

УДК 681.586.772:531.14

## Интегрированный емкостный датчик положения планарного электропривода

М.Г. Тяпкин, А.П. Балковой  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”»,  
г. Москва, Российская Федерация  
E-mail: tiapkinmg@mail.ru, balk1954@yahoo.com

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Увеличение скорости, поворотной устойчивости и точности позиционирования планарного линейного шагового двигателя обеспечивается вентильным режимом осевых двигателей и замыканием электропривода по положению с помощью высокоточного датчика. Разработанный нами ранее датчик положения емкостного типа имеет ряд недостатков, влияющих на точность измерений. В связи с этим актуальным является разработка такого датчика положения, который позволил бы устранить имеющиеся недостатки и обеспечить высокую точность измерения положения.

**Материалы и методы:** Используются программные методы обработки сигналов датчика и повышения точности измерения положения трехкоординатной планарной измерительной системы.

**Результаты:** Представлены результаты разработки емкостного датчика положения, интегрированного в якорь планарного двигателя, а также экспериментальные результаты определения разрешения датчика.

**Выводы:** Применение интегрированного емкостного датчика положения обеспечивает позиционирование планарного электропривода с субмикронным разрешением.

**Ключевые слова:** планарный линейный шаговый двигатель, емкостный датчик положения.

## Integrated Capacitive Position Sensor for Planar Electric Drive

M.G. Tyapkin, A.P. Balkovoy  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation  
E-mail: tiapkinmg@mail.ru, balk1954@yahoo.com

### Abstract

**Background:** To increase speed, rotation stability and positioning accuracy of the planar linear motor (Sawyer motor) the closed-loop control and high-precision position sensor are used. The previously developed capacitive position sensor has several disadvantages that influence the accuracy measurement. Thus, it is necessary to develop the position sensor that could allow removing the disadvantages and providing the high accuracy of position measurement.

**Materials and methods:** The developing of software methods of the capacitive sensor signal processing, the developing of software methods of accuracy increasing of 3-DOF planar measurement system are considered.

**Results:** The design of capacitive position sensor integrated into the planar linear motor is presented. The experimental resolution of the sensor is represented.

**Conclusions:** The integrated planar capacitive position sensor allows the sub-micron positioning of planar electric drive.

**Key words:** planar linear pulse motor, capacitive position sensor.

**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) успешно используется в таких применениях [1].

ПЛШД использует совмещенную взаимно перпендикулярную нарезку зубцов на рабочей поверхности статора и ортогональное размещение модулей линейных шаговых двигателей на якоре, образующих пары осевых двигателей ( $X$  и  $Y$ ). 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. 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 ( $X$ ,  $Y$ ) центра масс и по углу разворота ( $\varphi$ ) якоря ПЛШД [2] с помощью датчика положения (ДП). ДП должен реализовать обратную связь по координатам  $X_1$ ,  $X_2$  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 [3] представлен разработанный нами ДП емкостного типа. Емкостный датчик имеет

высокий уровень усреднения ошибки за счет большой площади чувствительного элемента, высокое разрешение (0,7 мкм для осей X, Y и 0,0018° для оси φ), высокую повторяемость (1,3 мкм), но его точность (±10 мкм) недостаточно высока. Основными недостатками, ухудшающими точность, являются раздельное расположение первичных преобразователей X1, X2 и Y, что приводит к нарушению ортогональности и параллельности датчиков, несопадение осей измерения датчика и осей движения двигателя, влияние шумов со стороны двигателя.

Ниже предлагается разработка аппаратной и программной частей интегрированного емкостного датчика положения, способного устранить имеющиеся недостатки и обеспечить высокую точность измерения положения (±5 мкм).

**Аппаратная часть.** ДП состоит из измерительного первичного преобразователя (ПП) и интерполятора (И), преобразующего аналоговые сигналы датчика в цифровой код положения. Принцип действия датчика основан на измерении емкостей, образованных электродами датчика и заземленными зубцами статора [3].

Структурная схема интегрированного емкостного ДП представлена на рис. 1.

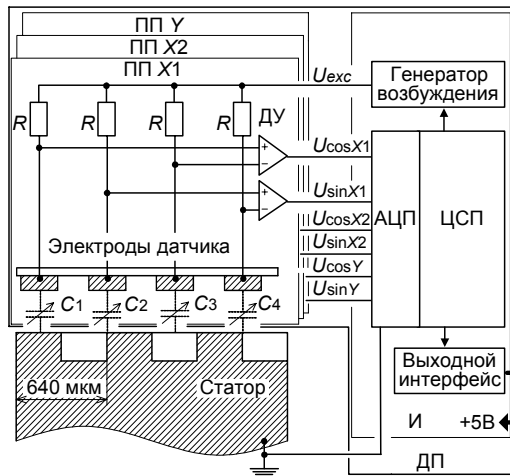


Рис. 1. Структурная схема интегрированного емкостного ДП

Датчик выполняется по синусно-косинусному принципу. Переменные емкости  $C_1...C_4$  первичных преобразователей X1, X2, Y вместе с сопротивлениями  $R$  образуют измерительные мосты, подключенные к высокочастотному генератору возбуждения. При движении якоря изменяются емкости и баланс напряжений на плечах моста так, что напряжения на выходах дифференциальных усилителей (ДУ) представляют собой пару квадратурных амплитудно-модулированных сигналов  $U_{sin}, U_{cos}$ :

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

$$U_{sin}(\theta, t) = U_{max} \sin(\theta) \sin(2\pi f_{exc}t + \psi); \quad (1)$$

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

где  $U_{exc}$  – напряжение возбуждения датчика;  $U_{max\ exc}$  – амплитуда напряжения 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 цифровой обработки сигналы передаются в блок управления планарным электроприводом в аналоговом (синус/косинус, размах 1В) виде.

Питание интерполятора +5В может осуществляться как от блока управления, так и от отдельного устройства при условии его заземления вместе со статором двигателя.

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

$$\sin(2\pi f_{exc}t_k + \psi) = 1;$$

$$U_{sin}(\theta_k, t_k) = U_{max} \sin(\theta_k) \sin(2\pi f_{exc}t_k + \psi) = U_{max} \sin(\theta_k) = U_{sin}(\theta_k); \quad (2)$$

$$U_{cos}(\theta_k, t_k) = U_{max} \cos(\theta_k) \sin(2\pi f_{exc}t_k + \psi) = U_{max} \cos(\theta_k) = U_{cos}(\theta_k).$$

Максимальная частота выборки равна частоте возбуждения и составляет 18300 Гц.

Анализ сигналов ДП показал, что детектированные сигналы отличаются от идеальных (синусно-косинусных в функции положения), что приводит к внутрипериодной погрешности. Для увеличения точности детектированные сигналы датчика подвергаются коррекции. Коррекция сигналов состоит в определении постоянных составляющих  $O_{sin}, O_{cos}$  и амплитуд  $A_{sin}, A_{cos}$  и изменении на основе полученных данных сигналов датчика. Значения постоянных составляющих и амплитуд вычисляются автоматически из экстремумов сигналов на каждом пройденном периоде:

$$\begin{aligned} A_{sin}^{calc} &= (\max(U_{sin}(\theta_k)) - \min(U_{sin}(\theta_k))) / 2; \\ A_{cos}^{calc} &= (\max(U_{cos}(\theta_k)) - \min(U_{cos}(\theta_k))) / 2; \\ O_{sin}^{calc} &= (\max(U_{sin}(\theta_k)) + \min(U_{sin}(\theta_k))) / 2; \\ O_{cos}^{calc} &= (\max(U_{cos}(\theta_k)) + \min(U_{cos}(\theta_k))) / 2. \end{aligned} \quad (3)$$

Процесс коррекции сигналов можно записать как

$$\begin{aligned} U_{sin}^{cor}(\theta_k) &= (U_{sin}(\theta_k) - O_{sin}^{calc}) / A_{sin}^{calc} \approx \sin(\theta_k); \\ U_{cos}^{cor}(\theta_k) &= (U_{cos}(\theta_k) - O_{cos}^{calc}) / A_{cos}^{calc} \approx \cos(\theta_k). \end{aligned} \quad (4)$$

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

$$x_k = \frac{\tau_m}{2\pi} \arctan\left(\frac{U_{\sin}^{cor}(\theta_k)}{U_{\cos}^{cor}(\theta_k)}\right) = \frac{\tau_m}{2\pi} \theta_k, \quad (5)$$

где  $\tau_m$  – механический период сигнала датчика, 640 мкм.

**Реализация.** На рис. 2 представлен якорь планарного двигателя с интегрированным емкостным ДП.

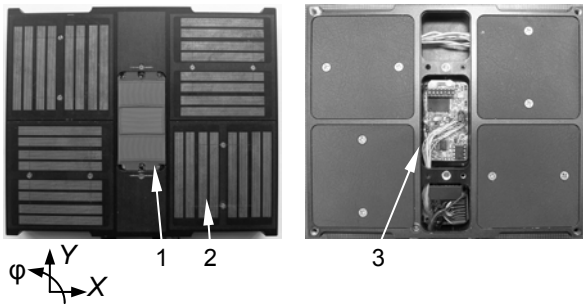


Рис. 2. Якорь планарного двигателя с интегрированным емкостным ДП: 1 – первичные преобразователи X1, X2, Y; 2 – якорь планарного двигателя; 3 – интерполятор

Для обеспечения ортогональности и параллельности ПП датчиков X1, X2, Y выполнены на одной печатной плате, установленной в центре масс якоря. ПП X1 и X2 расположены симметрично относительно центра масс. Интерполятор на базе 12-разрядного АЦП и ЦСП TMS320F2810 выполнен на печатной плате, расположенной внутри якоря над платой ПП.

Линейные координаты и угол разворота вычисляются как

$$X_k = (x_{kX1} + x_{kX2})/2; Y_k = y_k; \quad (6)$$

$$\varphi_k = \arctan(x_{kX1} - x_{kX2})/d,$$

где  $x_{kX1}$  – положение ПП X1;  $x_{kX2}$  – положение ПП X2;  $y_k$  – положение ПП Y;  $d = 36,4$  мм – расстояние между центрами ПП X1 и X2.

Исполнение ПП датчиков X1 и X2 на одной печатной плате не гарантирует их ортогональное размещение относительно осей движения ПЛШД, что приводит к несовпадению нулевых положений датчиков и развороту двигателя вокруг оси  $\varphi$  при замыкании обратной связи. Для устранения этой ошибки сигналы датчиков после коррекции дополнительно автоматически выравниваются:

$$\begin{aligned} U_{\sin}^{align}(\theta_{kX1}) &= U_{\sin}^{cor}(\theta_{kX1}) \cdot \cos(\Delta\theta) - \\ &- U_{\cos}^{cor}(\theta_{kX1}) \cdot \sin(\Delta\theta) = \sin(\theta_{kX1} - \Delta\theta); \\ U_{\cos}^{align}(\theta_{kX1}) &= U_{\cos}^{cor}(\theta_{kX1}) \cdot \cos(\Delta\theta) + \\ &+ U_{\sin}^{cor}(\theta_{kX1}) \cdot \sin(\Delta\theta) = \cos(\theta_{kX1} - \Delta\theta); \\ U_{\sin}^{align}(\theta_{kX2}) &= U_{\sin}^{cor}(\theta_{kX2}) \cdot \cos(\Delta\theta) + \\ &+ U_{\cos}^{cor}(\theta_{kX2}) \cdot \sin(\Delta\theta) = \sin(\theta_{kX2} + \Delta\theta); \\ U_{\cos}^{align}(\theta_{kX2}) &= U_{\cos}^{cor}(\theta_{kX2}) \cdot \cos(\Delta\theta) - \\ &- U_{\sin}^{cor}(\theta_{kX2}) \cdot \sin(\Delta\theta) = \cos(\theta_{kX2} + \Delta\theta); \\ \Delta\theta &= (\theta_{X1} - \theta_{X2})/2. \end{aligned} \quad (7)$$

**Результаты.** Разрешение датчика определяется как среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  шумовой составляющей вычисленного положения. Для проверки неподвижности якоря был использован лазерный интерферометр.

Сигналы датчика были записаны с частотой опроса 18300 Гц при неподвижном якоря (рис. 3). Положение было вычислено с использованием арктангенсного преобразования (5). Разрешение каждого датчика было рассчитано по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_s - 1} \cdot \sum_{k=1}^{n_s} (x_k - \bar{x})^2}; \bar{x} = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_{k=0}^{n_s} x_k, \quad (8)$$

где  $k$  – номер выборки;  $n_s = 2500$  – число выборок.

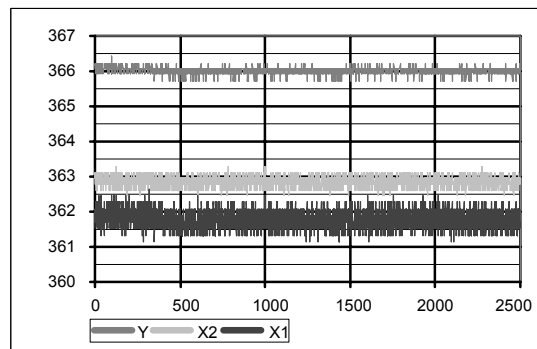


Рис. 3. Сигналы датчика при неподвижном якоря

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. По результатам экспериментов разрешение датчиков составляет 0,3 мкм. Разрешение по вычислению разворота определяется из показаний X1 и X2:

$$\sigma_{\varphi} = \arctan\left(\frac{\sigma_X}{d}\right) = 0,0005^\circ. \quad (9)$$

### Заключение

Представленный интегрированный емкостный датчик положения обеспечивает измерение положения центра масс якоря планарно-

го двигателя в трех координатах ( $X$ ,  $Y$ ,  $\varphi$ ). Экспериментально получено разрешение датчика положения по осям  $X$  и  $Y$  0,3 мкм, по оси  $\varphi$  – 0,0005°.

Реализация на одной печатной плате трех первичных преобразователей обеспечивает высокую ортогональность и параллельность датчиков  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $Y$ , а дополнительная программная коррекция (5) – совмещение осей измерения и движения.

Интегрирование цифрового интерполятора внутрь якоря двигателя улучшает уровень сигнал/шум датчика.

Определение точности и повторяемости планарного электропривода с интегрированным емкостным датчиком положения является следующим этапом исследований.

#### Список литературы

1. **Patent US** № 3735231. Linear magnetic drive system / B.A. Saweyr.

*Тяпкин Михаил Геннадьевич*,  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»»,  
аспирант кафедры автоматизированного электропривода,  
e-mail: tiapkinmg@mail.ru

*Балковой Александр Петрович*,  
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»»,  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода,  
e-mail: balk1954@yahoo.com

2. **Quaid E., Hollis Ralph L.** 3-DOF Closed-loop control for planar linear motors. Position Sensor for Planar Linear Motors // Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. – Leuven, Belgium, May 1998, pp. 2488–2493.

3. **Балковой А.П., Тяпкин М.Г.** Планарный линейный шаговый двигатель с датчиком положения // Тр. VII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу, Иваново. Октябрь, 2–4, 2012. – Иваново, 2012. – С. 365–369.

#### References

1. Saweyr, B.A. Linear magnetic drive system. Patent US, no. 3735231.

2. Quaid, E., Hollis, Ralph L. 3-DOF Closed-loop control for planar linear motors. Position Sensor for Planar Linear Motors. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven, Belgium, May 1998, pp. 2488–2493.

3. Balkovoy, A.P., Tiapkin, M.G. Planarnyy lineynyy shagovyy dvigatel' s datchikom polozheniya [Planar linear stepper motor with position sensor]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the VII International Conference on the Automatic Electric Drive]. Ivanovo, 2012, pp. 365–369.