

6. **Kapsky, D. V.** (2008) *Prediction of Road Traffic Accidents*. Minsk, BNTU. 243 p. (in Russian).

7. **Kapsky, D. V.** (2015) *Method of Conflict Zones for Prediction of Road Traffic Accidents on the Basis of Potential Danger*. Moscow, Novoye Znanie. 372 p. (in Russian).

8. **Vrubel, Yu. A., & Kapsky, D. V.** (2013) *Dangers in Road Traffic*. Moscow, Novoye Znanie. 244 p. (in Russian).

9. **PC-Crash**. *The Expert's Choice. Collision & Trajectory Physics Simulation*. Available at: <http://www.pc-crash.com>. (Accessed: 15 April 2015).

10. **Autotechnical Expertise**. Available at: http://avtotra.solog.ru/component/option,com_frontpage/Itemid,1. (Accessed: 15 April 2015).

11. **Cliff, W. E., & Moser, A.** (2001) Reconstruction of Twenty Staged Collisions with PC-Crash's Optimizer. *SAE Technical Paper 2001-01-0507*. Doi: 10.4271/2001-01-0507.

Поступила 30.06.2014

УДК 62-83

ПРЕЦИЗИОННАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

*Канд. техн. наук, доц. ДАЙНЯК И. В., докт. техн. наук, проф. КАРПОВИЧ С. Е.,
аспиранты КЕКИШ Н. И., ГОЛДЫН Л.*

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: dainiak@bsuir.by

Предложена структура прецизионной системы перемещений на базе кольцевого многокоординатного сегментно-синхронного двигателя и реконфигурируемого механизма параллельной кинематики. Многокоординатный синхронный двигатель в зависимости от конструктивного исполнения может иметь от двух до шести подвижных сегментов, число которых в целом определяет внутреннюю подвижность двигателя. Особенность механизма параллельной кинематики состоит в возможности его реконфигурирования за счет последовательного соединения двух соседних шатунов свободными элементами их сферических шарниров в треугольные контуры с одним сферическим шарниром в общей вершине. В результате управляемое движение подвижных сегментов двигателя трансформируется в сложное пространственное движение кольцевой платформы механизма с числом степеней свободы до шести включительно.

Предложена математическая модель решения задачи кинематики для рассматриваемого параллельного механизма, позволяющая вычислять положения подвижных сегментов синхронного многокоординатного двигателя в зависимости от заданного положения и ориентации исполнительной кольцевой платформы. Параметрические представления положения базовых точек сегментов двигателя во времени позволяют, в конечном итоге, формировать алгоритмы программируемых движений.

Обоснована возможность встраивания разработанной системы перемещений в проекционные системы оптико-механического оборудования с сохранением традиционной схемы компоновки. При этом обеспечивается возможность адаптивной юстировки оптических элементов в процессе эксплуатации, позволяющая подстраивать оптические элементы при изменении геометрии проекционной системы вследствие старения. В результате поддерживаются на требуемом уровне показатели назначения проекционной системы: разрешающая способность, глубина резкости и контрастности изображения, дисторсия. Разработанная система перемещений может быть использована как координатная система позиционирования, совмещения и сканирования в сборочном и другом прецизионном оборудовании.

Ключевые слова: прецизионная система перемещений, сегментный двигатель, механизм параллельной кинематики, оптико-механическое оборудование.

Ил. 5. Библиогр.: 11 назв.

PRECISION MOTION SYSTEM FOR OPTO-MECHANICAL EQUIPMENT OF MICROELECTRONICS

DAINIAK I. V., KARPOVICH S. E., KEKISH N. I., GOLDYN L.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

The paper proposes a structure of precision motion system built on the basis of a circular multi-coordinate synchronous segment motor and reconfigurable parallel kinematic mechanism. The multi-coordinate synchronous segment motor may have from two to six movable segments depending on the design, and number of the segments generally defines an internal mobi-

lity of the motor. A specific feature of the parallel kinematic mechanism consists in the possibility of its structure reconfiguration by serial connection of two neighboring rods with the help of free elements of their spherical joints into triangular circuits with one spherical hinge at the common vertex. As result of this, the controlled motion of motor movable segments is transformed into the complex spatial displacement of circular platform with number of degrees of freedom up to six inclusively.

A mathematical model for solution of the kinematic problem in the investigated parallel mechanism has been offered in the paper. The model allows to calculate a position of movable segments of multi-coordinate synchronous motor depending on the desired position and orientation of the executive circular platform. The parametric definition of base point positions in the motor segments in time allows eventually to form algorithms of programmable motions.

The paper substantiates ability to embed the developed motion system into projection unit of opto-mechanical equipment while preserving traditional configuration scheme. This provides the possibility of adaptive adjustment of optical elements during operation; it allows to adjust the optical elements when the geometry of projection system is changed due to deterioration. As result, main characteristics of projection system: resolution, depth of field and image contrast and distortion are maintained at the required level. The developed motion system can be used as a coordinate system of positioning, alignment and scanning in the assembly and other precision equipment.

Keywords: precision motion system, segment motor, parallel kinematic mechanism, opto-mechanical equipment.

Fig. 5. Ref.: 11 titles.

Введение. Развитие микроэлектроники связано, прежде всего, с уменьшением топологической нормы и увеличением размеров кремниевых пластин, которые, кроме совершенствования технологии производства, требуют совершенствования технологического оборудования, особенно оптико-механического и сборочного. К такому оборудованию предъявляются требования по точности позиционирования, более высоких разрешения и производительности, больших диапазонов перемещений [1–3]. При этом с каждым шагом уменьшения топологической нормы и увеличения размера кремниевых пластин существенно возрастают требования к координатным системам перемещений, которые в настоящее время, как правило, строятся на электромагнитных модулях движения, komponуемых в линейные шаговые двигатели различных конфигураций с соответствующей цифровой системой управления [4]. Они характеризуются модульностью, однотипностью независимо от характера движения и вида управления, возможностью работы по программе от ЭВМ как в разомкнутых системах, так и в системах с обратной связью, осуществляют реализацию сложных многокоординатных и точно согласованных перемещений кремниевых пластин и технологического инструмента с широким варьированием параметров движения [5, 6]. Однако используемый базовый ряд координатных модулей и координатных систем на их основе уже не обеспечивает возрастающие требования к точности и производительности перспективного технологического оборудования. Необходимы новые подходы и решения в этой области. Следует разрабатывать принципиально новые координатные

системы и системы электропривода для построения многофункциональных координатных систем, предназначенных для встраивания в технологическое оборудование микроэлектроники. Это является одной из актуальных задач точного электронного машиностроения, представляющей научный и практический интерес. Успешное решение данной задачи позволит разрабатывать и производить оборудование в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к его точности, качеству и производительности.

Многокоординатный модуль системы перемещений на базе реконфигурируемого механизма параллельной кинематики. Одним из возможных вариантов решения поставленной выше задачи является предложенный авторами статьи многокоординатный модуль системы перемещений, конфигурируемый на сегментном многокоординатном приводе прямого действия, управляемое движение подвижных сегментов которого через исполнительный реконфигурируемый механизм параллельной кинематики трансформируется в сложное пространственное движение кольцевой платформы с числом степеней свободы до шести включительно в зависимости от числа задействованных управляемых сегментов. В отличие от традиционной системы многокоординатного привода, когда каждая координата представляет собой однокоординатный механо-аппаратный модуль движения со своим отдельным механо-аппаратным интерфейсом, в разрабатываемых и используемых авторами гибридных многокоординатных приводах электромагнитная система, конструктивное исполнение и аппаратный интерфейс являются общими для всей конкрет-

ной системы перемещений. Структурное исполнение такого многокоординатного синхронного двигателя с автономно управляемыми сегментами на одном кольцевом статоре показано на рис. 1.

Статор двигателя (рис. 1) состоит из магнитопровода и постоянных магнитов, расположенных с чередующейся полярностью магнитных полюсов по делительному диаметру. Работа предложенного многокоординатного синхронного двигателя основана на взаимодействии бегущего электромагнитного поля якоря со стационарным гармоническим полем статора. Для управления перемещениями подвижных сегментов предлагается аппаратно-программный комплекс на основе контроллера LSMC-х, разработанного на предприятии «Рухсервомотор» (г. Минск, Беларусь) совместно с НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» НИЧ БГУИР, который позволяет одновременно управлять шестью сегментами в замкнутом режиме [7].

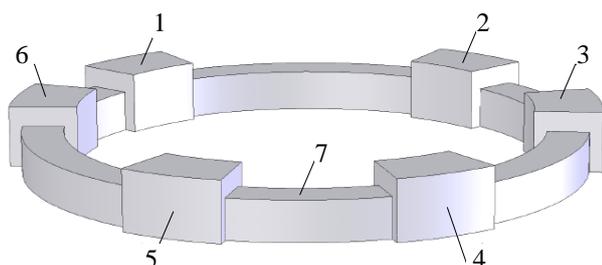


Рис. 1. Структура многокоординатного синхронного двигателя: 1–6 – подвижные сегменты; 7 – неподвижный статор

Многокоординатный синхронный двигатель в зависимости от конструктивного исполнения может иметь от двух до шести подвижных сегментов, число которых в целом определяет внутреннюю подвижность двигателя. К примеру, в конкретном случае реализации многокоординатного синхронного двигателя, приведенного на рис. 1, обеспечивается внутренняя подвижность с шестью степенями свободы. Следует также отметить, что неподвижное кольцо статора может быть выполнено в виде торцевой либо горизонтальной плоскопараллельной направляющей, по которой перемещаются подвижные сегменты. Конструктивно-технологическая особенность многокоординатного привода состоит в том, что для реализации движений с двумя и более степенями свободы исполнительного объекта в пространстве не

требуется нескольких отдельных приводов. Кроме того, его способность дополнительно обеспечивать управляемое поворотное движение с неограниченным углом поворота исполнительного объекта вокруг вертикальной оси расширяет область непосредственного применения и делает такой двигатель весьма перспективным для построения на его основе сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, современного прецизионного фрезерного и сверлильного оборудования, прецизионных промышленных роботов или управляемых платформ, например для телескопов, лазеров, телекоммуникационных антенн, имитаторов пространственных движений.

В качестве исполнительного механизма системы перемещений предлагается использовать реконфигурируемый механизм параллельной кинематики, показанный совместно с многокоординатным синхронным двигателем на рис. 2.

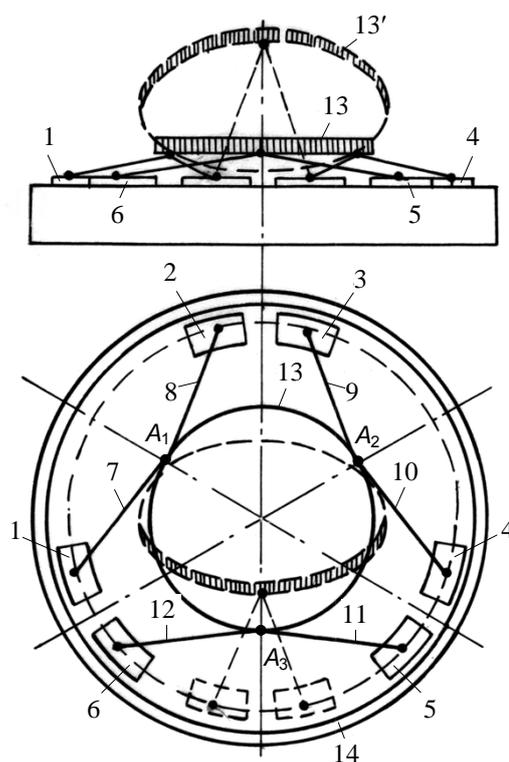


Рис. 2. Реконфигурируемый механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы: 1–6 – подвижные сегменты; 7–12 – шатуны; 13 – платформа; 14 – кольцевой статор; A_1, A_2, A_3 – двойные сферические соединения платформы с шатунами

Особенность предложенного механизма состоит в возможности его реконфигурирования за счет последовательного соединения двух сосед-

них шатунов свободными элементами их сферических шарниров в треугольные контуры с одним сферическим шарниром в общей вершине. При этом каждый переход фактически приводит к уменьшению на единицу числа шатунов и свободных сферических шарниров. Так, если в начальной структуре есть шесть свободных элементов для соединения с шестью независимо управляемыми двигателями, то структуры первой, второй и третьей реконфигураций имеют таких элементов пять, четыре и три соответственно. Это значит, что число степеней свободы механизма изменяется от шести до трех. Таким образом, наблюдается прямая структурная реконфигурация с изменением числа степеней свободы и тем самым такого же изменения числа независимых координат управляемого движения кольцевой рабочей платформы [8, 9].

Укрупненная иерархическая структура системы управления разработанной прецизионной системой перемещений с базовым числом степеней свободы, равным шести, показана на рис. 3.

Математическая модель решения задачи кинематики для реконфигурируемого исполнительного механизма. Конфигурация и вместе с тем кинематика рассматриваемого механизма (рис. 2) однозначно определяются положением ведущих звеньев (1, 2, ..., 6), конструктивно выполненных в виде подвижных

управляемых сегментов поворотного привода, законы движения которых в рассматриваемой задаче кинематики определяются исходя из заданного положения и ориентации системы координат xyz подвижного кольца по отношению к системе координат XYZ , жестко связанной с неподвижным кольцом. Выберем системы координат xyz и XYZ , как показано на рис. 4, расположив оси x , y и X , Y в плоскостях соответствующих колец, а оси z и Z – ортогонально плоскостям колец.

С учетом выбранных систем координат xyz и XYZ (рис. 4) задача кинематики для рассматриваемого механизма может быть сформулирована следующим образом. Необходимо по положению и ориентации подвижной системы координат xyz , задаваемым дискретно или параметрически в неподвижной системе координат XYZ , найти положение сегментов 1, 2, ..., 6, определяемых в системе координат XYZ координатами точек A_i и B_i ($i = 1, 2, 3$). Положение и ориентацию подвижной системы координат xyz по отношению к неподвижной системе координат XYZ будем задавать соответственно координатами точки $O(x_0, y_0, z_0)$ и углами Эйлера φ, θ, ψ независимых поворотов, обеспечивающих угловые совмещения подвижной и неподвижной систем координат. Для однозначности решения необходимо принять последовательность этих поворотов.

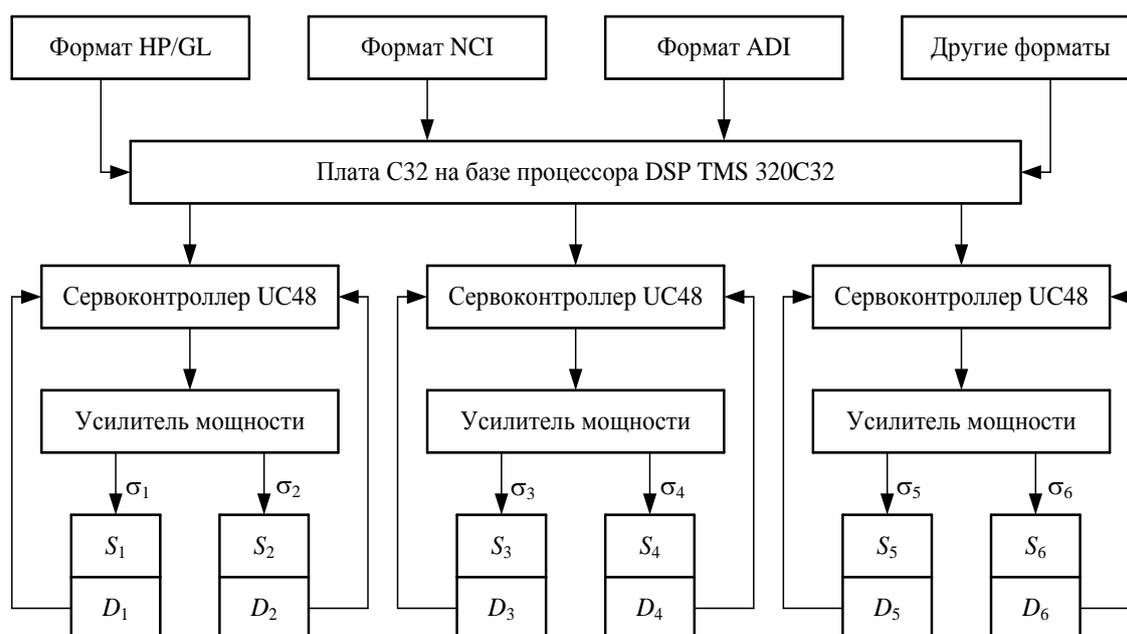


Рис. 3. Иерархическая структура системы управления

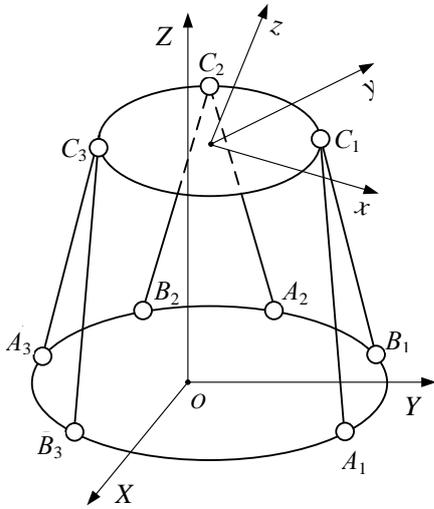


Рис. 4. Расчетная структурно-кинематическая модель реконфигурируемого механизма

Авторами принята последовательность поворотов по схеме $\varphi \rightarrow \theta \rightarrow \psi$, т. е. сначала осуществляется поворот вокруг оси x на угол φ , затем вокруг оси y на угол θ и, наконец, поворот вокруг оси z на угол ψ . С учетом вышесказанного результирующая матрица поворота $M_{\varphi, \theta, \psi}$ определится произведением следующих матриц:

$$M_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix};$$

$$M_{\psi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Используя матрицы (1), окончательно получим результирующую матрицу поворота $M_{\varphi, \theta, \psi}$ в виде

$$M_{\varphi, \theta, \psi} = M_{\varphi} M_{\theta} M_{\psi} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi & \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi \\ 0 & 0 & \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \rightarrow$$

Перепишем ее в однородных координатах в виде матрицы четвертого порядка

$$M'_{\varphi, \theta, \psi} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & [M_{\varphi, \theta, \psi}]_{3 \times 3} & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрица положения подвижной платформы M_0 , характеризуемая координатами x_0, y_0, z_0 в однородных координатах, запишется в виде

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда полное преобразование, определяемое положением точки $O(x_0, y_0, z_0)$ и поворотом на углы Эйлера φ, θ, ψ , будет с учетом (2) и (3) определяться матрицей M следующего вида:

$$M = M_0 M'_{\varphi, \theta, \psi} = M'_{\varphi, \theta, \psi} M_0 =$$

$$\begin{bmatrix} & & & x_0 \\ & [M_{\varphi, \theta, \psi}]_{3 \times 3} & & y_0 \\ & & & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Таким образом, полученная матрица M представляет собой полное математическое описание положения и ориентации подвижного кольца в системе координат XYZ . Положение точек C_1, C_2, C_3 в системе координат подвижного кольца, как это следует из рис. 4, может быть задано следующими матрицами-столбцами:

$$R_{C_1} = \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad R_{C_2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}r \\ \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad R_{C_3} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}r \\ \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Пересчет координат точек C_1, C_2, C_3 в неподвижную систему координат XYZ осуществляется с помощью матричного преобразования

$$R^{(C_i)} = MR_{C_i} \quad (i = 1, 2, 3)$$

или с учетом (4) в виде

$$R^{(C_i)} = \begin{bmatrix} x^{(C_i)} \\ y^{(C_i)} \\ z^{(C_i)} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_{C_i} \\ y_{C_i} \\ z_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Зная в рассматриваемой конфигурации механизма текущее положение точек C_1 , C_2 и C_3 , координаты точек A_i и B_i ($i = 1, 2, 3$) будем искать из условия принадлежности этих точек одновременно окружности радиусом R с каноническим уравнением в виде

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (6)$$

и окружностей как линий пересечений трех сфер радиусом l с центрами соответственно в точках C_1 , C_2 , C_3 с координатной плоскостью XOY неподвижной системы координат. Поэтому сначала построим уравнение линии пересечения сферы с центром в точке C_1 и плоскости XOY .

Уравнение сферы с центром в точке C_1 имеет вид

$$(x - x^{(C_1)})^2 + (y - y^{(C_1)})^2 + (z - z^{(C_1)})^2 = l^2, \quad (7)$$

а уравнение координатной плоскости XOY

$$z = 0. \quad (8)$$

Отсюда, подставив (8) в (7), окончательно получим уравнение искомой линии пересечения в виде

$$(x - x^{(C_1)})^2 + (y - y^{(C_1)})^2 = l^2 - (z^{(C_1)})^2. \quad (9)$$

Для нахождения координат точек A_1 и B_1 , соответствующих рассматриваемому положению точки C_1 , решим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} (x - x^{(C_1)})^2 + (y - y^{(C_1)})^2 = l^2 - (z^{(C_1)})^2; \\ x^2 + y^2 = R^2. \end{cases} \quad (10)$$

Аналогичным образом определяются координаты точек A_2 , B_2 и A_3 , B_3 .

Найденные точки A_i и B_i ($i = 1, 2, 3$) определяют положения подвижных сегментов синхронного многокоординатного двигателя в зави-

симости от заданного положения и ориентации исполнительной кольцевой платформы. Параметрические представления положения этих точек во времени позволяют в конечном итоге формировать алгоритмы программируемых движений, реализуемых системой управления [10].

Встраивание прецизионной системы перемещений в проекционный узел оптико-механического оборудования. Показатели назначения проекционных систем высокого разрешения технологического оптико-механического оборудования микроэлектроники определяются точностью изготовления формы оптических элементов, точностью позиционирования их в оптической системе и стабильностью поддержания этих параметров в течение времени жизни проекционной системы [2, 11]. В настоящее время фирмы – изготовители проекционных систем высокого разрешения используют специальное технологическое оборудование для юстировки положения оптических элементов. Основной принцип наладки проекционных систем с помощью этого оборудования заключается в подгонке размеров оправок оптических элементов для того, чтобы исключить перекосы, заклены, несовмещение оптических осей, устранение зазоров при установке в основной корпус конструкции проекционной системы. Такая технология не всегда может обеспечить наладку изделия в требуемом диапазоне показателей назначения при его изготовлении. Сам сборочный процесс изготовления фотолитографического объектива включает многоэтапную процедуру сборки и разборки с подгонкой и юстировкой оправок линз по схеме, представленной на рис. 5. При эксплуатации геометрия проекционной системы подвержена тепловому и временному дрейфам, при этом координаты позиционирования оптических элементов могут выйти за допустимые пределы, обеспечивающие показатели назначения проекционной системы (разрешающая способность, глубина резкости и контрастности изображения, дисторсия).

Взамен традиционной схемы сборки объективов авторами предложено применять для оправок с линзами прецизионную систему перемещений, показанную на рис. 2. Подвижное кольцо при этом используется для установки на нем оправки с оптическим элементом.

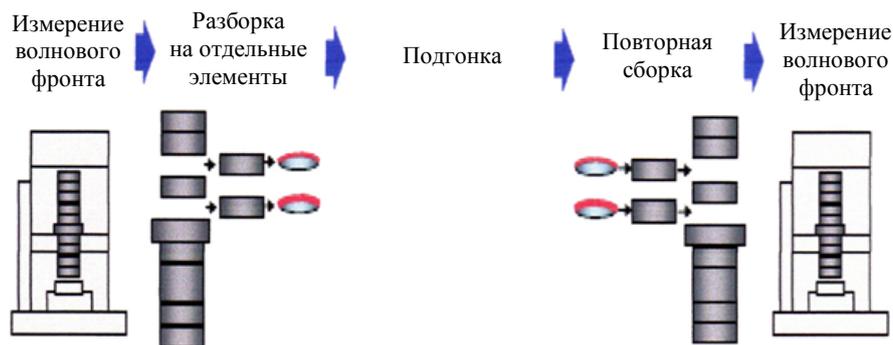


Рис. 5. Схема сборки фотолитографического объектива

В результате конструктивно и кинематически обеспечивается возможность управляемого (в том числе и адаптивного) позиционирования отдельных оптических элементов, в общем случае с шестью степенями свободы, в небольшом, но достаточном для юстировки оптической системы диапазоне изменения координат как линейных (x, y, z), так и угловых ($\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$) перемещений. Необходимые малые изменения координат при реализации адаптивной юстировки позволяют компактно встраивать исполнительный механизм позиционирования в конструкцию проекционной системы, конфигурируя его в виде двух колец, одно из которых неподвижно с электромагнитными модулями движения в корпусе фотолитографического объектива, а другое – подвижное с оправкой для оптического элемента, управляемое через промежуточные кинематические цепи или элементы в виде шатунов со сферическими парами, эксцентриков или клиновых преобразователей. Таким образом, сохраняется традиционная схема сборки, при этом в конструкцию проекционной системы может быть встроен механизм стабилизации координат позиционирования оптических элементов, позволяющий подстраивать их при сборке и изменении геометрии проекционной системы и оптических элементов вследствие старения. В результате предложенные адаптивные механизмы позиционирования позволят поддерживать на требуемом уровне показатели назначения. При этом для каждого подстраиваемого оптического элемента адаптивный механизм позиционирования предлагается делать на основе исполнительных механизмов с шестью или меньшим числом степеней свободы кольцевого типа с сегментными электромагнитными модулями.

Адаптивные механизмы юстировки оптических элементов позволяют учитывать обязательные требования, вытекающие из конструктивных и функциональных особенностей проекционной системы оптико-механического оборудования, такие как:

- минимальные осевые габариты, не более чем в 1,5–2 раза превышающие осевой размер оправки с линзой;
- габаритный диаметр механизма не должен превышать внутренний диаметр цилиндрического корпуса объектива или селективного блока с линзой;
- повышенная жесткость конструкции с автоматической фиксацией положения после завершения юстировочных перемещений;
- диапазон линейных перемещений по координатам x и y – от 0 до 1 мм, по оси z – от 0 до 2 мм, по углам φ, θ, ψ угловые юстировочные перемещения – от 0° до 1° .

Проведенное компьютерное моделирование показало, что для таких механизмов с малым осевым размером калибровочные передаточные коэффициенты по всем шести координатам (трем линейным и трем угловым) в диапазонах перемещений (линейных – до 1 мм, угловых – до 1°) лежат в пределах от 0,01 до 0,02. Это значит, что координатное разрешение по линейным координатам при точности сегментного привода 1 мкм будет равно 10 нм, а угловое разрешение составит $5''$. Эти характеристики прецизионных систем перемещений вполне удовлетворяют не только современному, но и перспективному оборудованию. Наряду с описанным выше применением, разработанная система перемещений может быть использована как координатная система позиционирования,

совмещения и сканирования в сборочном и другом прецизионном оборудовании.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная прецизионная система перемещений наиболее полно удовлетворяет требованиям оптико-механического оборудования микроэлектроники. Она позволяет разрабатывать адаптивные механизмы, обеспечивающие юстировку оптических элементов проекционных систем в процессе изготовления и эксплуатации. При этом может выполняться юстировка оправок с линзами по шести независимым в пространстве координатам с шестью степенями свободы при сохранении оптической оси системы.

2. Исполнительный реконфигурируемый механизм параллельной кинематики, входящий в состав системы перемещений, обладает повышенной жесткостью конструкции, обеспечивая стабильность сохранения позиции и автоматическую фиксацию положения после завершения юстировки. Он конструктивно выполнен в виде модульного сегментного блока в цилиндрическом корпусе минимальных осевых габаритов.

3. Полученное авторами аналитическое решение задачи кинематики, возникающей при разработке системы управления для реконфигурируемого механизма параллельной кинематики, позволило алгоритмизировать управление программируемыми движениями системы перемещений. Решение выполнено на базе геометро-аналитического подхода, основанного на уравнениях аналитической геометрии в трехмерном пространстве и матричных преобразованиях в однородных координатах. При этом алгоритмически обеспечено сохранение начальных конфигурационных условий во всем диапазоне изменений искомых переменных с обеспечением однозначного визуального отображения по разработанной программе симуляции в среде MatLab.

4. Предложенную систему перемещений на кольцевом сегментном многокоординатном приводе рекомендуется использовать в оптико-механическом оборудовании микроэлектроники с проекционными системами нанометрового

разрешения, в которых важнейшими являются точность позиционирования элементов и стабильность поддержания геометрических параметров в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аваков, С. М.** Автоматический контроль топологии планарных структур / С. М. Аваков, С. Е. Карпович. – Минск: ФУАинформ, 2007. – 168 с.
2. **Оптико-механические** комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм / С. М. Аваков [и др.] // Фотоника. – 2007. – № 6. – С. 35–39.
3. **Аваков, С. М.** Современное оборудование для производства изделий электронной техники / С. М. Аваков, С. Б. Школык // Петербургский журнал электроники. – 2006. – Вып. 1 (46)–2 (47). – С. 204–209.
4. **Системы** многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / В. В. Жарский [и др.]; под ред. С. Е. Карповича. – Минск: Бестпринт, 2013. – 208 с.
5. **Карпович, С. Е.** Прецизионные системы перемещений / С. Е. Карпович, Ю. С. Межинский, В. В. Жарский // Доклады БГУИР. – 2004. – № 3 (7). – С. 50–61.
6. **Карпович, С. Е.** Прецизионные системы перемещений для оборудования производства изделий электронной техники / С. Е. Карпович, В. В. Жарский, И. В. Дайняк // Доклады БГУИР. – 2014. – № 2 (80). – С. 60–72.
7. **Структура** механической системы на базе параллельного манипулятора с шестью степенями свободы / С. Е. Карпович [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – Минск: Промпечать, 2013. – Вып. 2. – С. 150–153.
8. **Litvinau, Y.** On-the-Fly Reconfigurable Parallel Manipulators / Y. Litvinau, S. Karpovich // Proceedings of 56th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, September 12–16, 2011 / Technical University of Ilmenau. – Ilmenau, 2011. – P. 90–91.
9. **Дайняк, И. В.** Реконфигурируемые исполнительные механизмы параллельной кинематики / И. В. Дайняк, С. Е. Карпович, В. В. Жарский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А. А. Дюжев [и др.]. – Минск: Промпечать, 2013. – Вып. 2. – С. 145–149.
10. **Моделирование** механизмов параллельной кинематики в среде MatLab/Simulink / С. Е. Карпович [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2013. – 153 с.
11. **Карпович, С. Е.** Построение математических моделей автоматизированного проектирования прецизионного оптико-механического оборудования для электронного машиностроения / С. Е. Карпович, В. Е. Матюшков, С. М. Аваков; под ред. С. Е. Карповича. – Минск: НПО «Интеграл», 2000. – 123 с.

REFERENCES

1. **Avakov, S. M., & Karpovich, S. E.** (2007) *Automation Control of Planar Structure Topology*. Minsk, FUAinform. 168 p. (in Russian).

2. **Avakov, S. M.**, Ovchinnikov, V., Karpovich, S., Titko, E., & Trapashko, G. (2007) Optico-Mechanical Complexes for Defect-Free Manufacturing of 0.35 mkm and 90 nm Photomasks. *Fotonika* [Photonics], 6, 35–39 (in Russian).
3. **Avakov, S. M.**, & Shkolyk, S. B. (2006) Modern Equipment for Production of Electronics Items. *Peterburgsky Zhurnal Elektroniki* [Saint-Petersburg Journal of Electronics], 1 (46) – 2 (47), 204–209 (in Russian).
4. **Zharsky, V. V.**, Karpovich, S. E., Dainiak, I. V., Lanin, V. L., Petukhov, I. B., Litvinov, E. A., & Poliakovskii, V. V. (2013) *Systems of Multi-Coordinate Motions and Actuation Mechanisms for Precision Technological Equipment*. Minsk, Bestprint. 208 p. (in Russian).
5. **Karpovich, S. E.**, Mezhinsky, Yu. S., & Zharsky, V. V. (2004) Precision Motion Systems. *Doklady BGUIR* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 3 (7), 50–61 (in Russian).
6. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., & Dainiak, I. V. (2014) Precision Motion Systems for Equipment Used for Manufacturing of Electronics Items. *Doklady BGUIR* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2 (80), 60–72 (in Russian).
7. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., Dainiak, I. V., & Arebi, M. A. (2013) Structure of Mechanical System on the Basis of Parallel Manipulator with 6 Degrees of Freedom. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniia. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Important Issues of Engineering Science: Collection of Research Papers] Minsk, Prompechat', 2, 150–153 (in Russian).
8. **Litvinau, Y.**, & Karpovich, S. (2011) On-the-Fly Reconfigurable Parallel Manipulators. *Proceedings of 56th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, September 12–16, 2011*. Ilmenau, Technical University of Ilmenau, 90–91.
9. **Dainiak, I. V.**, Karpovich, S. E., & Zharsky, V. V. (2013) Reconfiguration Actuation Mechanisms of Parallel Kinematics. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniia. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Important Issues of Engineering Science: Collection of Research Papers] Minsk, Prompechat', 2, 145–149 (in Russian).
10. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., Dainiak, I. V., & Litvinov, E. A. (2013) *Simulation of Parallel Kinematics Mechanisms in MatLab/Simulink Environment*. Minsk, Bestprint. 153 p. (in Russian).
11. **Karpovich, S. E.**, Matiushkov, V. E., & Avakov, S. M. (2000) *Development of Mathematical Models for Computer-Aided Designing of Precision Optico-Mechanical Equipment for Electronic Engineering*. Minsk, JSC "Integral". 123 p. (in Russian).

Поступила 09.04.2014

УДК 535.317

КОМПОЗИЦИИ АТЕРМАЛИЗОВАННЫХ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

Асп. МУРАВЬЁВ А. В., канд. техн. наук, доц. КУЧЕРЕНКО О. К.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com

Приборы инфракрасной техники часто эксплуатируются в сложных условиях окружающей среды. В первую очередь это относится к температурному диапазону, который согласно требованиям может достигать ± 60 °С. Исходя из этого одной из важных задач при проектировании объективов инфракрасных приборов является сохранение их основных характеристик при температурных колебаниях. Изменение температуры внутри объектива приводит к изменению конструктивных параметров оптической системы и как следствие к терморасфокусировке и появлению термоаббераций в изображении, что повлечет за собой резкое снижение частотных и энергетических характеристик системы. В статье рассмотрен вопрос компенсации влияния температурных полей на качество изображения фокусирующих узлов, работающих в инфракрасном спектральном диапазоне, для случая однородного распределения температуры в системе.

Устранение зависимости характеристик ИК-объективов от температуры целесообразно проводить на этапе проектирования фокусирующего узла путем использования методов атермализации. Рассмотрены результаты применения разработанной авторами методики пассивной оптической атермализации для проектирования инфракрасных объективов-триплетов и отмечены их преимущества по сравнению с неатермализованными аналогами. Предложены схемы термнезависимых трехкомпонентных объективов, работающих в дальнем инфракрасном диапазоне спектра 8–14 мкм, с матричными фотоприемниками. Приведены результаты анализа влияния изменения температурного поля на качество изображения как неатермализованных, так и атермализованных ИК-объективов. Рекомендуются комбинации оптических материалов и характеристики оптических систем для создания атермализованных объективов дальней инфракрасной области спектра. Приведена оптическая система триплета, рассчитанного на основе методики атермализации.

Ключевые слова: инфракрасная техника, пассивная атермализация, атермализованный объектив.

Ил. 4. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.