

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО ПЛАНАРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В современной полупроводниковой промышленности наблюдается устойчивая тенденция миниатюризации компонентов. В связи с этим на многих стадиях производства, например, изготовления полупроводниковых пластин, лазерной обработки, электронно-лучевой литографии и тестирования требуется решить задачу повышения точности и производительности технологического оборудования. Точность работы и производительность такого оборудования во многом определяется координатной системой движения. Прецизионный планарный электропривод на базе планарного линейного шагового двигателя (ПЛШД) нашел широкое применение в прецизионных координатных системах благодаря свойствам параллельной кинематики, т.е. высокой скорости, высокой точности движения в двух координатах ( $X$  $Y$ ) при одной подвижной части.

Классическая конструкция ПЛШД использует совмещенную взаимно перпендикулярную нарезку зубцов на рабочей поверхности статора и ортогональное размещение четырех модулей линейных шаговых двигателей, образующих пары осевых двигателей ( $X$  и  $Y$ ) на подвижном якоре [1]. Каждая пара осевых двигателей обеспечивает перемещение по одной из осей  $X$  и  $Y$ , а раздельное управления двигателями позволяет компенсировать разворот относительно центра масс якоря (поворотная ось  $\varphi$ ). Якорь удерживается над поверхностью статора с помощью интегрированных аэростатических опор.

Основным элементом, определяющим точность и повторяемость электропривода, является измерительная система. В [2] автором представлен планарный электропривод, оснащенный измерительной системой на базе емкостных датчиков положения. Разработанная измерительная система имеет субмикронное разрешение (0.3 мкм), низкую себестоимость, не подвержена эффекту насыщения со стороны двигателей.

Для аттестации точности прецизионного планарного электропривода был разработан аттестационный стенд. В качестве эталонных датчиков используются лазерные интерферометры фирмы SIOS, обладающие разрешением 0.1 нм. На рис. 1 представлена геометрическая модель аттестационного стенда. Г-образный отражатель лазерного интерферометра (1) располагается на подвижном якоре (2) планарного двигателя (5 - статор ПЛШД). Трехлучевой лазерный интерферометр (3) используется для измерения положения по линейной оси  $X$  и поворотной оси  $\varphi$ . Однолучевой лазерный интерферометр (4) используется для измерения положения по линейной оси  $Y$ . Диапазон измерения лазерных интерферометров аттестационного стенда составляет 85 x 85 мм.

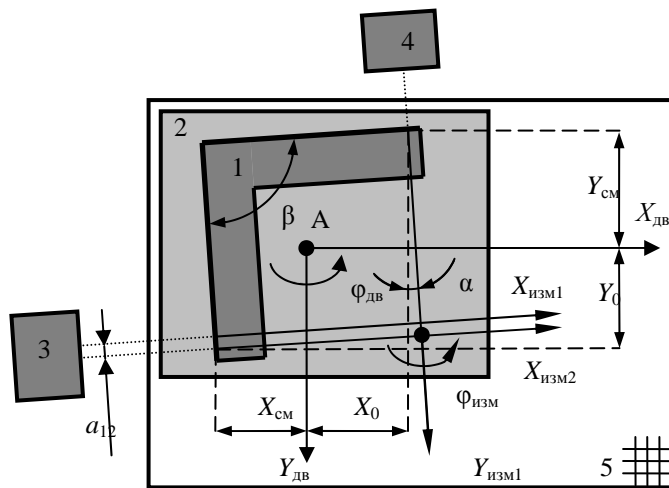


Рис. 1 Геометрическая модель аттестационного стенда.

Координаты планарного электропривода описываются вектором  $\mathbf{X}_{дв} = (X_{дв}, Y_{дв}, \varphi_{дв})^T$ , точка А соответствует начальной точки. Вектор измеренных координат  $\mathbf{X}_{изм} = (X_{изм}, Y_{изм}, \varphi_{изм})^T$  вычисляется из показаний лазерных интерферометров по формуле (1).

$$\mathbf{X}_{изм} = \begin{pmatrix} X_{изм2} \\ Y_{изм1} \\ \arctg((X_{изм2} - X_{изм1})/a_{12}) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $a_{12}$  - расстояние между измерительными лучами трехлучевого лазерного интерферометра.

Положение, измеренное с помощью лазерных интерферометров, включает искомую составляющую, вызванную погрешностью электропривода, и составляющую, вызванную погрешностью измерения. Последняя вносит существенную ошибку и должна быть устранена. Позиционное отклонение

$\Delta\mathbf{X}$  вычисляется с учетом коррекции по формуле (2).

$$\Delta\mathbf{X} = (\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_{изм}) - \mathbf{C}) - \mathbf{X}_{дв}, \quad (2)$$

где матрица  $\mathbf{A}$  используется для устранения погрешности, вызванной несоосностью расположения измерительного отражателя относительно осей движения планарного двигателя при его установке, угол разворота  $\alpha$  вычисляется по экспериментальным данным для серии точек; матрица  $\mathbf{B}$  используется для коррекции неортогональности измерительного отражателя, где угол неортогональности  $\beta$  - величина, указанная в паспортных данных на прибор; вектора  $\mathbf{C}$  используется для приведения измеренного положения к центру масс на основании геометрической модели измерительного стенда (3).

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \alpha = \frac{1}{i_m} \cdot \sum_{i=1}^{i_m} (\arctan(Y_{дв,i}/X_{дв,i}) - \arctan(Y_{изм,i}^{kop1}/X_{изм,i}^{kop1})),$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\operatorname{ctg}(\beta) & \sin^{-1}(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = \begin{pmatrix} (Y_0 - Y_{дв}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{изм}) + X_{см} - X_{см}/\cos(\varphi_{изм}) \\ (X_0 + X_{дв}) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{изм}) - Y_{см} + Y_{см}/\cos(\varphi_{изм}) \\ 0 \end{pmatrix}.$$
(3)

В соответствии со стандартами ISO 230-6 [3] для аттестации точности многокоординатных электроприводов рекомендуется использовать диагональный метод, заключающийся в определении позиционного отклонения при движении по диагоналям в плоскости XY. На рис. 2 представлены результаты аттестации планарного электропривода. Позиционное отклонение составило:  $\Delta X = 9$  мкм,  $\Delta Y = 16$  мкм,  $\Delta\varphi = 39$  угл. сек.

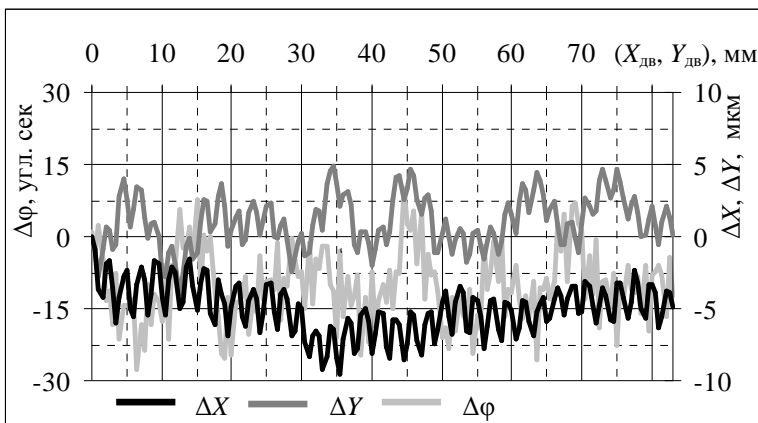


Рис. 2 Результаты аттестации точности электропривода.

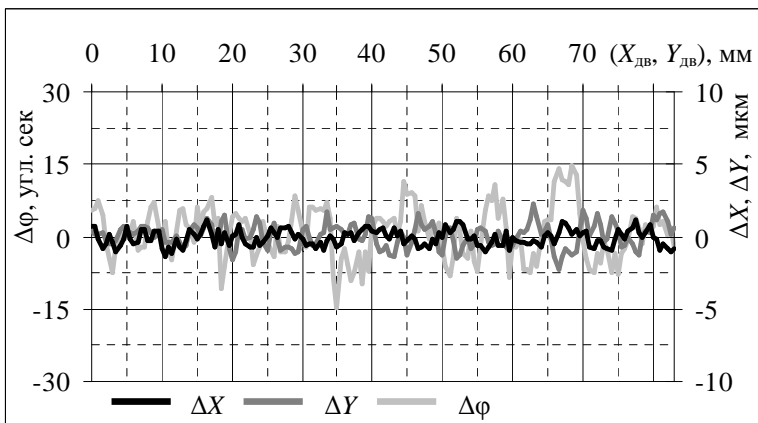


Рис. 3 Результаты калибровки электропривода.

$$\mathbf{X}_{КП} = (X_{КП}(X_{дв}) \quad Y_{КП}(Y_{дв}) \quad \varphi_{КП}(X_{дв}))^T, \mathbf{X}_{ДП} = (X_{ДП}(X_{дв}, Y_{дв}) \quad Y_{ДП}(X_{дв}, Y_{дв}) \quad \varphi_{ДП}(X_{дв}, Y_{дв}))^T. \quad (5)$$

На рис. 3 представлены результаты калибровки планарного электропривода. Суммарные размеры калибровочных таблиц всех осей составили 579 точек. Точность электропривода после калибровки составила  $\pm 2.5$  мкм по осям X, Y,  $\pm 15$  угл. сек. по оси  $\varphi$ .

#### Список литературы

- [1] Saweyr B.A. Linear magnetic drive system. – U.S. Patent 3,735,231, May 22, 1973.
- [2] Тяпкин М.Г., Балковой А.П. Интегрированный емкостный датчик положения планарного электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 111 - 114.
- [3] ISO 230-6, test code for machine tools: “Part 6. Determination of positioning accuracy on body and face diagonals (diagonal displacement tests)”. 2002.
- [4] C.S. Teo. Accuracy enhancement for high precision gantry stage. Doctoral dissertation. National University of Singapore. – 2007. – p.127.

Позиционное отклонение  $\Delta X$  включает коротко- и длиннопериодную составляющую. Короткопериодная составляющая носит периодический характер и вызвана погрешностью емкостной системы измерения положения, период сигналов которой составляет 640 мкм. Длиннопериодная составляющая распределена по всей площади и вызвана дефектами станера ПЛШД.

Мощным методом повышения точности является калибровка электропривода с помощью эталонного датчика [4]. Учитывая характер погрешностей, для уменьшения размеров калибровочные таблицы разделены на короткопериодную и длиннопериодную таблицы (4) с линейной интерполяцией между точками.

$$\mathbf{X}_{калиб} = \mathbf{X}_{дв} - \mathbf{X}_{КП} - \mathbf{X}_{ДП}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{X}_{КП}$  – короткопериодная одномерная калибровочная таблица с шагом 80 мкм и периодом 1920 мкм,  $\mathbf{X}_{ДП}$  – длиннопериодная двумерная калибровочная таблица с шагом 6.4 мм по осям X, Y (5). Учитывая особенности планарного электропривода и емкостного датчика положения [2] короткопериодная калибровочная таблица по оси  $\varphi$  строится в функции положения по оси X.