

УДК 681.586.772:531.14

## ЕМКОСТНЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАНАРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

А.П. Балковой, М.Г. Тяпкин

Планарный электропривод на базе планарного линейного шагового двигателя получил применение в машинах, требующих высокой точности и скорости перемещения в плоскости  $XU$ . Описан принцип действия емкостного датчика положения планарного электропривода и методы обработки его сигналов, представлен разработанный прототип емкостного датчика положения, интегрированный в якорь планарного линейного шагового двигателя. В результатах представлена оценка разрешения и точности датчика.

**Ключевые слова:** планарный электропривод, емкостный датчик положения.

### Введение

Современное производство микросхем, печатных плат, лазерная обработка, а также устройства автоматического тестирования требуют высокой производительности и микронной точности позиционирования в плоскости. Электропривод на базе планарного линейного шагового двигателя (ПЛШД) может быть использован для таких применений [1].

Распространенная конструкция ПЛШД использует совмещенную взаимно перпендикулярную нарезку зубцов на рабочей поверхности статора и ортогональное размещение модулей линейных шаговых двигателей, образующих пары осевых двигателей ( $X$  и  $Y$ ) на подвижном якоре. Каждая пара осевых двигателей обеспечивает перемещение по одной из взаимно перпендикулярных осей  $X$  и  $Y$ . Число двигателей каждой оси вдвое больше принципиально достаточного минимума, обеспечивающего линейное перемещение, что объясняется необходимостью баланса нормальных и тяговых сил модулей и компенсации разворота якоря относительно его центра масс (ось  $\varphi$ ). Подвижный якорь ПЛШД удерживается над поверхностью статора с помощью интегрированных аэростатических опор.

ПЛШД может применяться в микрошаговом режиме, но погрешность (30 мкм/100 мм) и повторяемость (10 мкм) позиционирования в этом режиме недостаточны в ряде применений. Недостатками микрошагового режима также являются большая колебательность и динамическая ошибка, невысокое значение максимальной скорости и невозможность компенсации возмущений.

Увеличение точности позиционирования, скорости и поворотной устойчивости планарного электропривода обеспечивается вентильным режимом пар осевых двигателей и замыканием электропривода по положению якоря в трех координатах ( $X$ ,  $Y$ ,  $\varphi$ ) [2] с помощью датчика положения (ДП). ДП должен реализовать обратную связь по координатам  $X1$ ,  $X2$  центров масс пары осевых двигателей  $X$  и по ортогональной координате  $Y$ . Требуемые параметры датчика – субмикронное разрешение, микронная точность, высокая чувствительность (доли угловой минуты) к развороту.

В качестве ДП для ПЛШД могут использоваться датчики различных типов. В [3], например, представлен ДП электромагнитного типа с разрешением 0,2 мкм для осей  $X$ ,  $Y$  и  $0,0014^\circ$  для оси  $\varphi$ , точность датчика без калибровки  $\pm 25$  мкм, с калибровкой  $\pm 9$  мкм, частота опроса 14 кГц. Недостатком датчика является чувствительность к намагничиванию статора токами двигателя и паразитная модуляция при движении по ортогональной оси. Для устранения этих недостатков предлагается сложная программная коррекция. В [4] представлен оптический ДП с повторяемостью 1 мкм, основным достоинством которого является нечувствительность к электромагнитному полю, а недостатком – высокая чувствительность к чистоте поверхности статора. В [5, 6] представлен ДП емкостного типа. Емкостной датчик имеет высокий уровень усреднения ошибки за счет большой площади чувствительного элемента, точность  $\pm 10$  мкм. К недостаткам емкостного ДП можно отнести высокую чувствительность к влажности и температуре окружающей среды.

Темой настоящей работы является разработка прецизионного и надежного емкостного датчика положения для планарного электропривода.

### Принцип работы емкостного датчика положения

ДП состоит из измерительного первичного преобразователя (ПП) и вторичного преобразователя, или интерполятора (И), преобразующего аналоговые сигналы датчика в цифровой код положения.

Принцип действия датчика основан на изменении емкостей, образованных электродами датчика и заземленными зубцами статора планарного двигателя. Емкость такого конденсатора  $C$  пропорциональна площади  $S$  перекрытия электродов датчика и зубцов статора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{h},$$

где  $h$  – воздушный зазор между статором и поверхностью электрода;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Датчик положения планарного двигателя выполняется по принципу синусно-косинусного датчика (СКД). На рис. 1 представлен внешний вид элементарного ПП в составе СКД, содержащего группу из

четырёх металлических электродов (cos, /sin, /cos, sin) толщиной  $h_s$ , нанесенных на непроводящее термостабильное основание. Период  $\tau_m$  зубцов статора составляет 640 мкм, ширина зубцов  $w_m$  и пазов – по 320 мкм, глубина пазов  $h_m$  – 200 мкм, пазы заполнены эпоксидной смолой. Зубцы статора заземлены и являются ответной частью чувствительного элемента датчика. Период электродов датчика  $\tau_s$  составляет 480 мкм. Таким образом, на 3 зубца статора приходится 4 электрода, а каждый электрод сдвинут относительно предыдущего на 3/4 периода зубцов. Для уменьшения погрешности датчика, вызванной погрешностями изготовления зубцов статора, длина электродов  $l_s$  выбирается по возможности большей, а элементарные ПП соединяются в параллельные группы.

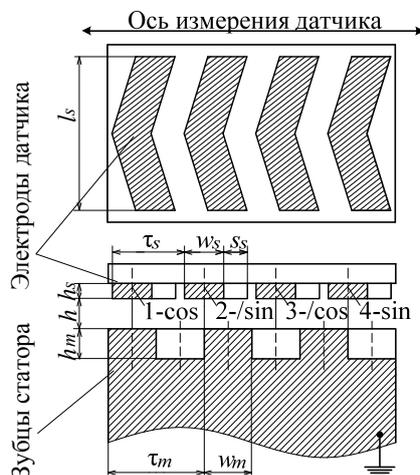


Рис. 1. Схематичный вид элементарного ПП и зубцов статора планарного двигателя

Для того чтобы емкость, образованная электродами датчика и заземленными зубцами статора, не изменялась при движении ПП по ортогональной координате, длина электродов  $l_s$  должна быть кратной периоду зубцов статора:

$$l_s = n \cdot \tau_m, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Приблизительно емкости электродов датчика зависят от положения следующим образом:

$$C_1 = C_0 + C_{\max 1} \cos(\theta); \quad C_2 = C_0 - C_{\max 1} \sin(\theta);$$

$$C_3 = C_0 - C_{\max 1} \cos(\theta); \quad C_4 = C_0 + C_{\max 1} \sin(\theta),$$

где  $C_0$  – постоянная составляющая емкости;  $C_{\max 1}$  – амплитуда первой гармоники; электрический угол  $\theta$  соответствует линейному положению датчика внутри периода  $x$ :

$$\theta = x \cdot \frac{2\pi}{\tau_m}.$$

Электроды датчика выполнены в виде «шеврона». Ширина  $w_s$ , скос  $s_s$  и толщина  $h_s$  электрода, а также высота расположения электрода над поверхностью  $h$  статора были оптимизированы для минимизации состава высших гармоник емкости, образованной электродом и зубцами статора.

#### Аппаратная часть емкостного датчика положения

Структурная схема емкостного ДП представлена на рис. 2. Электроды датчика и заземленные зубцы статора образуют переменные емкости, включенные вместе с сопротивлениями  $R$  в измерительные мосты. Верхняя точка моста подключена к высокочастотному генератору возбуждения.

При движении якоря емкости и баланс напряжений на плечах моста изменяются так, что напряжения на выходах дифференциальных усилителей (ДУ) представляют собой пару квадратурных амплитудно-модулированных сигналов  $U_{\sin}$ ,  $U_{\cos}$ :

$$U_{exc}(t) = U_{\max exc} \sin(2\pi f_{exc} t);$$

$$U_{\sin}(\theta, t) = U_{\max} \sin(\theta) \sin(2\pi f_{exc} t + \psi);$$

$$U_{\cos}(\theta, t) = U_{\max} \cos(\theta) \sin(2\pi f_{exc} t + \psi),$$

где  $U_{exc}$  – напряжение возбуждения датчика;  $U_{\max exc}$  – амплитуда возбуждения;  $f_{exc}$  – частота возбуждения (частота несущей);  $U_{\max}$  – амплитуда сигналов  $U_{\sin}$ ,  $U_{\cos}$ ;  $\psi$  – фаза сигналов относительно напряжения возбуждения. Сигналы ДП  $U_{\sin}$ ,  $U_{\cos}$  поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП), входящий в состав интерполятора, реализованного на базе цифрового сигнального процессора (ЦСП). После цифро-

вой обработки сигналы передаются в блок управления планарным электроприводом в аналоговом (синус/косинус, размах 1В) и цифровом виде.

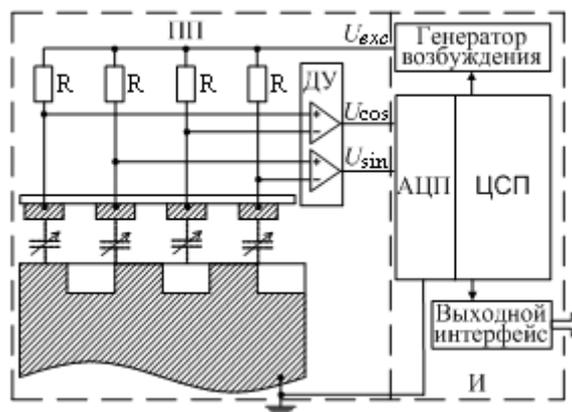


Рис. 2. Структурная схема емкостного ДП

### Обработка сигналов емкостного датчика положения

Первый этап обработки сигналов ДП – импульсное детектирование, т.е. выборка сигналов датчика в моменты времени  $t_k$ , когда несущая составляющая равна единице:

$$\begin{aligned} \sin(2\pi f_{exc} t_k + \psi) &= 1; \\ U_{\sin}(\theta_k, t_k) &= U_{\max} \sin(\theta_k) \sin(2\pi f_{exc} t_k + \psi) = U_{\max} \sin(\theta_k) = U_{\sin}(\theta_k); \\ U_{\cos}(\theta_k, t_k) &= U_{\max} \cos(\theta_k) \sin(2\pi f_{exc} t_k + \psi) = U_{\max} \cos(\theta_k) = U_{\cos}(\theta_k). \end{aligned} \quad (1)$$

Частота выборки разработанного емкостного ДП составляет

$$f_s = f_{exc} = 18300 \text{ Гц}.$$

Анализ фигур Лиссажу ДП показал, что детектированные сигналы отличаются от идеальных (1). Различные амплитуды сигналов  $A_{\sin}$ ,  $A_{\cos}$  обусловлены отличными от идеальных коэффициентами усиления ДУ, постоянные составляющие сигналов  $O_{\sin}$ ,  $O_{\cos}$  вызваны паразитными емкостями и неточностью установки ДП, нелинейные возмущения  $U_{d\sin}(\theta_k)$ ,  $U_{d\cos}(\theta_k)$  – нелинейностью (высшими гармониками) емкости ДП, шумы  $N_{\sin k}$ ,  $N_{\cos k}$  – дрейфом электронных компонентов и помехами от токов двигателя:

$$\begin{aligned} U_{\sin}(\theta_k) &= O_{\sin} + A_{\sin} \sin(\theta_k) + U_{d\sin}(\theta_k) + N_{\sin k}; \\ U_{\cos}(\theta_k) &= O_{\cos} + A_{\cos} \cos(\theta_k) + U_{d\cos}(\theta_k) + N_{\cos k}. \end{aligned}$$

Для вычисления положения внутри периода ДП используется арктангенсное преобразование, которое, в случае идеальных сигналов, дает следующий результат:

$$x_k = \frac{\tau_m}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_{\sin}(\theta_k, t_k)}{U_{\cos}(\theta_k, t_k)}\right) = \frac{\tau_m}{2\pi} \arctan\left(\frac{\sin(\theta_k)}{\cos(\theta_k)}\right) = \frac{\tau_m}{2\pi} \theta_k. \quad (2)$$

Возмущения в сигналах ДП приводят к погрешности датчика. По этой причине детектированные сигналы датчика перед вычислением положения подвергаются коррекции. Основными параметрами, ухудшающими точность, являются постоянные составляющие и неравенство амплитуд сигналов датчиков. Коррекция сигналов состоит в определении постоянной составляющей и амплитуды и изменении на основе полученных данных сигналов датчика. Для определения параметров коррекции в процесс цифровой обработки сигналов включен алгоритм поиска максимума и минимума.

Значения постоянных составляющих и амплитуд получаются из экстремумов сигналов датчика внутри одного периода по формулам

$$\begin{aligned} A_{\sin}^{calc} &= \frac{\max(U_{\sin}(\theta_k)) - \min(U_{\sin}(\theta_k))}{2}; & A_{\cos}^{calc} &= \frac{\max(U_{\cos}(\theta_k)) - \min(U_{\cos}(\theta_k))}{2}; \\ O_{\sin}^{calc} &= \frac{\max(U_{\sin}(\theta_k)) + \min(U_{\sin}(\theta_k))}{2}; & O_{\cos}^{calc} &= \frac{\max(U_{\cos}(\theta_k)) + \min(U_{\cos}(\theta_k))}{2}. \end{aligned}$$

В результате коррекции получаются следующие сигналы:

$$U_{\sin}^{cor}(\theta_k) = \frac{U_{\sin}(\theta_k) - O_{\sin}^{calc}}{A_{\sin}^{calc}} = \frac{O_{\sin} + A_{\sin} \sin(\theta_k) + U_{d \sin}(\theta_k) + N_{\sin k} - O_{\sin}^{calc}}{A_{\sin}^{calc}};$$

$$U_{\cos}^{cor}(\theta_k) = \frac{U_{\cos}(\theta_k) - O_{\cos}^{calc}}{A_{\cos}^{calc}} = \frac{O_{\cos} + A_{\cos} \cos(\theta_k) + U_{d \cos}(\theta_k) + N_{\cos k} - O_{\cos}^{calc}}{A_{\cos}^{calc}}.$$
(3)

Недостатком метода является невозможность устранить ошибку вычисления положения, вызванную нелинейными возмущениями и шумами.

### Реализация

На рис. 3 представлено размещение первичных преобразователей ДП в якоре планарного двигателя. ПП Y устанавливается в центре масс якоря, совпадающем с его геометрическим центром. ПП X1 и X2 устанавливаются симметрично относительно центра масс. Интерполятор выполнен в виде отдельного устройства на базе 12-разрядного АЦП и ЦСП TMS320F2812.

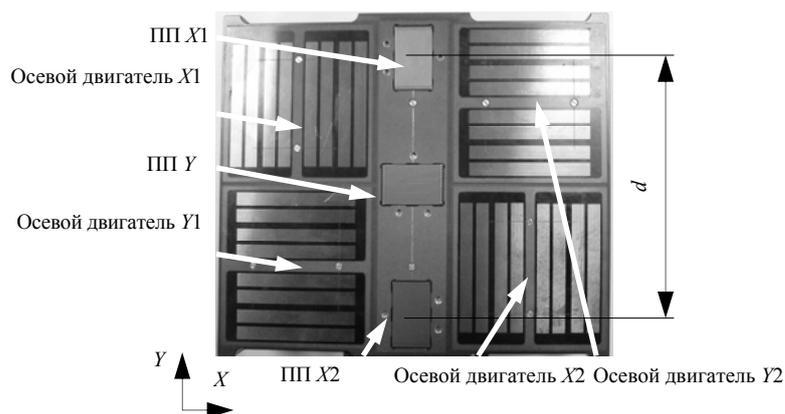


Рис. 3. Размещение первичных преобразователей в якоре планарного двигателя

Линейные координаты и угол разворота вычисляются как

$$X_k = (x_{kX1} + x_{kX2})/2, Y_k = y_k, \varphi_k = \arctan(x_{kX1} - x_{kX2})/d,$$

где  $x_{kX1}$  – положение ПП X1;  $x_{kX2}$  – положение ПП X2;  $y_k$  – положение ПП Y;  $d$  – расстояние между центрами ПП X1 и X2.

### Результаты

Разрешение датчика определялось как среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  шумовой составляющей вычисленного положения. Лазерный интерферометр SP 2000-TR фирмы SIOS был использован для проверки неподвижности якоря (рис. 4).

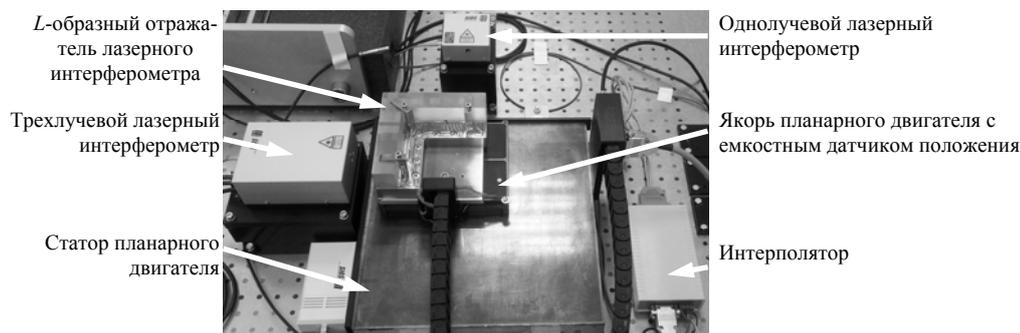


Рис. 4. Аттестационный стенд

Сигналы датчика были записаны с частотой опроса 18300 Гц при неподвижном якоре (рис. 5). Положение было вычислено с использованием арктангенсного преобразования (2). Разрешение каждого датчика было рассчитано по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_s - 1} \cdot \sum_{k=1}^{n_s} (x_k - \bar{x})^2}, \bar{x} = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_{k=0}^{n_s} x_k,$$

где  $k$  – номер выборки;  $n_s = 4000$  – число выборок.

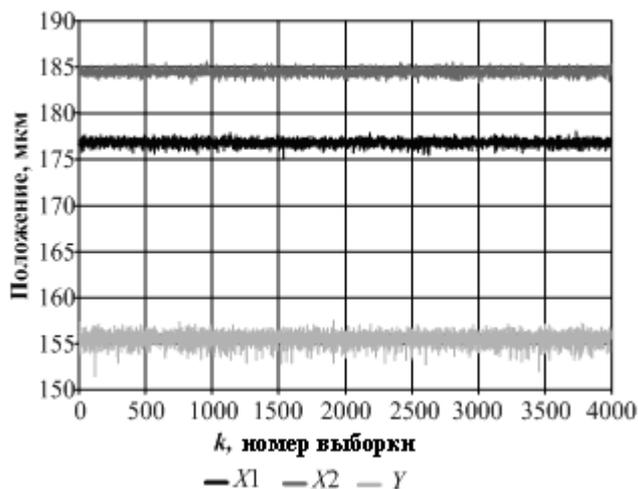


Рис. 5. Сигналы датчика при неподвижном якоре

Для проверки инвариантности шума к положению данный опыт был проделан в 8 точках, отстоящих друг от друга на 80 мкм по осям  $X$  и  $Y$ . Опыты подтвердили инвариантность шума к положению якоря. В результате разрешение датчиков  $X1$  и  $X2$  составило 0,35 мкм, датчика  $Y$  – 0,68 мкм.

Разрешение по вычислению разворота определяется из показаний  $X1$  и  $X2$ :

$$\sigma_{\varphi} = \arctan\left(\frac{\max(\sigma_{X1}, \sigma_{X2})}{d}\right) = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ радиан } (0,0018^\circ).$$

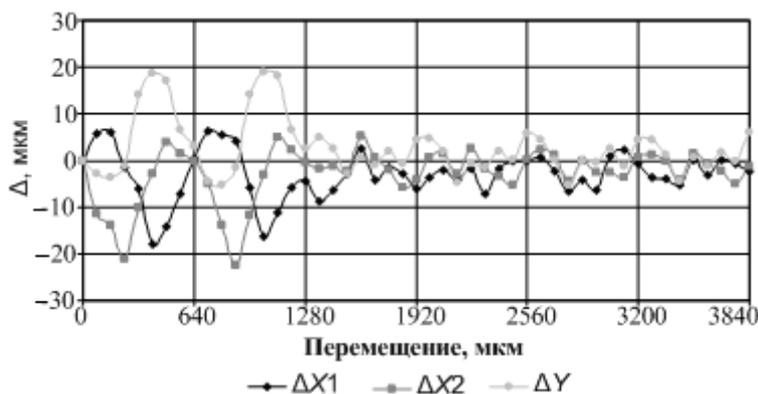


Рис. 6. Позиционная ошибка емкостного ДП без коррекции (0–1280 мкм) и после коррекции (1280–3840 мкм)

Для определения статической точности ДП был также использован лазерный интерферометр. Якорь перемещался с заданным шагом 80 мкм одновременно по осям  $X$  и  $Y$ , сигналы ДП и показания интерферометра записывались после перемещения в моменты полной остановки якоря. Погрешность  $\Delta$  вычислялась как разность между положением, вычисленным через арктангенсное преобразование сигналов датчика (2), и показаниями интерферометра. На рис. 6 представлена позиционная ошибка емкостного ДП. Первые два периода (0–1280 мкм) сигналы ДП не были подвергнуты коррекции. Следующие четыре периода (1280–3840 мкм) сигналы датчика были скорректированы по (3), что позволило уменьшить погрешность в 3 раза.

### Заключение

В работе представлен емкостный датчик планарного электропривода. Датчик положения обеспечивает измерение положения центра масс якоря планарного линейного шагового двигателя в трех координатах ( $X$ ,  $Y$ ,  $\varphi$ ). Экспериментально получено разрешение датчика положения: по оси  $X$  – 0,35 мкм, по оси  $Y$  – 0,68 мкм, по оси  $\varphi$  – 0,0018°. Основное влияние на погрешность датчика положения оказывают постоянные составляющие сигналов, дефекты зубцов статора и шумы. Коррекция сигналов датчика положения увеличивает его точность в 3 раза, статическая погрешность с коррекцией составляет 10 мкм.

Для увеличения точности емкостного датчика положения в дальнейшем предполагается объединение первичных преобразователей и интерполятора, а также интеграция датчика положения внутрь планарного линейного шагового двигателя.

**Литература**

1. Saweyr B.A. Linear magnetic drive system. – U.S. Patent 3,735,231, May 22, 1973.
2. Quaid E., Hollis Ralph L. 3-DOF Closed-loop control for planar linear motors // Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. – Leuven, Belgium. – May, 1998. – P. 2488–2493.
3. Butler Zack J., Rizzi Alfred A., Hollis Ralph L. Integrated Precision 3-DOF Position Sensor for Planar Linear Motors // Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. – Leuven, Belgium. – May, 1998. – P. 2652–2658.
4. Fries Gregory A., Rizzi Alfred A., Hollis Ralph L. Fluorescent Dye Based Optical Position Sensing for Planar Linear Motors // Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation. – Detroit, Michigan. – May, 1999. – P. 1614–1619.
5. Miller G.L. Capacitively incremental position measurement and motion control. – U.S. Patent 4,893,071, January 09, 1990.
6. Мухаметгалеев Т.Х. Разработка замкнутого по положению планарного дискретного электропривода. Кандидатская диссертация. – М.: МЭИ (ТУ), 1994. – 171 с.

***Балковой Александр Петрович***

– Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, balk1954@yahoo.com

***Тяпкин Михаил Геннадьевич***

– Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», аспирант, tiapkinmg@mail.ru