на базе ЛШД, системы контроля его точностных параметров, освоение производства привода» (2003–2005 гг., № госрегистрации 2004440), научно-исследовательских работ: «Электромагнитный модуль движения привода прямого действия для мобильных машин на основе мотор-колес» (2004 г., № госрегистрации 20042078) ГППИ «Новые компоненты в машиностроении», «Исследование кинематики, динамики и разработка алгоритмов управления для прецизионных многокоординатных систем оборудования электронного

машиностроения, построенных путем композиции двухкоординатных планарных позиционером» (2005 г., № госрегистрации 20051425) ГПОФИ «Механика» и опытно конструкторской работы «Разработать и освоить производство линейных шаговых приводов для модернизации координатных систем сборочного оборудования с целью повышения точности позиционирования» (2005–2006 гг., № госрегистрации 20065838).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке математических моделей и алгоритмов формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения, методики и алгоритмов определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз для повышения точности систем перемещений прецизионного оборудования микроэлектроники без реализации обратных связей по положению в системе управления. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие основные задачи:

– анализ систем перемещений современного оборудования для производства изделий микроэлектроники, факторов, влияющих на точность позиционирования линейного шагового привода (ЛШП), методов и средств обеспечения точности перемещений и повторяемости при позиционировании;

– разработка математических моделей и алгоритмов формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения с минимальными отклонениями координат узлов сетки от номинальных значений для двухфазных, трехфазных и четырехфазных линейных шаговых приводов;

– разработка методики определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз для управления системами перемещений на базе линейных шаговых двигателей (ЛШД);

– экспериментальные исследования точности позиционирования и стабильности точностных характеристик линейного шагового привода во времени для верификации предложенной методики формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения;

– реализация разработанных алгоритмов формирования координатной сетки дискретности и методики определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз как финишной технологической операции производства прецизионных систем перемещений на базе ЛШД.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели и алгоритмы формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения для систем перемещений на базе ЛШД с различным числом фаз, которые учитывают конструктивные особенности используемого электромагнитного фазового модуля, погрешность изготовления и неоднородность магнитных свойств зубцовых поверхностей статора и полюсов индуктора, использование которых позволяет обеспечить формирование точек устойчивой позиционной фиксации с отклонением от номинальных значений в диапазоне 2...5 мкм.

2. Методика определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, которая позволяет минимизировать накопленную погрешность и неравномерность шага координатной сетки дискретности, а также учитывает влияние температурного дрейфа размеров компонентов координатной системы на погрешность перемещений, применение которой как финишной технологической операции производства систем перемещений на базе ЛШД позволяет повысить точность позиционирования в 8...10 раз.

3. Алгоритм и программное обеспечение для получения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз в виде программных файлов коррекции, применение которых в контроллере системы перемещений на базе ЛШД без реализации обратных связей по положению обеспечивает уменьшение погрешности перемещений до $\pm 2... \pm 5$ мкм.

Личный вклад соискателя

В диссертационной работе описаны разработанные соискателем математические модели и алгоритмы формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения, методика определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, алгоритм для получения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, реализованный в программном обеспечении автоматизированной станции контроля точностных параметров ЛШП. Также изложены результаты исследований, в которых соискатель принимал участие: в проведении экспериментов, обработке результатов, их обобщении и трактовке, написании статей и отчетов.

Участие соавторов заключалось как в проведении совместных исследований по согласованной схеме, так и в обсуждении полученных результатов. Постановка цели и задач исследований, анализ и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н. С.Е. Карповичем. Основными соавторами работ являются А.В. Безлюдов (в разработке программного обеспечения автоматизированной станции контроля точностных параметров ЛШП), к.т.н. И.В. Дайняк (в проведении экспериментальных исследований точности позиционирования линейного шагового привода) и А.А. Агранович (в разработке компьютерных моделей и вычислении координат узлов сетки дискретности).

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: 6-я Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (г. Нарочь, Беларусь, 2001 г.); Международная научно-техническая конференция «Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления» (г. Минск, Беларусь, 2002 г.); 5-я, 7-я и 9-я Международные школы-семинары аспирантов, магистрантов и студентов «Современные информационные технологии» (г. Браслав, Беларусь, 2002, 2004, 2006 гг.); 3-я и 4-я Международные научно-технические конференции «Проблемы проектирования

и производства радиоэлектронных средств» (г. Новополоцк, Беларусь, 2004, 2006 гг.); Международная научно-практическая конференция «Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров» (г. Минск, Беларусь, 2007 г.); а также были представлены на следующих выставках: 8-я Международная специализированная выставка «Металлообработка-2001» (г. Минск, Беларусь, 27–30 марта 2001 г.); 5-я Международная специализированная выставка «Перспективные технологии и системы» (г. Минск, Беларусь, 4–7 ноября 2003 г.) и на выставке, посвященной Дню белорусской науки (г. Минск, Беларусь, 25 января 2007 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 11 статей в научных журналах, общим объемом 5 авторских листов, 4 статьи в сборниках научных статей, 3 статьи в материалах научных конференций и 3 тезисов докладов на международных научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений. В первой главе проводится анализ систем перемещений на базе линейного шагового привода. Во второй главе описаны разработанные математические модели и алгоритмы формирования сетки дискретности для двухфазного, трехфазного и четырехфазного ЛШД. В третьей главе описана разработанная методика формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения. В четвертой главе описана разработанная методика определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, позволяющая корректировать накопленную погрешность, неравномерность шага сетки дискретности координатной системы, минимизировать влияние температурного дрейфа размеров компонентов системы перемещений. В пятой главе приведены сведения о реализации результатов диссертации в комплектах линейных шаговых приводах. В приложениях приведены графики распределения точек устойчивого равновесия индуктора ЛШД внутри периода перемещения при электронном дроблении шага, программа и методика приемочных испытаний линейных шаговых приводов и акты о практическом использовании результатов диссертации в разработках ГНПО ТМ «Планар» (г. Минск), на научно-производственном предприятии «Прецизионные технологические системы» (г. Минск) и в Институте физики Национальной академии наук Беларуси.

Общий объем диссертационной работы составляет 166 страниц, из них 77 страниц текста, 78 рисунков на 45 страницах, 26 таблиц на 13 страницах, 5 приложений на 20 страницах, библиографический список из 107 наименований на 8 страницах и 21 собственной публикации автора на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

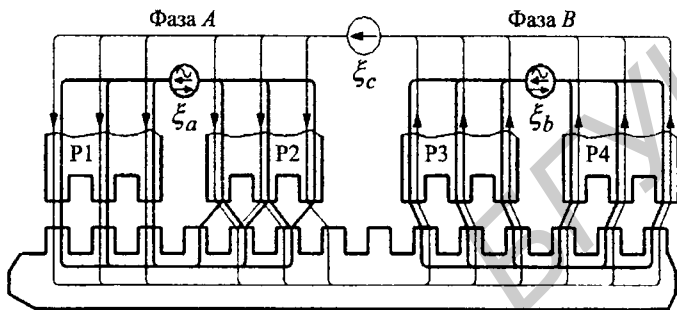
Во введении проанализированы основные тенденции развития микроэлектроники, связанные с увеличением размеров кремниевых пластин и уменьшением топологической нормы. Показано, что указанные тенденции кроме совершенствования технологии производства требуют также совершенствования технологического оборудования: большей точности позиционирования, более высоких разрешения и быстродействия. Определяющую роль и принципиальное значение при этом имеют системы координатных перемещений различного уровня и назначения в составе технологического оборудования микроэлектроники. Поэтому повышение точности систем перемещений на базе линейного шагового привода без использования обратных связей в системе управления представляет актуальную научную задачу и отвечает потребностям разработчиков современного технологического оборудования для производства изделий микроэлектроники.

В первой главе проведен анализ основных показателей назначения таких видов сборочного оборудования, как оборудование зондового контроля, утонения пластин, резки и лазерного скрайбирования, контроля и касетирования кристаллов, присоединения кристаллов, присоединения выводов, который показал, что для большинства его видов характерно многократно повторяющаяся позиционная циклограмма работы с координатными перемещениями, реализуемыми линейными, поворотными и планарными приводами на базе ЛШД, конфигурируемыми в многокоординатные системы перемещений, от точности и быстродействия которых непосредственно зависит точность и производительность сборочного оборудования.

В связи с особенно быстрым уменьшением топологической нормы производства ИС в последнее время характеристика точности позиционирования является определяющей, достижение требуемого уровня которой в оборудовании может осуществляться или путем калибровки системы перемещений на сетке дискретности высокого разрешения, или путем введения в систему управления дополнительной системы измерения координат, построенной на датчиках обратных связей по положению, их обработки контроллерными платами более высокого уровня, чем в системах без обратных связей, с более сложным программным обеспечением.

В главе также проведен анализ методов и средств повышения точности систем перемещений на базе ЛШД, который включает конструктивные и технологические методы, алгоритмические методы и средства, реализуемые в системе управления. Проведенный анализ показал, что удовлетворение требований по точности перспективного сборочного оборудования в пределах 2...5 мкм может быть достигнуто без существенного удорожания комплектного привода только за счет программного формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения посредством определения соответствующих оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз исполнительного линейного шагового двигателя.

Во второй главе представлены результаты по разработке математических моделей формирования сетки дискретности координатной системы на базе линейного шагового привода. На основе предложенной схемы циркуляции магнитных потоков магнитодвижущей силы (МДС) фаз линейного шагового двигателя (рисунок 1) получены варианты конфигурации зубцовых поверхностей полюсов индуктора, анализ которых показал, что сопротивление магнитному потоку постоянной МДС, проходящему через электромагнитный фазовый модуль (ЭФМ), носит переменный характер и при движении приводит к модуляции величины магнитного потока.



ξ_c – постоянная МДС; ξ_a, ξ_b – фазовые МДС фаз А, В; P1, P2, P3, P4 – полюса фаз

Рисунок 1 – Схемы циркуляции магнитных потоков МДС в электромагнитном фазовом модуле

Следствием этого является тот факт, что при разной величине магнитных потоков постоянной МДС, проходящих через полюса ЭФМ, различаются и тяговые силы, приложенные к полюсам фаз, что вызывает неравенство микрошаговых перемещений внутри периода зубцовой поверхности.

При электронном дроблении полного шага перемещения результирующее тяговое усилие формируется фазовыми МДС электромагнитных фазовых модулей. Тяговые усилия каждой из фазовых МДС направлены противоположно друг другу. Точки позиционирования ЭФМ соответствуют узлам координатной сетки дискретности, координаты которых определяются соотношением величин взаимодействующих фазовых МДС, причем изменение соотношения величин фазовых МДС приводит к перемещению ЭФМ в другой узел координатной сетки.

Координаты узлов сетки дискретности координатной системы при использовании в ЛШД двухфазного ЭФМ с постоянной МДС, расположенной между фазами, определяются из условия равенства нулю результирующей тяговой силы по выражению

$$\begin{aligned}
 & |A + E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_1\tau)}{\tau} + |B - E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_2\tau)}{\tau} + \\
 & + |B - E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_3\tau)}{\tau} + |A + E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_4\tau)}{\tau} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где A – номинальное значение тяговой силы полюсов P1, P4;

B – номинальное значение тяговой силы полюсов P2, P3;

E_a, E_b – периодические функции тяговой силы, развиваемой фазовыми МДС на полюсах фаз A и B ; $E_a = E \cos \alpha$, $E_b = -E \sin \alpha$, где E – амплитудное значение тяговой силы, развиваемой фазовой МДС на полюсах ЭФМ, α – аргумент функции тяговой силы, определяющий уровни квантования управляющих токов фаз, изменяется дискретно в диапазоне $[0; 2\pi]$;

x – величина перемещения от начала периода в зубцовой поверхности статора;
 $S_1 \dots S_4$ – коэффициент относительного смещения зубцов полюсов ЛШД внутри периода зубцовой поверхности, S_i принимает значения 0; 0,25; 0,5; 0,75;

τ – период зубцовой поверхности.

Проанализированы факторы, влияющие на формирование статической сетки дискретности координатной системы:

1) соотношение величин значений тяговых сил A, B и E , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ;

2) соотношение номинальных смещений координат зубцов зубцовой поверхности полюсов ЭФМ на периоде зубцовой поверхности статора, которое может нарушить изотропность магнитных характеристик системы периодических зубцовых поверхностей статора и полюсов ЭФМ и привести к отклонению координат узлов сетки от номинальных значений;

3) анизотропия магнитных свойств статора, которая приводит к колебаниям величин магнитных сопротивлений, замыкающих магнитный поток между полюсами ЭФМ, и изменению величин тяговых сил A, B, E_a, E_b , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ.

В диссертации также разработаны модели и алгоритмы формирования сетки дискретности для трехфазного и четырехфазного ЭФМ. Так, для четырехфазного ЭФМ математическая модель для расчета координат узлов сетки дискретности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & |A + E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_1\tau)}{\tau} + |B - E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_2\tau)}{\tau} + |B - E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_3\tau)}{\tau} + \\ & + |A + E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_4\tau)}{\tau} + |A + E_c| \sin \frac{2\pi(x + S_5\tau)}{\tau} + |B - E_c| \sin \frac{2\pi(x + S_6\tau)}{\tau} + \\ & + |B - E_d| \sin \frac{2\pi(x + S_7\tau)}{\tau} + |A + E_d| \sin \frac{2\pi(x + S_8\tau)}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где E_a, E_b, E_c, E_d – периодические функции тяговой силы фазовых МДС на полюсах фаз; $E_a = E \cos \alpha$, $E_b = -E \sin \alpha$, $E_c = -E \sin(\alpha - \pi/4)$, $E_d = -E \cos(\alpha - \pi/4)$;

$S_1 \dots S_8$ – коэффициент относительного смещения зубцов полюсов ЛШД внутри периода зубцовой поверхности, S_i принимает значения 0; 0,5; 0,75; 0,25; 0,125; 0,625; 0,875; 0,375.

В третьей главе представлена разработанная методика формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения.

В диссертации показано, что распределение тяговых сил полюсов ЭФМ отклоняется от синусоидального в силу неодинаковости величины периода зубцовой поверхности, неодинаковости магнитного сопротивления полюсов и областей статора, изменения размеров ЭФМ вследствие теплового дрейфа, тангажа и рыскания индуктора при перемещении по статору, магнитного гистерезиса материалов ЭФМ и статора. Вследствие отклонения формы тягового усилия от синусоидальной дробление периода на полном шаге перемещения будет неравномерным. Проведенные исследования погрешности дробления периода перемещения на реальном двигателе показали, что её значение неодинаково в пределах одного периода перемещения и не повторяется на разных периодах перемещения.

Дискретность координатной сетки определяется величиной дискретности изменения аргумента α функций тяговых сил фазовых МДС в выражениях (1) и (2), поэтому уменьшение дискретности изменения аргумента α приводит к уменьшению дискретности формируемой координатной сетки.

Так как рабочим режимом ЛШД является условие $|E_a|, |E_b| \leq |A|$, то в выражении (1) знак модуля можно заменить скобками и после преобразований получить окончательное выражение для определения координат узлов сетки дискретности двухфазного ЭФМ с постоянной МДС, расположенной между фазами:

$$(A - B + 2E_a) \sin \frac{2\pi x}{\tau} - (B - A - 2E_b) \cos \frac{2\pi x}{\tau} = 0. \quad (3)$$

Произведенные по выражению (3) расчеты показали, что при $A = 0,85B$ и выше полоса колебания шага сетки дискретности координатной системы не превосходит 0,006 τ . Это соответствует погрешности положения узла сетки дискретности координатной системы $\pm 1,92$ мкм при $\tau = 640$ мкм. Эта особенность присуща конструкциям ЭФМ с промежуточным расположением постоянной МДС и циклически повторяется на каждом периоде перемещения.

Разработанная в диссертации методика формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения содержит следующие стадии:

1. Формирование равномерной сетки дискретности отдельного периода перемещения с использованием переменной дискретности аргумента управляющего воздействия α посредством определения базового набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз ЛШД, минимизирующих величину отклонения координат узлов сетки дискретности от номинальных.

2. Коррекция закона изменения дискретности аргумента управляющего воздействия α для каждого отдельного периода перемещений по контрольным точкам, координаты которых измерены предварительно.

3. Статическая стыковка сеток координат смежных периодов перемещения путем коррекции координат узлов сетки дискретности текущего

периода перемещения; поправка осуществляется на величину индивидуальной погрешности координаты начала текущего периода.

4. Динамическая стыковка сеток координат смежных периодов перемещения в процессе функционирования координатной системы путем коррекции координат узлов сетки дискретности текущего периода перемещения; поправка выполняется на величину температурного дрейфа размеров координатной системы.

Разработанная методика формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения была реализована в алгоритмическом и программном обеспечении автоматизированной станции контроля точностных параметров координатных систем, структура которой представлена на рисунке 2.

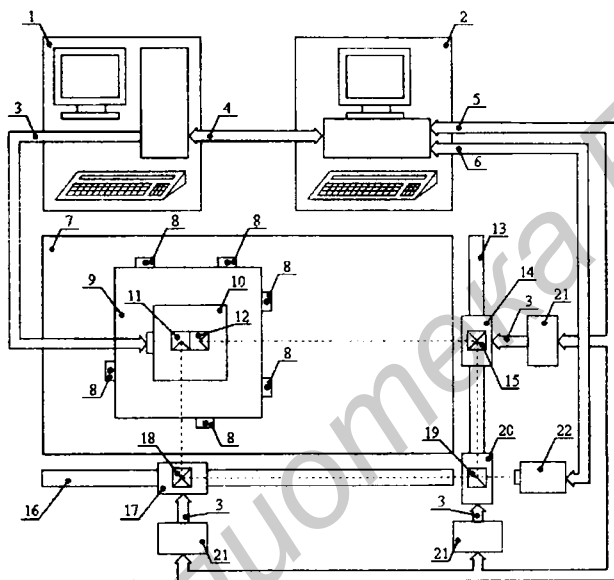


Рисунок 2 – Структура автоматизированной станции контроля точностных параметров ЛШП

1 – система управления ЛШД; 2 – система измерения координат; 3 – интерфейс фаз испытуемого ЛШД, кареток интерферометров X,Y и зеркала поворотного; 4 – интерфейс синхронизации работы системы управления ЛШД и системы измерения координат; 5 – интерфейс управления каретками интерферометров X,Y и зеркала поворотного; 6 – интерфейс чтения показаний фотоприёмника лазера; 7 – основание; 8 – элементы фиксации статора на основании; 9 – статор испытуемого ЛШД; 10 – индуктор испытуемого ЛШД; 11,12 – рефлектоотражатели Y и X; 13 – ось Y; 14 – каретка Y; 15 – интерферометр Y; 16 – ось X; 17 – каретка X; 18 – интерферометр X; 19 – зеркало поворотное; 20 – каретка зеркала поворотного; 21 – контроллер кареток; 22 – лазер.

Функционально станция контроля точностных параметров содержит следующие системы:

– систему управления ЛШД на базе промышленной одноплатной ЭВМ типа PCA-6753-F-G0A2 Advantech и фазовые формирователи токов, каждый из которых обеспечивает управление двумя фазами двигателя импульсными токами;

– систему измерения координат, выполненную на базе точного лазерного измерителя координат Dynamic Calibrator HP 5529A фирмы Hewlett Packard и позволяющую измерять координату с дискретностью 0,0001 мкм;

– систему позиционирования оптических элементов на базе ЛШД.

В состав программного обеспечения системы измерения координат входят тесты измерения накопленной погрешности шага перемещения индуктора ЛШД, неравномерности дробления полного шага перемещения, неравномерности шага сетки дискретности, проверки повторяемости координаты позиционирования, проверки гистерезиса.

Исследование стабильности координат узлов сетки дискретности проводилось в пределах одного периода перемещения с шагом 0,001 мм на двухкоординатном ЛШД с периодом зубцовой поверхности статора и полюсов ЭФМ $\tau = 1,0$ мм с помощью описанной выше станции контроля точностных параметров. В ходе исследования были проведены две серии экспериментов с интервалом 13 суток по три эксперимента в каждой с интервалом в 1 сутки. Результаты исследований, приведенные на рисунке 3, показали, что изменение величины отклонений координат узлов сетки дискретности координатной системы стабильно во времени.

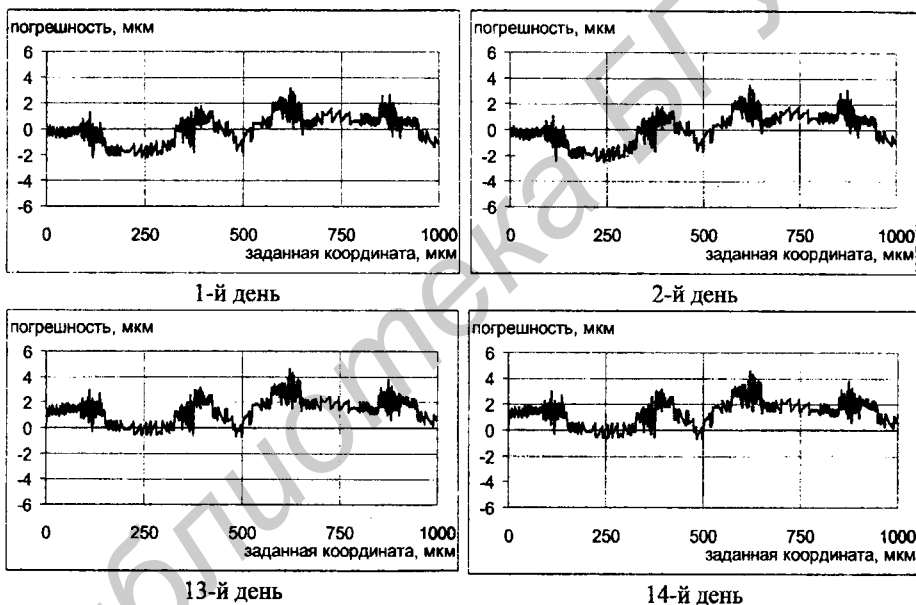


Рисунок 3 – Графики величин отклонений узлов сетки дискретности от номинальных координат

Несмотря на колебания графиков величин отклонений, они лежат в пределах полосы ± 5 мкм, а отклонение от среднего значения не превосходит ± 4 мкм, что говорит о стабильности координатной сетки дискретности и подтверждает эффективность предложенной методики ее формирования.

Четвертая глава содержит результаты по разработке методики и алгоритма определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз линейного шагового двигателя.

Целью разработанной методики является получение прецизионной координатной системы как механо-аппаратно-программного комплекса, состоящего из конкретного ЛШД, системы управления и следующих файлов: базовой коррекции сетки дискретности периода перемещений, коррекции накопленной погрешности координаты начала периода перемещения, минимизации погрешности координат узлов сетки дискретности в поле периода перемещения, учета температурного фактора.

В соответствии с разработанной методикой, вначале формируется эталонная координатная система (ЭКС), начало координат которой совмещено с точкой (началом периода зубцовой поверхности) на статоре ЛШД, выбранной за точку отсчета координат ЛШП. Величина шага дискретности ЭКС постоянна и равна $\tau/(2Uf)$, где τ – период зубцовой поверхности, U – число уровней квантования фазовых токов, f – число фаз двигателя.

Коррекция накопленной ошибки и температурного расширения статора ЛШД выполняется по формуле

$$X' = X + P_N + P_T, \quad (5)$$

где X – эталонная координата;

P_N – поправка, учитывающая накопленную погрешность периода перемещения;

P_T – поправка, учитывающая температурный дрейф координатной системы.

Поправка на накопленную погрешность P_N вычисляется по следующей формуле:

$$P_N = -(X_{Si} - X_i), \quad (6)$$

где X_{Si} – измеренное значение координаты на i -м периоде;

X_i – эталонное значение координаты на i -м периоде;

i – номер периода перемещения, который определяется как целая часть отношения X_i/τ .

Поправка на температурное расширение статора P_T вычисляется по следующей формуле:

$$P_T = \frac{\left[(D_{j+1} - E_{j+1})(T - D_T \cdot j) - (D_j - E_j)(T - D_T \cdot (j+1)) \right] \cdot P_D}{D_T(P_D - P_E)} - \frac{\left[(D_{j+1} - E_{j+1})(T - D_T \cdot j) - (D_j - E_j)(T - D_T \cdot (j+1)) \right] \cdot (X + P_N)}{D_T(P_D - P_E)} \quad (7)$$

$$\frac{D_{j+1} \cdot (T - D_T \cdot j) - D_j \cdot (T - D_T \cdot (j+1))}{D_T},$$

где T – абсолютное время, отсчитываемое с момента начала работы привода или с момента окончания технологического прогона;

D_T – интервал времени, через который снимались данные о температурном дрейфе размеров поля перемещений в контрольных точках;

P_D – координата первой контрольной точки (в начале рабочей зоны);

P_E – координата второй контрольной точки (в конце рабочей зоны);
 D_j – величина температурного изменения координаты первой контрольной точки в момент времени $j \cdot D_T$;
 E_j – величина температурного изменения координаты второй контрольной точки в момент времени $j \cdot D_T$;
 j – номер индекса текущей температурной компенсации в массивах D и E , определяется как целая часть отношения T/D_T .

Перед расчетом P_T выполняется многочасовой прогон ЛШД в режиме циклического перемещения индуктора по всей области поля перемещений координатной системы. Через каждый интервал времени D_T в массиве D для первой контрольной точки P_D и массиве E для второй контрольной точки P_E фиксируются значения D_j и E_j . После заполнения массивов D и E по формуле (7) рассчитывается поправка P_T для компенсации температурного дрейфа размеров поля перемещений в любой интервал времени работы ЛШД.

Для реализации коррекции неравномерности шага сетки дискретности в диссертации предложена процедура, включающая: 1) расчет номинальных координат узлов сетки дискретности C_k на периоде перемещений; 2) расчет номинальных значений кодов уровней квантования управляющих токов фаз A_k, B_k ; 3) измерения фактических координат узлов сетки дискретности M_k на периоде перемещения; 4) назначение каждому узлу сетки дискретности значений уровней квантования управляющих токов, соответствующих минимальной погрешности координаты.

Расчет номинальных значений кодов уровней квантования управляющих токов фаз выполняется по формуле

$$A_k = INT \left[\frac{U}{2} - \left(\frac{U}{2} - 1 \right) \cdot \sin \left(\frac{2\pi C_k}{\tau} \right) \right], \quad B_k = INT \left[\frac{U}{2} - \left(\frac{U}{2} - 1 \right) \cdot \cos \left(\frac{2\pi C_k}{\tau} \right) \right], \quad (8)$$

где INT – операция взятия целой части.

Далее осуществляется цикл измерения фактических координат M_k , в которые позиционируется индуктор ЛШД при управлении соответствующими кодами уровней квантования токов фаз A_k, B_k ; измерение производится средствами автоматизированной станции контроля точностных параметров координатных систем.

На последнем шаге осуществляется определение кодов уровней квантования управляющих токов, минимизирующих погрешность ε_k позиционирования в k -й узел сетки дискретности, и присвоение k -й позиции кодов уровней квантования фазовых токов A_k, B_k кодов уровней квантования фазовых токов A_l, B_l l -й позиции, для которой выполняется условие

$$\varepsilon_k = \min |C_k - M_l|, \quad (9)$$

где ε_k – погрешность позиционирования в k -й узел сетки дискретности;
 C_k – номинальная координата k -го узла сетки дискретности;

M_l – фактическая координата l -го узла сетки дискретности.

В диссертации разработан алгоритм определения оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз привода, который базируется на описанной выше методике и состоит из 5 стадий: 1) технологический прогон; 2) базовая коррекция сетки дискретности периода перемещений; 3) коррекция накопленной погрешности координаты начала периода перемещения; 4) минимизация погрешности координат узлов сетки дискретности в поле периода перемещения; 5) определение температурного изменения размеров компонентов координатной системы.

Технологический прогон выполняется для приведения параметров составных частей координатной системы к рабочим значениям. Базовая коррекция сетки дискретности периода перемещений выполняется на случайно выбранном периоде перемещения в поле координатной системы. Затем, в соответствии с описанной выше методикой, формируются файлы поправок (файлы коррекции), на основании которых выбираются уровни квантования управляющих фазовых токов, соответствующие координатам точки позиционирования.

Разработанные методика и алгоритм определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз были реализованы в программном обеспечении автоматизированной станции контроля точностных параметров ЛШП.

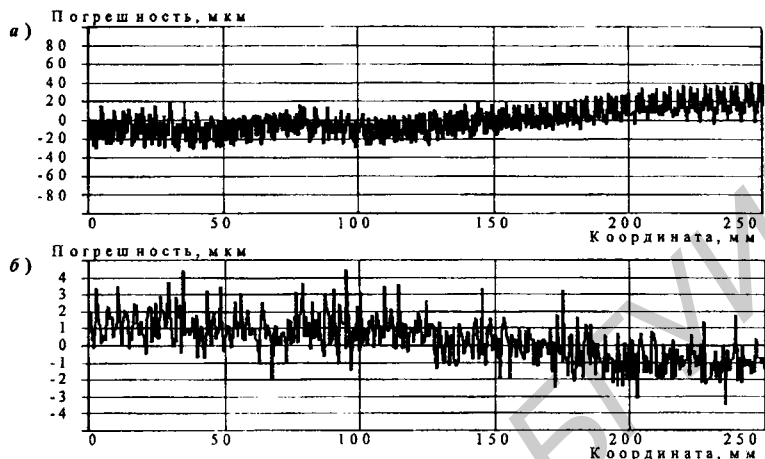
Исследования точности позиционирования координатных систем, в системе управления которых использовались файлы коррекции, проводились с помощью автоматизированной станции контроля точностных параметров ЛШП на пяти двухосевых ЛШД (двигатели 1–5) с периодом зубцовой поверхности статора и полюсов индуктора $\tau = 0,508$ мм и одном двухосевом ЛШД (двигатель 6) с периодом зубцовой поверхности $\tau = 1,0$ мм. В двигателях 1–5 электромагнитные фазовые модули в индукторах для перемещения по оси X расположены на линии симметрии, для перемещения по оси Y – на периферии индуктора вдоль его короткого торца справа и слева от оси симметрии. В индукторе двигателя 6 электромагнитные фазовые модули для перемещения по осям X и Y расположены в шахматном порядке относительно центра симметрии индуктора.

Пример измеренной точностной характеристики системы перемещений без использования файлов коррекции и с использованием файлов коррекции в системе управления приведены на рисунке 4.

Как показывают графики, приведенные на рисунке 4, в результате управления набором оптимальных уровней квантования токов фаз поле колебания погрешности позиционирования уменьшилось с $-30...+40$ мкм (рисунок 4, а) до $-3,5...+4,5$ мкм (рисунок 4, б), что соответствует повышению точности привода примерно в 10 раз.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований была осуществлена верификация разработанной методики формирования набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, по которой разработано программное обеспечение автоматизированной

станции контроля точностных параметров ЛПП, используемое в настоящее время для формирования файлов коррекции сетки дискретности координатных систем оборудования, производимого на ГНПО ТМ «Планар».



а) без использования файлов коррекции; б) с использованием файлов коррекции (график приведен в увеличенном масштабе)

Рисунок 4 – Графики погрешности позиционирования ЛШД с периодом зубцовой поверхности $\tau = 0,508$ мм

В пятой главе приведены сведения по реализации результатов, полученных в диссертации. Результаты работы нашли применение при разработке и создании комплектных прецизионных приводов прямого действия на основе линейных шаговых двигателей.

В рамках задания 2.02 «Разработать и исследовать унифицированный многоосный комплексный электропривод прямого действия с прецизионными координатными осями для электронного машиностроения» ГППИ «Новые компоненты в машиностроении» был реализован комплектный привод прямого действия со схемами ключевой стабилизации тока в системе управления. Система управления построена на базе шасси IPC-644-80BP и включает одноплатный компьютер PCA-6740L-OCA2, четырехканальный ЦАП DAC12-4, квадратурный декодер ЛИР-920. Управление двигателем осуществляется через интерфейс RS-232 или RS-485 (моноканал) с использованием файлов коррекции управляющих токов фаз.

В ГНПО ТМ «Планар» были разработаны и созданы приводы линейные шаговые БРАС.303313.173 и БРАС.303313.173-03, представляющие собой планарные системы перемещений для применения в установках зондового контроля. Первый привод имел период зубцовой поверхности статора и полюсов ЭФМ 0,508 мм; индуктор позволял развивать скорость 0,275 м/с при ускорении до 10 м/с² с полезной нагрузкой 3,5 кг. Второй привод имел период зубцовой поверхности статора и полюсов ЭФМ 1,0 мм; индуктор позволял развивать скорость 0,6 м/с при ускорении до 14 м/с² с полезной нагрузкой

3,5 кг. Для обоих приводов были определены наборы оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз на завершающей стадии их производства, а в системе управления использовались полученные файлы коррекции, что позволило обеспечить дискретность перемещений 2 мкм и точность позиционирования ± 5 мкм.

Под руководством автора по заказу научно-технического центра «Амплитуда» (г. Москва, Россия) был разработан комплектный одноосный линейный шаговый привод для применения в гамма-сканере «ГаммаСкан-01А» для планарной хроматографии. Ось перемещения разработанного привода выполнена в виде статора ЛШД с периодом зубцовой поверхности 1,0 мм, по которой перемещается индуктор на направляющих, выполненных на подшипниках качения, максимальная скорость перемещения индуктора – до 0,7 м/с при ускорении $6,5 \text{ м/с}^2$ на поле перемещений 300 мм. Применение разработанной методики формирования координатной сетки дискретности позволило достичь на шаге перемещения индуктора 125 мкм повторяемости координаты узла сетки дискретности не более ± 3 мкм.

В приложениях представлены акты о практическом использовании результатов диссертации в разработках ГНПО ТМ «Планар» (г. Минск), на научно-производственном предприятии «Прецизионные технологические системы» (г. Минск) и в Институте физики Национальной академии наук Беларуси, графики распределения точек устойчивого равновесия ЭФМ внутри периода зубцовой поверхности ЛШД при электронном дроблении шага перемещения, а также программа и методика приемочных испытаний опытных образцов линейного шагового привода с помощью автоматизированной станции контроля точностных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложена структура прецизионной системы перемещений в виде механо-аппаратно-программного комплекса, состоящего из линейного шагового двигателя, системы управления, программных средств системы управления с программными файлами формирования сетки дискретности координатной системы [12, 13, 15, 19–21].

2. Разработаны математические модели и алгоритмы формирования сетки дискретности высокого разрешения для координатных систем на базе ЛШД с различным числом фаз, которые учитывают конструктивные особенности электромагнитного фазового модуля, факторы погрешности изготовления и неоднородность магнитных свойств зубцовых поверхностей статора и полюсов индуктора и позволяют установить степень их влияния на точность позиционирования. Разработанные модели и алгоритмы позволяют формировать координатную сетку дискретности с отклонением узлов от номинальных координат в диапазоне 2...5 мкм [1, 3, 4, 9–11, 17].

3. Предложена методика определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз линейного шагового привода на базе

ЛШД; методика позволяет минимизировать накопленную погрешность и неравномерность шага сетки дискретности, а также учитывает влияние температурного дрейфа размеров компонентов координатной системы на погрешность перемещений. Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная методика может быть применена к линейным шаговым приводам вне зависимости от размеров периода зубцовых поверхностей статора и полюсов, что позволяет перейти на более крупные шаги и увеличить площадь эффективного взаимодействия зубцовых поверхностей статора и полюсов ЭФМ. При этом достигается увеличение номинальной скорости в 2,4 раза, а ускорения – в 1,8...1,9 раза [5, 8, 16, 18].

4. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз линейного шагового привода, реализованные в автоматизированной станции контроля точностных параметров координатных систем на основе предложенной методики, позволяющие при использовании в системе управления файлов коррекции повысить точность позиционирования линейного шагового привода на базе ЛШД без обратных связей до $\pm 2... \pm 5$ мкм. В результате применения разработанных алгоритма и программного обеспечения при изготовлении привода как технологической операции можно получить приводы с практической точностью позиционирования $\pm 2... \pm 5$ мкм, улучшенной по сравнению с системами управления без использования файлов коррекции в 8...10 раз [2, 6, 7, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Проблему повышения точности систем перемещений без обратной связи по положению рекомендуется решать путем совершенствования алгоритмов управления, на основе использования файлов коррекции, полученных по разработанному в диссертации алгоритму определения набора уровней квантования управляющих токов фаз [3–5].

2. Для создания систем перемещений на базе линейного шагового привода с диапазоном точности $2...5$ мкм без датчиков обратных связей достаточно использовать в программном обеспечении системы управления приводом разработанные в диссертации алгоритмы формирования набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз с поправками на накопленную погрешность и температурный дрейф размеров координатной системы, причем при этом обеспечивается стабильность точностных характеристик во времени [9, 10].

3. Разработанные алгоритмы формирования координатной сетки дискретности обеспечивают равномерную (с погрешностью координаты $\pm 2... \pm 5$ мкм) плотность распределения узлов на всем поле перемещений независимо от количества влияющих факторов и степени их влияния, поэтому можно обеспечить точностные характеристики координатной системы на базе ЛШД за счет алгоритмов и программ управления, а не за счет точности изготовления геометрии зубцовых поверхностей статора и полюсов ЭФМ и введения сложных и дорогостоящих обратных связей по положению [9, 10].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1 Огер, В.П. Повышение производительности микрофотонаборных генераторов изображений / В.П. Огер // Электронная промышленность. – 1985. – №2. – С. 50–55.

2 Измерительная система контроля параметров позиционирования ЛШД / В.П. Огер, А.В. Безлюдов, С.Е. Карпович, Д.А. Степанов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – №1(11)/3. – С. 167–168.

3 Безлюдов, А.В. Повышение точности соответствия координат сетки дискретности координатной системы линейного шагового привода координатам сетки дискретности эталонной координатной системы / А.В. Безлюдов, В.П. Огер // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №1(13)/2. – С. 30–33.

4 Безлюдов, А.В. Повышение точности координатных систем на основе разомкнутого линейного шагового привода / А.В. Безлюдов, В.П. Огер // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №2(14)/1. – С. 107–109.

5 Огер, В.П. Выбор значений уровней квантования управляющих токов в линейном шаговом приводе / В.П. Огер, А.В. Безлюдов, И.В. Дайняк // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – №2(14)/1. – С. 104–107.

6 Двухкоординатный прецизионный шаговый привод прямого действия / Н.И. Гайков, В.П. Огер, А.В. Безлюдов, С.Е. Карпович, И.В. Дайняк // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С. 323–327.

7 Гайков, Н.И. Ключевая стабилизация тока при управлении шаговым приводом / Н.И. Гайков, А.В. Безлюдов, В.П. Огер // Известия Белорусской инженерной академии. – 2004. – №1(17)/4. – С. 328–332.

8 Огер, В.П. Калибровка координатной системы привода прямого действия на базе ЛШД / В.П. Огер // Инженерный вестник. – 2006. – №1(21)/5. – С. 63–69.

9 Огер, В.П. Исследование факторов формирования сетки дискретности координатной системы линейного шагового привода / В.П. Огер, А.В. Безлюдов // Инженерный вестник. – 2006. – №1(21)/5. – С. 70–75.

10 Огер, В.П. Исследование стационарности сетки дискретности координатных систем высокого разрешения / В.П. Огер, А.В. Безлюдов, И.В. Дайняк // Инженерный вестник. – 2006. – №1(21)/5. – С. 76–81.

11 Компьютерное моделирование системы управления планарным приводом прямого действия / А.А. Агранович, В.В. Жарский, С.М. Аваков, В.П. Огер // Доклады БГУИР. – 2007. – №1(17). – С. 115–119.

Статьи в сборниках научных статей

12 Структура гибкой производственной системы. Технические компоненты и функциональные системы / А.С. Ключников, Э.М. Колесник,

Ю.Ф. Ляшук, В.П. Огер, М.С. Басилашвили // Проблемные вопросы производства и обработки информации: сб. науч. ст. – Минск: Изд-во «Университетское», 1987. – С. 5–11.

13 Иерархическая интерактивная гибкая производственная система механообработки / А.С. Ключников, Э.М. Колесник, Ю.Ф. Ляшук, В.П. Огер // Проблемные вопросы производства и обработки информации: сб. науч. ст. – Минск: Изд-во «Университетское», 1987. – С. 30–37.

14 Огер, В.П. Прецизионная измерительная система контроля параметров ЛШД / В.П. Огер, А.В. Безлюдов, С.В. Карпович // Мехатроника и современная механика: сб. науч. ст. / Под ред. С.Е. Карповича. – Минск: БГУИР, 2001. – С. 99–101.

15 Дайняк, И.В. Планарный привод с механизмом ограничения разворота / И.В. Дайняк, В.В. Жарский, В.П. Огер // Машиностроение. – Минск, 2007. – Вып. 23. – С. 110–114.

Материалы научных конференций

16 Огер, В.П. Метод наладки координатной системы линейного шагового привода подбором значений уровней квантования управляющих токов / В.П. Огер, А.В. Безлюдов // Моделирование интеллектуальных процессов проектирования, производства и управления: материалы 3-й Междунар. конф., Минск, 13–15 ноября 2002 г. – Минск: ИТК, 2002. – С. 127–128.

17 Агранович, А.А. Компьютерная модель планарного привода прямого действия / А.А. Агранович, В.В. Жарский, В.П. Огер // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–11 апреля 2007 г. : в 4 ч. / М-во образования РБ, МГВРК; под общ. ред. Н.А. Цырельчука. – Минск: МГВРК, 2007. – Ч. 1. – С. 91–94.

18 Дайняк, И.В. Формирование микрошаговых движений в системах перемещений на ЛШД / И.В. Дайняк, В.В. Жарский, В.П. Огер // Современная радиоэлектроника: научные исследования и подготовка кадров: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 10–11 апреля 2007 г. : в 4 ч. / М-во образования РБ, МГВРК; под общ. ред. Н.А. Цырельчука. – Минск: МГВРК, 2007. – Ч. 1. – С. 120–123.

Тезисы докладов

19 Колесник, Э.М. Система управления гибким автоматизированным производством / Э.М. Колесник, В.П. Огер // Состояние и перспективы развития специального технологического оборудования: тезисы докл. отраслевой науч.-техн. конф. – Минск, 1987. – С. 31.

20 Колесник, Э.М. Имитационное моделирование управления технологическими процессами при проектировании ГПС / Э.М. Колесник, Ю.Ф. Ляшук, В.П. Огер // Состояние и перспективы развития специального технологического оборудования: тезисы докл. отраслевой науч.-техн. конф. – Минск, 1987. – С. 32.

21 Гибкая производственная система прецизионной механообработки / Г.П. Кузьмичев, Ю.Ф. Ляшук, Э.М. Колесник, А.А. Голубовский, В.П. Огер, А.М. Русецкий // Состояние и перспективы развития специального технологического оборудования: тезисы докл. отраслевой науч.-техн. конф. – Минск, 1987. – С. 33.



Библиотека БГУИР

**Фарміраванне каардынатнай сеткі дыскрэтнасці высокага
вырашэння для павышэння дакладнасці сістэм перамяшчэнняў
абсталявання мікраэлектронікі**

Ключавыя словы: каардынатная сетка дыскрэтнасці, сістэма перамяшчэнняў, абсталяванне мікраэлектронікі, лінейны крокавы прылад, дакладнасць пазіцыявання.

Мэта працы заключаецца ў распрацоўцы матэматычных мадэляў і алгарытмаў фарміравання каардынатнай сеткі дыскрэтнасці высокага вырашэння, метадыкі і алгарытмаў вызначэння набору аптымальных ўзроўняў квантавання кіруючых токаў фаз для павышэння дакладнасці сістэм перамяшчэнняў прэцызійнага абсталявання мікраэлектронікі без рэалізацыі зваротных сувязяў па палажэнню ў сістэме кіравання.

Распрацаваны матэматычныя мадэлі і алгарытмы фарміравання сеткі дыскрэтнасці высокага разрашэння для каардынатных сістэм на базе лінейных крокавых рухавікоў, пры гэтым адхіленне вузлоў фарміруемай каардынатнай сеткі дыскрэтнасці ад намінальных каардынат ляжыць у дыяпазоне 2...5 мкм.

Прапанавана метадыка вызначэння набору аптымальных узроўняў квантавання кіруючых токаў фаз лінейнага крокавага прывада, якая дазваляе мінімізаваць накопленую хібнасць і нераўнамернасць кроку сеткі дыскрэтнасці, а таксама ўлічвае тэмпературны дрыф памераў кампанентаў сістэмы перамяшчэнняў.

Распрацаваны алгарытм і праграмае забеспячэнне для вызначэння набору аптымальных узроўняў квантавання кіруючых токаў фаз лінейнага крокавага прывада, рэалізаваныя у аўтаматызаванай станцыі кантролю параметраў дакладнасці каардынатных сістэм. У выніку выкарыстання распрацаваных алгарытма і праграмага забеспячэння як фінішнай тэхналагічнай аперацыі пры вытворчасці сістэм перамяшчэнняў можна атрымаць прывады без зваротных сувязяў па палажэнню з практычнай дакладнасцю пазіцыявання $\pm 2... \pm 5$ мкм.

Распрацаваныя мадэлі, метадыкі і алгарытмы фарміравання каардынатнай сеткі дыскрэтнасці выкарыстаны ў распрацоўках ДНВА ДМ “Планар”, на прадпрыемстве “Прэцызійныя тэхналагічныя сістэмы” і ў Інстытуце фізікі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Атрыманыя вынікі могуць быць рэкамендаваны для выкарыстання ў абсталяванні любога прызначэння, у якім тэхналагічныя аперацыі пабудаваны на прэцызійных каардынатных перамяшчэннях.

РЕЗЮМЕ

Огер Виктор Павлович

Формирование координатной сетки дискретности высокого разрешения для повышения точности систем перемещений оборудования микроэлектроники

Ключевые слова: координатная сетка дискретности, система перемещений, оборудование микроэлектроники, линейный шаговый привод, точность позиционирования.

Цель работы состоит в разработке математических моделей и алгоритмов формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения, методики и алгоритмов определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз для повышения точности систем перемещений прецизионного оборудования микроэлектроники без реализации обратных связей по положению в системе управления.

Разработаны математические модели и алгоритмы формирования сетки дискретности высокого разрешения для координатных систем на базе линейных шаговых двигателей, при этом отклонение узлов формируемой координатной сетки дискретности от номинальных координат лежит в диапазоне 2...5 мкм.

Предложена методика определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз линейного шагового привода, которая позволяет минимизировать накопленную погрешность и неравномерность шага сетки дискретности, а также учитывает температурный дрейф размеров компонентов системы перемещений.

Разработаны алгоритм и программное обеспечение для определения набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз линейного шагового привода, реализованные в автоматизированной станции контроля точностных параметров координатных систем. В результате применения разработанных алгоритма и программного обеспечения как финишной технологической операции при изготовлении систем перемещений можно получить приводы без обратных связей по положению с практической точностью позиционирования $\pm 2... \pm 5$ мкм.

Разработанные модели, методики и алгоритмы формирования координатной сетки дискретности использованы в разработках ГНПО ТМ «Планар», на предприятии «Прецизионные технологические системы» и в Институте физики Национальной академии наук Беларуси. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в оборудовании любого назначения, в котором технологические операции построены на прецизионных координатных перемещениях.

RESUME

Oher Viktor

The forming of high resolution coordinate mesh of discontinuity for the increasing of accuracy of microelectronic equipment motion systems

Keywords: coordinate mesh of discontinuity, motion system, microelectronic equipment, linear stepping drive, accuracy of positioning.

The aim of thesis is consisted of developing of mathematic models and algorithms for the forming of high resolution coordinate mesh of discontinuity, methods and algorithms for the defining of set of optimal quantization levels of phase control currents that increases the positioning accuracy of precision microelectronic equipment motion systems without the realizing position feedbacks inside the control system.

Mathematical models and algorithms for the forming of high resolution coordinate mesh of discontinuity for the coordinate systems, based on linear stepping motors, were developed; at that position deviation of the node of coordinate mesh of discontinuity from nominal coordinate is laying in range $2...5 \mu\text{m}$.

Methods for the defining of set of optimal quantization levels of phase control currents of linear stepping drive were proposed, those allow to minimize the cumulative error and step irregularity of coordinate mesh of discontinuity, also the temperature broadening of motion system components dimensions takes into account.

Algorithm and software for the defining of set of optimal quantization levels of phase control currents of linear stepping drive were developed and realized in automated station for the checking of accuracy characteristics. Usage of developed algorithm and software as technological operation of motion system manufacturing allows to produce drives without feedbacks by position, which have practical accuracy of positioning $\pm 2... \pm 5 \mu\text{m}$.

Developed models, methods and algorithms of the forming of coordinate mesh of discontinuity were used in productions of "Planar Corporation", at enterprise "Precision Technological Systems" and in the Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus. The results obtained can be recommended for using in equipment of any purpose, in which technological operations are built on precision coordinate motions.

ОГЕР ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ
ДИСКРЕТНОСТИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Подписано в печать	06.07.2007.	Формат 60×84 1/16	Бумага офсетная
Гарнитура «Таймс»	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63
Уч.-изд. л. 1,4	Тираж 60 экз.		Заказ 472.

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, г. Минск, ул. П.Бровки, 6