

УДК 62–347

ПРЕЦИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С.Е. КАРПОВИЧ, В.В. ЖАРСКИЙ, И.В. ДАЙНЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 31 января 2014

Кратко изложены основные результаты, полученные по направлению «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР. Описана модульная концепция построения электромеханических преобразователей для прецизионных координатных систем перемещения. Приведена структура адаптивной системы управления, обеспечивающей возможность траекторного управления и динамического программирования параметров перемещения, скорости и ускорения приводов. Показаны математические модели анализа и синтеза структурно-топологических, кинематических и динамических характеристик реконфигурируемых многокоординатных систем перемещений, в том числе и на механизмах параллельной кинематики.

Ключевые слова: прецизионная система перемещений, электромеханический преобразователь, система управления, реконфигурируемая система перемещений, математическая модель.

Введение

Уровень технических требований, предъявляемых к оборудованию для производства изделий электронной техники, напрямую связан с темпом роста интеграции микросхем, который за последние 25 лет опередил все прогнозные показатели. Количество элементов в современных микросхемах выросло на три порядка – от десяти миллионов до десятков миллиардов. В 90-х гг. прошлого века топологический размер элемента в несколько микрон считался наивысшим техническим достижением. На сегодняшний момент размер элемента в 50 нм используется в массовом производстве микропроцессоров для бытовых компьютеров и систем мобильной связи, что привело к широкому внедрению информационных технологий во все сферы деятельности человека, радикально поменяв методы передачи информации, сделав ее доступной в реальном масштабе времени в любой точке земного шара.

Переход на меньшую топологическую норму, увеличение диаметра кремниевых пластин требует кардинальной технической модернизации и технологического переоснащения производства не только у основных производителей изделий микроэлектроники, но и у поставщиков материалов, компонентов и оборудования. Формирование качественных топологических структур при увеличении габаритных размеров кремниевых пластин 300 мм и более представляет серьезную техническую проблему.

Одним из базовых узлов технологического оборудования, определяющим возможность дальнейшего технического прогресса, являются координатные системы перемещения, которые строятся на основе линейных, планарных и поворотных систем электропривода. Диапазон востребованных типов и видов систем перемещений для прецизионного оборудования очень широк. Только по показателю точности позиционирования он находится в пределах десятков микрон для реализации вспомогательных периферийных узлов, таких, как модули загрузки, и сотых долей микрометра для систем главных перемещений, используемых в

оптико-механическом оборудовании, к которым относятся генераторы изображений, мультипликаторы, установки контроля и ремонта оригиналов топологий и др.

Разработка принципиально новых систем перемещений, предназначенных для встраивания в технологическое оборудование, определило направление научных исследований по направлению «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР. Научное направление «Прецизионные системы перемещений для оборудования производства изделий электронной техники», которое начало формироваться в БГУИР совместно с ГНПО «Планар» еще в 1977 г., получило наиболее интенсивное развитие последние 25 лет. По результатам исследований защищены 5 докторских и более 30 кандидатских диссертаций, наиболее интересные результаты исследований опубликованы в 20 монографиях и более чем в 400 научных статьях, получено более 30 патентов на изобретения и полезные модели.

Состояние и тенденции развития прецизионных систем перемещений для микроэлектроники

Из анализа структурного и функционального состава оптико-механического и сборочного оборудования производства изделий электронной техники следует, что одним из базовых узлов, определяющих максимально достижимый уровень топологической нормы интегральной микросхемы, является координатная система перемещений, при этом ее технические возможности во многом определяют направления дальнейшего технологического прогресса и конкурентоспособности оборудования, предоставляя возможность внедрения самых передовых технологий в микро- и нанoeлектронику. Анализ отдельных видов сборочного и оптико-механического оборудования производства изделий микроэлектроники показывает, что системы перемещений, как правило, строятся на линейных, поворотных и планарных шаговых двигателях, которые разрабатываются на основе блочного принципа построения интегрированных узлов перемещений из отдельных электромагнитных модулей движения [1–5, 11, 14, 16, 18, 19]. Реализация этого принципа на примере систем перемещений сборочного оборудования, выпускаемых ГНПО «Планар», показана на рис. 1.

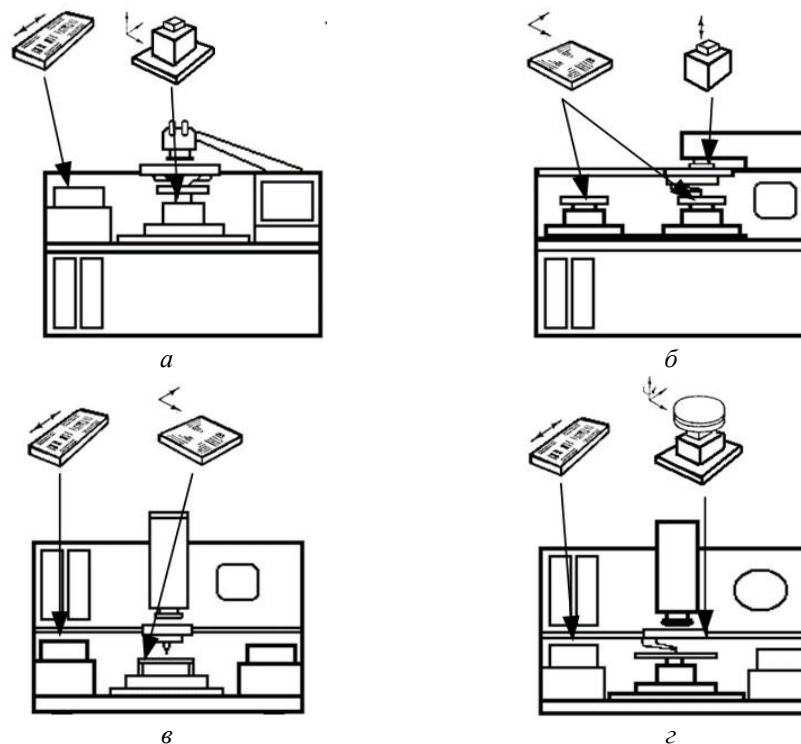


Рис. 1. Блочное построение оборудования электронного машиностроения:
а – зондовый контроль; *б* – разделение полупроводниковых пластин;
в – монтаж кристаллов; *г* – разварка проволочных выводов

Такой же подход к конфигурированию систем перемещений характерен и для оптико-механического оборудования [1–3, 5, 11, 15, 16, 18].

Как следует из таблицы, составленной на основании анализа научно-технических публикаций, рекламных материалов и анонсов перспективных направлений и разработок ведущих фирм, производящих технологическое оборудование для микро- и нанoeлектроники, тенденция развития такова, что координатные системы, используемые в сборочном оборудовании, уже к 2015 г. должны будут обеспечивать точность перемещений не менее 1 мкм при дискретности 0,1 мкм, динамику перемещений с ускорением до 20 м/с², а столы оптико-механического оборудования должны будут иметь значительно более высокие характеристики: динамическая погрешность обработки траектории, определяющая точность, не ниже 50 нм, а предельное разрешение – до 5 нм.

Тенденции развития спецтехнологического оборудования

Характеристики назначения	Сборочное оборудование		Фотолитографическое оборудование	
	2010 г.	2015 г.	2010 г.	2015 г.
Разрешение	100 нм	50 нм	1,5 нм	0,5 нм
Ускорение	10 м/с ²	20 м/с ²	20 м/с ²	25 м/с ²
Повторяемость	1 мкм	0,5 мкм	5 нм	3 нм
Точность	3 мкм	1 мкм	10 нм	5 нм

Для достижения перспективных характеристик, указанных в таблице, необходимо создавать оборудование нового поколения, для которого потребуются принципиально новые решения, особенно при разработке прецизионных координатных систем.

Электромеханический преобразователь для исполнительного электропривода нового типа

Под научным руководством С.Е. Карповича по направлению «Мехатроника и микросистемы» предложена и научно обоснована модульная концепция построения электромеханических преобразователей для прецизионных координатных систем перемещения, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитных полей дискретных электромагнитных фазных модулей и периодического стационарного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, сконфигурированными в виде пространственной линейной или круговой чередующейся магнитной последовательности. В отличие от индукторных линейных двигателей, где статорная часть пассивна, предложен вариант активной статорной части, построенной на основе редкоземельных магнитов FeNdB. Благодаря такому конструктивному решению появилась физическая возможность существенно увеличить магнитную индукцию в рабочем зазоре электромеханического преобразователя до 1,2 Т. При этом значительно расширились возможности систем перемещений по динамическим показателям, обеспечивая увеличение технологических скорости и ускорения в 2...3 раза по сравнению с традиционными для микроэлектроники приводами. При этом повышение статического и динамического усилия достигается более чем в 5 раз [4, 9, 12, 16, 18].

Проведен анализ принципиальных схем построения электромагнитных преобразователей синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов на статоре, сконфигурированных в виде магнитной дороги. Для каждой принципиальной схемы описано реализуемое перемещение полным шагом, при этом установлено, что реализуемый полный шаг перемещения равномерный, а координаты точек позиционирования кратны четверти периода функции изменения магнитодвижущей силы (МДС). Также рассмотрены принципы микрошагового управления с дроблением магнитного периода до 4096 элементарных перемещений.

Рассмотрены и проанализированы различные схемы циркуляции магнитных потоков МДС в фазных электромагнитных модулях. Установлено, что сопротивление магнитному потоку постоянной МДС, проходящей через электромагнитный фазный модуль, носит переменный характер и при движении приводит к модуляции величины магнитного потока [3–5, 9, 12, 17].

На основании проведенного анализа предложены четыре типа конструктивного исполнения линейных электроприводов прямого действия для координатных систем технологического оборудования (рис. 2).

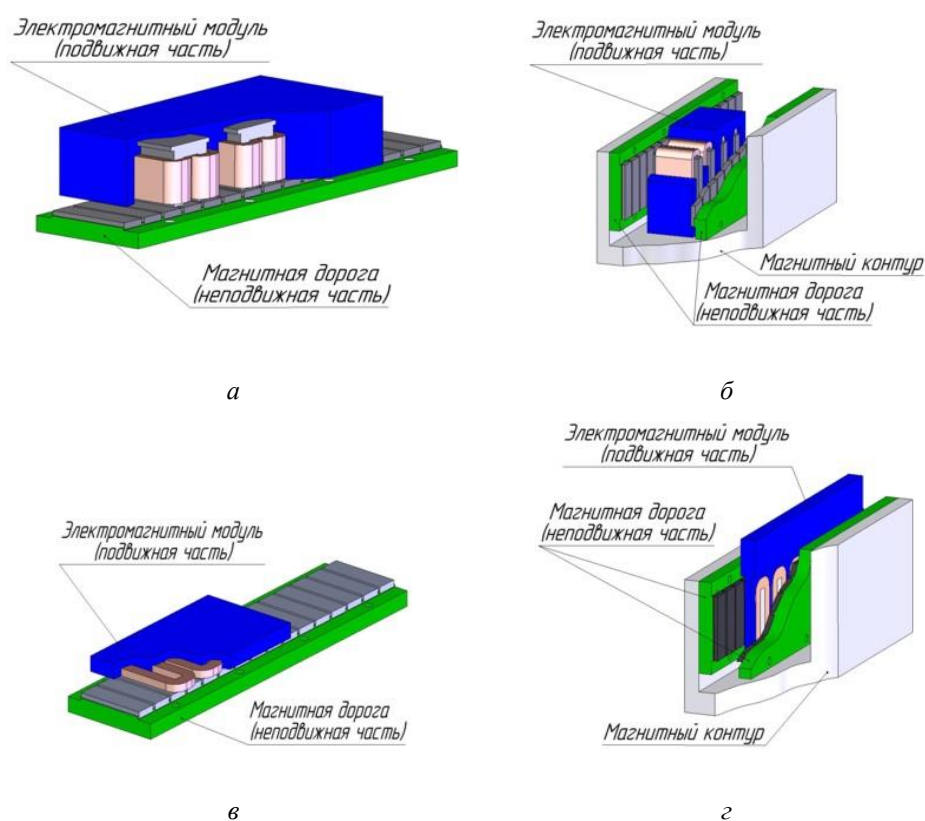


Рис. 2. Типы линейных синхронных двигателей:
а – пазовый; *б* – симметричный стержневой; *в* – беспазовый; *г* – безжелезный

Это пазовая, симметричная стержневая, беспазовая и безжелезная конструкции, которые внедрены в производство и на основе которых налажен серийный выпуск комплектных приводов и прецизионных координатных систем на их основе. По результатам компьютерного моделирования распределения магнитного поля в рабочем зазоре для каждого из четырех приведенных на рис. 2 типов двигателей получены сравнительные характеристики. Учитывая, что для координатных систем технологического оборудования микро- и нанoeлектроники приоритетной является субмикронная точность в доли микрометра при сохранении высокой динамики перемещений, оптимальным из четырех представленных вариантов будет привод прямого действия модульного типа на исполнительном безжелезном синхронном двигателе [4, 5, 9].

Предложен метод компенсации, основанный на расчете угла взаимного разворота электромагнитных модулей и полюсов магнитной дороги. Проанализирована возможность построения различных многофункциональных координатных систем на основе конструктивного объединения в одном исполнительном механизме нескольких типов электроприводов прямого действия, включая как линейное и планарное, так и поворотное исполнения электроприводов без использования дополнительных механических трансмиссий [8, 13–16, 19, 20].

Для расчета выходных характеристик и моделирования электромеханических преобразователей и систем приводов прямого действия на их основе разработана линеаризованная модель однофазного электромагнитного модуля, основанная на математическом описании электромагнитного преобразования энергии в рабочем зазоре с учетом его полюсной геометрии, получены аналитические зависимости магнитостатического взаимодействия постоянных магнитов и переменных электромагнитных потоков фазных

обмоток управления. В результате анализа пространственного гармонического состава развиваемых при этом взаимодействия магнитных сил получено аналитическое выражение для тягового усилия фазного модуля в виде [8, 13–15]

$$P_A = \frac{2F_{0A}^2}{(1 + \lambda_0 R_{MA})^2} \cdot \frac{\pi \lambda_0}{\tau_z} \left(\frac{\lambda_M}{\lambda_0} \sin 2x_0 + \frac{2\lambda_M^{IV}}{\lambda_0} \sin 4x_0 \right),$$

где P_A – магнитостатическое тяговое усилие фазы A ; F_{0A} – магнитодвижущая сила фазы A ; λ_0 – постоянная магнитной проводимости; R_{MA} – магнитное сопротивление первой гармоники; τ_z – период зубцовой структуры; λ_M – магнитная проводимость по первой гармонике; x_0 – позиционная координата; λ_M^{IV} – магнитная проводимость по четвертой гармонике.

Для учета нелинейности магнитного баланса в электромагнитном модуле предложен алгоритм решения общего скалярного квазигармонического уравнения, получаемого из системы векторных уравнений Максвелла, основанных на векторном магнитном потенциале [8, 13–15, 23, 24]. Алгоритм решения основан на методе конечных элементов, разработанном для двумерных треугольных симплекс-элементов, к которым была сведена задача моделирования магнитной проводимости в рабочем зазоре. Для модульных электромеханических преобразователей выполнено численное моделирование по скалярному квазигармоническому уравнению

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

со следующими граничными условиями:

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

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.

Система цифрового программного управления

Предложены различные структуры управления координатными системами, использующими разработанные линейные синхронные двигатели.

Разработанная обобщенная структура системы управления представляет собой аппаратно-программный комплекс, включающий аппаратную часть в виде контроллера, сконфигурированного под конкретный тип электродвигателя, и программного обеспечения верхнего уровня, обеспечивающего информационную связь между контроллером и пользователем, а также поддерживающего штатный автоматический режим работы устройства с регулированием движения по скорости, ускорению и положению в зависимости от технологической операции [4, 5, 18].

В соответствии с предложенной структурой управления многофункциональными прецизионными координатными системами разработан программно-аппаратный комплекс LSMC-х на базе современного процессора семейства DSP MS320VC33, позволяющий одновременно управлять шестью позиционными осями с электроприводами в серворежиме (подчиненное регулирование по положению или его первой и второй производной, а также регулирование по усилию или моменту). В зависимости от конфигурации и функционального назначения координатных систем контроллер может комплектоваться одним или двумя сервоконтроллерами UC48NQ; контроллерами ввода-вывода SPS/IO-8(16); линейкой

усилителей мощности (в двухфазном исполнении PU2 (200 Вт) и PU3 (500 Вт), в трехфазном исполнении PU10 (1 кВт) и PU20 (5 кВт)).

При работе с контроллером LSMC-х имеется возможность траекторного управления и динамического программирования параметров перемещения, скорости и ускорения приводов. Контроллер обладает блоком внутренней памяти, в который при необходимости записываются заданные пользователем параметры движения. Впоследствии сохраненные данные могут быть переданы на управляющий персональный компьютер для дальнейшей обработки и анализа. Пересылка команд от компьютера к контроллеру, а также получение информации от контроллера осуществляется через последовательный интерфейс RS-232, USB или Ethercat. Контроллер LSMC-х совместим с программной оболочкой DSP-Host и инструментарием MATLAB Real-Time Workshop, что позволило реализовать методику аппаратно-программного моделирования и верификации математической модели линейного шагового двигателя [9, 18].

В основу разработанных моделей было заложено детальное описание физических процессов, протекающих в линейном шаговом двигателе (ЛШД). При этом были учтены основные нелинейности преобразования энергии, включая насыщение магнитной цепи и гистерезис. Математическая модель ЛШД состоит из трех подсистем: электрической, магнитной и механической. В результате их объединения в одну систему была получена математическая модель ЛШД в пространстве состояний в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка относительно обобщенной координаты перемещения. Компьютерная модель ЛШД, построенная в среде MATLAB/Simulink на базе математической модели, является блочно-модульной и состоит из следующих вычислительных блоков: блок генерации магнитных потоков Φ_i ; блок расчета магнитных сопротивлений R_i ; блок расчета тягового усилия по координатам; блок вычисления параметров регулятора.

Для проверки адекватности компьютерной модели реальному объекту была проведена верификация модели с использованием инструментария MATLAB System Identification Toolbox. Для осуществления верификации были построены передаточные функции, основанные на результатах компьютерного моделирования и экспериментальных исследований электродвигателя прямого действия как объекта управления.

Теоретическая передаточная функция была получена средствами MATLAB по результатам моделирования переходных процессов движения при различных начальных условиях.

Для получения экспериментальной передаточной функции были использованы задаваемые сигналы управляющих токов фаз и снимаемые сигналы с датчиков обратной связи, которые в виде числовых массивов, полученных с контроллера системы управления при различных ступенчатых и гармонических управляющих воздействиях. Анализ производился с помощью программы, разработанной на основе инструментария MATLAB System Identification Toolbox, в результате была обоснована аналитическая структура передаточной функции ЛШД в следующем виде:

$$G(s) = \frac{K_1(t)s + K_2(t)}{s^2(t) + K_3(t)s + K_4(t)},$$

где $K_1(t), \dots, K_4(t)$ – коэффициенты передаточной функции, полученные по результатам верификации; s – комплексный аргумент передаточной функции.

Использование подходов аппаратно-программного моделирования и верификации позволили реализовать адаптивный ПИД-регулятор, в котором параметры пропорционального, интегрального, дифференциального и упреждающего каналов корректируются в режиме реального времени как функциональные исходя из уточненной экспериментальной передаточной функции, получаемой в результате верификации. Для этого в режиме реального времени производился сбор информации, поступающей с датчиков обратной связи и цифроаналоговых преобразователей (ЦАП), после чего с использованием методов ARX и PEM, реализованных в MATLAB, были построены передаточные функции по каждой из ортогональных координат, на основании которых определены параметры ПИД-регуляторов.

Таким образом, на основе предложенной структуры системы управления с адаптивным ПИД-регулятором (рис. 3) передаточная функция системы управления одной координатой окончательно принимает вид:

$$G_{cy}(s) = \frac{\left(K_{np} + \frac{K_{и}}{s} + K_{д}s \right) \left(G_{ум}(s)G_{лшд}(s) \right) + G_{ф\phi}(s)G_{ум}(s)G_{лшд}(s)}{1 + \left(K_{np} + \frac{K_{и}}{s} + K_{д}s \right) G_{ум}(s)G_{лшд}(s)G_{д}(s)}, \quad (1)$$

где K_{np} , $K_{и}$, $K_{д}$, $G_{ф\phi}(s)$ – параметры пропорционального, интегрального, дифференциального и упреждающего каналов ПИД-регулятора соответственно; $G_{ум}(s)$, $G_{лшд}(s)$, $G_{д}(s)$ – передаточные функции усилителя мощности, ЛШД и датчика Холла соответственно.

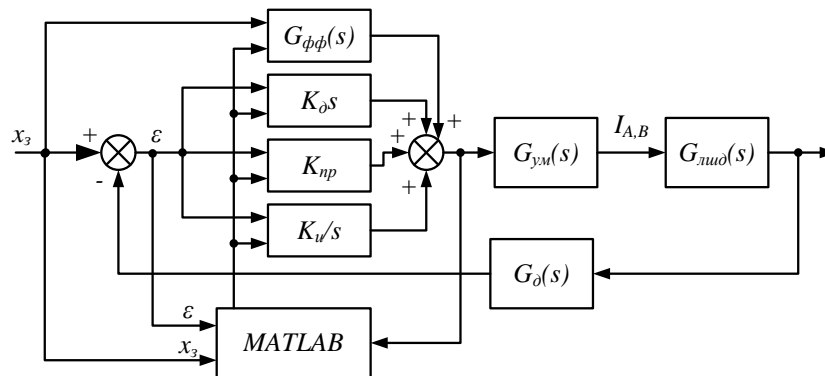


Рис. 3. Структура системы управления с адаптивным ПИД-регулятором

На основе полученной передаточной функции (1) была разработана программа определения оптимальных параметров ПИД-регулятора, которая позволила увеличить быстродействие системы в 1,3...1,7 раз по сравнению с аналогичными системами без адаптивного управления [4, 9, 18].

Математические модели анализа и синтеза структурно-топологических, кинематических и динамических характеристик систем перемещений

Для достижения высоких характеристик назначения современного автоматизированного оборудования микро- и нанoeлектроники необходимо проводить углубленное математическое и компьютерное моделирование систем многокоординатных перемещений с любым требуемым количеством степеней свободы, с оптимальным конфигурированием и компоновкой отдельных конструктивно и функционально независимых исполнительных приводов, входящих в конкретное технологическое оборудование и функционирующих совместно с другими элементами и устройствами. Для математического описания координатных систем разработаны математические модели, основанные на том, что множество винтов возможных координатных перемещений образует линейное вещественное пространство $\{\delta S\}$, размерность r которого равна числу степеней свободы в относительном движении звеньев. Из плюккеровых координат базисных винтов пространства $\{\delta S\}$ формируется матрица подвижностей $[\delta S] = (\delta S_{vi}^0)$, где индекс v означает номер плюккеровой координаты $v = 1, 2, \dots, 6$, индекс i – номер базисного винта, $i = 1, 2, \dots, r$. В окрестности данной точки пространства конфигураций возможное перемещение раскладывается по базису

$$\delta S = \sum_{i=1}^r q_i \delta S_i^0,$$

где q_i – i -я обобщенная координата.

Из плюккеровых координат базисных винтов пространства $\{S\}$ формируется матрица скоростей пары $[\dot{S}] = (\dot{S}_{vi}^0)$; $i = 1, 2, \dots, r$.

Это разложение можно записать в виде $\delta S = \sum_{i=1}^r \delta q_i S_i^0$ или в форме скоростей:

$$\dot{S} = \sum_{i=1}^r \dot{q}_i \dot{S}_i^0,$$

где δq_i – вариация i -й обобщенной координаты; \dot{q}_i – i -я обобщенная скорость.

В работах [8, 13, 14, 19, 21] показано, что множество винтов возможных реакций связей образует линейное вещественное пространство $\{Q\}$. Аналогично предыдущему из плюккеровых координат базисных винтов пространства возможных реакций связей $\{Q\}$ формируется матрица реакций $[Q] = (Q_j^0)$, $j = 1-k$. Возможная реакция связей раскладывается по базису

$$Q = \sum_{j=1}^k \alpha_j Q_j^0,$$

где α_j – j -я обобщенная сила реакции в паре.

Из матриц скоростей и реакций пары формируется обобщенная матрица кинематической цепи многокоординатной системы

$$T = [\dot{S} \mid Q]. \quad (2)$$

Матрица (2) позволяет выразить обобщенную структуру многокоординатной системы через его кинематические и динамические свойства в любой наперед заданной системе координат.

На основе построенной аналитической концепции координатной системы строится аналитическая теория структуры сложных многоуровневых координатных систем. Так, для простой координатной системы из звеньев $0, 1, 2, \dots, n$, в которой звено 0 будем считать неподвижным, если $\delta S_{\rho, \rho+1}$ – перемещение в соединении, образованном звеньями ρ и $(\rho+1)$, то перемещение конечного звена n будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \delta S_{0,n} &= \sum_{\rho=0}^{n-1} \sum_{i_{\rho, \rho+1}=1}^{r_{\rho, \rho+1}} q_{i_{\rho, \rho+1}} \delta S_{i_{\rho, \rho+1}}^0; \\ \delta S_{0,n} &= \sum_{\rho=0}^{n-1} \sum_{i_{\rho, \rho+1}=1}^{r_{\rho, \rho+1}} \delta q_{i_{\rho, \rho+1}} \dot{S}_{i_{\rho, \rho+1}}^0; \\ \dot{S}_{0,n} &= \sum_{\rho=0}^{n-1} \sum_{i_{\rho, \rho+1}=1}^{r_{\rho, \rho+1}} \dot{q}_{i_{\rho, \rho+1}} \dot{S}_{i_{\rho, \rho+1}}^0. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения (3) показывают, что множество винтов $\delta S_{0,n}$ пробегает пространство

$$\{\delta S_{0,n}\} = \{\delta S_{0,1}\} + \{\delta S_{1,2}\} + \dots + \{\delta S_{n-1,n}\},$$

а множество винтов $\dot{S}_{0,n}$ – изоморфное ему пространство

$$\{\dot{S}_{0,n}\} = \{\dot{S}_{0,1}\} + \{\dot{S}_{1,2}\} + \dots + \{\dot{S}_{n-1,n}\},$$

где $\{\delta S_{\rho, \rho+1}\}$ и $\{\dot{S}_{\rho, \rho+1}\}$ – соответственно пространства подвижностей и скоростей соединения, образованного звеньями ρ и $(\rho+1)$. Размерность R пространства $\{\delta S_{0,n}\}$ и $(\{\dot{S}_{0,n}\})$ назовем рангом координатной системы. Легко видеть, что число степеней свободы конечного звена координатной системы n равно рангу R .

Из (3) легко доказывается структурная формула

$$W = \sum_{\rho=0}^{n-1} r_{\rho, \rho+1} - R$$

расчета числа мгновенных степеней свободы координатной системы.

Структурно-топологический анализ, основанный на представленной выше формализации, позволил получить широкий класс структур реконфигурируемых многокоординатных систем, в том числе и на механизмах параллельной кинематики [12, 13, 18, 22].

Возможные силовые реакции связей, передаваемые от неподвижного звена 0 к конечному звену n , лежат в пространстве $\{Q_{0,n}\} = \bigcap_{\rho=0}^{n-1} \{Q_{\rho, \rho+1}\}$, где $\{Q_{\rho, \rho+1}\}$ – пространство реакций связей, образованных звеньями ρ и $(\rho+1)$.

Пространство $\{Q_{0,0}\}$ назовем пространством избыточных связей координатной системы. Так как первая полуцепь накладывает на звено ρ связи, определяемые пространством $\{Q_{0,\rho}\} = \bigcap_{\varepsilon=0}^{\rho-1} \{Q_{\varepsilon, \varepsilon+1}\}$, а вторая полуцепь накладывает на звено $(\rho+1)$ связи, определяемые пространством $\{Q_{0,\rho+1}\} = \bigcap_{\varepsilon=\rho+1}^{n-1} \{Q_{\varepsilon, \varepsilon+1}\}$, то кинематическое соединение координатной системы, образованное звеньями ρ и $(\rho+1)$, повторит связи, лежащие в пространстве

$$\{Q_{0,\rho}\} \cap \{Q_{\rho, \rho+1}\} \cap \{Q_{0, \rho+1}\} = \bigcap_{\varepsilon=0}^{n-1} \{Q_{\varepsilon, \varepsilon+1}\}.$$

Легко видеть, что размерность пространства $\{Q_{0,0}\}$ равна числу избыточных связей контура. Так как ранг R системы (3) определяет число кинематических связей координатной системы, то структурная формула примет вид $W = \sum_{\tau=1}^5 r_{\tau} f_{\tau} - R$, где W – число степеней свободы

цепи; f_{τ} – число пар цепи подвижности r . В случае формирования структурной формулы по силовым условиям связи получим следующую зависимость: $W = 6l - R_D$, где W – число степеней свободы цепи, R_D – ранг системы силового расчета.

Кинематический анализ координатных систем. В рамках предложенного выше формализованного подхода ко всем этапам расчета пространственных координатных систем, кинематический анализ, как этап проектирования, выполняется после получения результатов на этапе структурного анализа. При этом уравнения (3) помимо того, что позволяют анализировать структурные свойства, являются основными уравнениями расчета кинематики простых одноконтурных пространственных координатных систем [13–15, 19, 20, 22].

Для сложных многоконтурных координатных систем уравнения кинематики получим в следующем виде:

$$\sum_{\rho_{\mu}=1}^{n_{\mu+1}} \sum_{i_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}=1}^{r_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}} \delta q_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}} S_{i_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}}^0 = [0];$$

$$\sum_{\rho_{\mu}=1}^{n_{\mu+1}} \sum_{i_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}=1}^{r_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}} q_{i_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}} \dot{S}_{i_{\rho_{\mu}, \rho_{\mu+1}}} = [0].$$
(4)

Вышеприведенные уравнения (4), при использовании их для кинематического анализа, представляют собой уравнения замкнутости посредством механических связей, или через рабочую операцию.

Динамический анализ координатных систем. В рамках единого подхода в настоящей работе динамический анализ как этап проектирования выполняется после получения

результатов структурного и кинематического анализа. Основными уравнениями являются уравнения равновесия звеньев, записанные в винтовой форме:

$$Q_{\rho-1,\rho} - Q_{\rho,\rho+1} = -(\Gamma_\rho + \phi_\rho), \quad (\rho = \overline{0, n}),$$

или с учетом разложения по базису:

$$\sum_{j_{\rho-1,\rho}=1}^{k_{\rho-1,\rho}} \alpha_{j_{\rho-1,\rho}} Q_{j_{\rho-1,\rho}}^0 - \sum_{j_{\rho,\rho+1}=1}^{k_{\rho,\rho+1}} \alpha_{j_{\rho,\rho+1}} Q_{j_{\rho,\rho+1}}^0 = -(\Gamma_\rho + \phi_\rho), \quad (\rho = \overline{0, n}).$$

Уравнения движения исполнительных механизмов координатных систем. Предложен формализованный, ориентированный на использование ЭВМ подход к построению уравнений движения, основанный на предложенном едином подходе к структуре, кинематике и динамике механизмов. При этом уравнение движения исполнительного механизма в матричной форме окончательно принимает вид:

$$A \ddot{q} = B + B^* + H^T \Lambda,$$

где $\Lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_{vz}]$ – матрица неопределенных множителей Лагранжа; A – матрица размерностью $n \times n$ коэффициентов в уравнении движения; B – матрица-столбец из обобщенных сил размером $n \times 1$; B^* – матрица-столбец размером $n \times 1$ из обобщенных сил в «разрезанных» шарнирах.

В работах [15, 19] показано что, если все уравнения связей независимы, то матрица H имеет полный ранг, равный количеству ее строк vz , а матрица $HA^{-1}H^T$ имеет тот же ранг, и в этом случае матрица неопределенных множителей Λ определится из матричного выражения

$$\Lambda = -(HA^{-1}H^T)^{-1} (HA^{-1}(B + B^*) + \Phi).$$

Подставляя найденную матрицу Λ в уравнения движения, окончательно получим

$$\ddot{q} = A^{-1} (B + B^* - H^T (HA^{-1}H^T)^{-1} (HA^{-1}(B + B^*) + \Phi)).$$

Это и есть окончательная общая матричная форма записи уравнений движения любого исполнительного механизма. Численное интегрирование начинается от начальных условий $t_0, \bar{q}_0, \dot{\bar{q}}_0$. Применение представленного метода формирования уравнений движения приведено в работах [8, 14, 15, 19].

Построение программируемых движений координатных систем и механизмов. Разработано аналитическое формирование алгоритмов и характеристик управлений координатными приводами на основе решения обратных задач динамики. Сделано это с помощью математических моделей, получаемых, например, по методам Лагранжа, Ньютона и др., и описывающих многокоординатные системы и механизмы. Эти уравнения линейны относительно управлений и в обобщенном представлении имеют следующий вид:

$$\dot{x}_i = p_i(x_1, \dots, x_n) + U_i b_i(x_1, \dots, x_n); \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор обобщенных координат; $\mathbf{U} = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ – вектор управления.

Предложены алгоритмы нахождения таких функций управления $\mathbf{U} = \mathbf{U}(t, \mathbf{x})$, чтобы соответствующие им решения $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ удовлетворяли заданной программе $\omega_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$; $k = 1, 2, \dots, r$; $r \leq n$. В результате получаемое решение $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ будет одновременно удовлетворять программе движения и исходной дифференциальной системе (5), если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^k \frac{\delta \omega_k}{\delta x_i} (P_i + b_i U_i) = R_k(\omega_k, \mathbf{x}, t), \quad (6)$$

где $R_k(\omega_k, \mathbf{x}, t)$ – произвольная функция такая, что $R_k(0, \mathbf{x}, t) = 0$.

В результате решения уравнения (6) получим управления, которые представляют собой аналитические функции, выраженные через кинематические параметры программы движения. Описанный подход к построению программируемых движений получил развитие в работах [5, 8, 17, 18] и был реализован в системах управления многокоординатными системами перемещений, созданных при участии НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» на предприятиях ГНПО «Планар», «Рухсервомотор», «Лотис-ТИИ».

Заключение

Предложенный новый электромеханический преобразователь модульного типа позволяет конструктивно конфигурировать исполнительные двигатели координатных систем линейного и поворотного типа с максимальной гибкостью в зависимости от требований встраивания их в технологическое оборудование, может быть использован в качестве базового при разработке модульных приводов прямого действия с различными характеристиками и назначением. Блочно-модульное построение исполнительных электромеханических преобразователей аналитически обосновано через расчетную модель суммарного тягового усилия, учитывающую оптимальные геометрические и обобщенные электромеханические параметры. Это позволяет осуществлять формирование типорядов как самих синхронных двигателей привода прямого действия, так и проводить паспортизацию их характеристик для нового разрабатываемого оборудования. При этом весь необходимый типоряд реализуется методом простого мультиплицирования на базе одного оптимального модульного сегмента поворотного или линейного типов различного конструктивного исполнения в зависимости от назначения и предъявляемых требований.

Для проведения проектных расчетов исполнительных серводвигателей и координатных приводов на их основе предложены аналитические зависимости для расчета электрических, магнитных и механических характеристик двухфазного и трехфазного элементарных синхронных двигателей с учетом результатов компьютерного моделирования по предложенной модифицированной линеаризованной модели, учитывающей нелинейный характер магнитного баланса в обмотках управления. Предложены алгоритмы компенсации четвертой и шестой гармоник в функциях тягового усилия соответственно двухфазного и трехфазного двигателей, а также алгоритмы программной коррекции погрешности при контурном перемещении, реализуемые в реальном масштабе времени.

Предложенные математические модели, реализованные в системе управления, состоят из дифференциальных уравнений, описывающих законы электрического, магнитного и механического равновесия в пространстве состояний шести переменных, которые позволяют проводить компьютерное моделирование динамики координатного привода при различных алгоритмах регулирования и различных начальных условиях с целью верификации и оптимального выбора параметров реализованного в системе управления адаптивного ПИД-регулятора, а также для проведения аппаратно-программного моделирования в среде MATLAB с помощью инструментариев xPC Target и Real-time Windows Target. Разработанные структуры, конструктивные исполнения и алгоритмы обработки в замкнутой системе управления для прецизионных координатных систем на основе датчиков Холла используются в системах перемещений сборочного оборудования микроэлектроники благодаря достигнутой точности в пределах ± 3 мкм. Для координатных систем с требованием сверхмалых перемещений, включающих нанометровый диапазон, рекомендуется использовать новые средства интерферометрии на оптических датчиках отражательного типа с интерферометрическим принципом сканирования. Такие системы позволяют получить системное разрешение до 0,44 нм.

На основе предложенной концепции и результатов компьютерного моделирования разработаны четыре типа оптимизированных электромеханических преобразователей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов: пазовый, симметричный стержневой, беспазовый и безжелезный. Разработанные электродвигатели внедрены в производство и на их основе налажен выпуск комплектных модульных приводов прямого действия и координатных систем. Новые технические решения исполнительных электромеханических модулей и систем

измерения для серводвигателей на их основе, а также различные механизмы шагового перемещения, защищенные патентами Республики Беларусь, США и Германии, являются базовыми узлами многокоординатных систем, встраиваемых в новое поколение технологического оборудования. Новые научно обоснованные методы, модели и алгоритмы, разработанные по направлению «Мехатроника и микросистемы» в БГУИР, позволили впервые в СНГ освоить в промышленном производстве широкую гамму координатных систем, обладающих оптимальным сочетанием субмикронной точности и высокой динамики.

PRECISION MOTION SYSTEMS FOR EQUIPMENT OF ELECTRONIC TECHNICS MANUFACTURING

S.E. KARPOVICH, V.V. JARSKI, I.V. DAINIAK

Abstract

The basic scientific results of scientific research in the field of «Mechatronics and Microsystems» were briefly presented. The module concept of building of electromechanical converters for precision coordinate motion systems was described. The structure of adaptive control system was presented; it provides the possibility of trajectory control and dynamic programming of motion parameters, velocity and acceleration of drives. Mathematical models of analysis and synthesis of structural and topological, kinematic and dynamic characteristics of reconfigurable multicoordinate motion systems were shown; they may be also based on the parallel kinematic mechanisms.

Список литературы

1. *Аваков С.М.* Автоматический контроль топологии планарных структур / Под. ред. С.Е. Карповича. Минск, 2007.
2. *Достанко А.П., Кундас С.П., Карпович С.Е. и др.* Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. – Т.3. – Минск, 2001.
3. *Достанко А.П., Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В.* Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники. Минск, 2011.
4. *Жарский В.В., Карпович С.Е., Дайняк И.В.* Привод прямого действия для мотор-колес мобильных систем. – Минск, 2009.
5. *Жарский В.В., Карпович С.Е., Дайняк И.В.* Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования. Минск, 2013.
6. *Жевняк Р.М., Карпович С.Е., Карпук А.А., Сорко С.* Численные методы решения задач на ПЭВМ. Часть 1. Минск, 2004.
7. *Жевняк Р.М., Карпович С.Е., Карпук А.А., Сорко С.* Численные методы решения задач на ПЭВМ. Часть 2. Минск, 2005.
8. *Карпович С.Е., Яковлюк А., Чех М.* Аналитическая механика и мехатронные системы перемещений. Минск, 2004.
9. *Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В.* Имитационное моделирование голономных и мобильных автоматических систем. Минск, 2008.
10. *Карпович С.Е., Яковлюк А.И.* История механики. «Галерея» ученых мира. Минск, 2001.
11. *Карпович С.Е., Достанко А.П., Толочко Н.К.* Лазерные технологии формирования и модификации твердотельных структур. Минск, 2002.
12. *Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В., Литвинов Е.А.* Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink. Минск, 2013.
13. *Карпович С.Е., Чех М., Левковский Е.Н. и др.* Основы механики машин и роботов. Минск, 2002.
14. *Карпович С.Е., Русецкий А.М., Ляшук Ю.Ф., Матюшков В.Е.* Оптимизационное проектирование прецизионных координатных систем и механизмов оборудования производства электронной техники. Минск, 1999.
15. *Карпович С.Е., Матюшков В.Е., Аваков С.М.* Построение математических моделей автоматизированного проектирования прецизионного оптико-механического оборудования для электронного машиностроения. Минск, 2000.
16. *Карпович С.Е., Жарский В.В., Ляшук Ю.Ф., Межинский Ю.С.* Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия. Минск, 2001.

17. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Программируемые движения в прецизионных системах перемещений. Минск, 2008.
18. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Системы перемещений на основе привода прямого действия. Минск, 2008.
19. Карпович С.Е., Русецкий А.М., Ляшук Ю.Ф. Теория построения прецизионных механизмов оборудования производства электронной техники. Минск, 1999.
20. Karpovich S.E., Jakowluk A. Algorythmization of mathematical models for non-holonomic constraints system and non-linear mechanics in the biaxial stress states of solid bodies. Bialystok, 1998.
21. Karpowicz S., Jakowluk A., Lewkowski J. Mechanika teoretyczna i podstawy teorii mechanizmow i robotow / pod red. A. Jakowluka. T. I : Historia mechaniki i kinematyka. Bialystok, 1993.
22. Karpowicz S., Jakowluk A., Lewkowski J. Mechanika teoretyczna i podstawy teorii mechanizmow i robotow / pod red. A. Jakowluka. T. II : Dynamika. Bialystok, 1993.
23. Karpowicz S., Jakowluk A., Lewkowski J. Mechanika teoretyczna i podstawy teorii mechanizmow i robotow / pod red. A. Jakowluka. T. III : Mechanika analityczna. Dynamika maszyn i robotow. Bialystok, 1993.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Карпович Святослав Евгеньевич (1949 г.р.), д.т.н., профессор. В 1971 г. окончил с отличием БПИ. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию в ЛИТМО, в 1997 г. – докторскую диссертацию в МИЭТ. С 1997 г. – профессор кафедры высшей математики БГУИР. В 2000 г. удостоен Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники. Под его руководством защищены 5 докторских и 16 кандидатских диссертаций. Является автором и соавтором 18 монографий и более 400 научных статей, 20 изобретений. Область научных интересов – математическое моделирование мехатронных технических систем для прецизионного оборудования производства изделий электронной техники.



Жарский Владимир Владимирович (1959 г.р.), д.т.н. В 1981 г. окончил с отличием МРТИ. В 2001 г. защитил кандидатскую, в 2011 г. – докторскую диссертацию. В настоящее время – директор СП «Рухсервомотор». Является автором более 80 научных работ, в том числе 8 монографий и 12 патентов Республики Беларусь, США и ФРГ. Область научных интересов – прецизионные координатные системы на основе привода прямого действия.



Дайняк Игорь Викторович (1975 г.р.), к.т.н., доцент. В 1998 г. окончил с отличием БГУИР. В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию. С 2008 г. является доцентом кафедры высшей математики БГУИР. Автор и соавтор 8 монографий, 6 учебных пособий, более 100 научных статей, 4 патентов. Область научных интересов – программируемые движения в прецизионных координатных системах оборудования микроэлектроники.