

УДК 621.313.13-133.32

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТКИ ДИСКРЕТНОСТИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ЛИНЕЙНОМ ШАГОВОМ ПРИВОДЕ

И.В. ДАЙНЯК, С.Е. КАРПОВИЧ, В.П. ОГЕР, А.В. БЕЗЛЮДОВ, Д.С. ТИТКО

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

*Поступила в редакцию 12 февраля 2014*

Представлена математическая модель формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения для различных вариантов конфигурации зубцовых поверхностей полюсов индуктора и статора линейного шагового двигателя. На основании математической модели разработана методика формирования координатной сетки дискретности, которая учитывает различные факторы, влияющие на погрешность положения узлов сетки дискретности. Показаны результаты верификации разработанной математической модели, подтверждающие повышение точности систем перемещений на базе линейных шаговых двигателей.

*Ключевые слова:* сетка дискретности, линейный шаговый двигатель, прецизионная система перемещений, математическая модель.

### Введение

Современные тенденции совершенствования технологического оборудования для микроэлектроники требуют большей точности позиционирования инструмента и объекта обработки, более высокого разрешения и быстродействия при выполнении технологических операций. Особенно в связи с быстрым уменьшением топологической нормы производства ИС в последнее время характеристика точности позиционирования является определяющей, достижение требуемого уровня которой в оборудовании может осуществляться или путем калибровки системы перемещений на сетке дискретности высокого разрешения, или путем введения в систему управления дополнительной системы измерения координат, построенной на датчиках обратных связей по положению, их обработки контроллерными платами более высокого уровня, чем в системах без обратных связей, с более сложным программным обеспечением.

Проведенный ранее анализ методов и средств повышения точности показал, что удовлетворение требований по точности перспективного сборочного оборудования может быть достигнуто без существенного удорожания комплектного привода только за счет программного формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения посредством определения соответствующих оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз исполнительного линейного шагового двигателя [1]. Для этого необходима адекватная математическая модель формирования сетки дискретности высокого разрешения для прецизионных систем перемещений, разработке которой и посвящена настоящая статья.

### Математическая модель формирования сетки дискретности

В статье рассматривается наиболее распространенная в технологическом оборудовании микроэлектроники система перемещений на линейных шаговых двигателях (ЛШД). На основании предложенной схемы циркуляции магнитных потоков [2] магнитодвижущей силы (МДС) фаз линейного шагового двигателя (рис. 1) были получены варианты конфигурации

зубцовых поверхностей полюсов индуктора, анализ которых показал, что сопротивление магнитному потоку постоянной МДС, проходящему через электромагнитный фазовый модуль (ЭФМ), носит переменный характер и при движении приводит к модуляции величины магнитного потока.

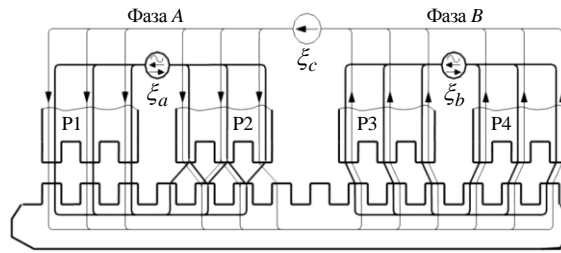


Рис. 1. Схема циркуляции магнитных потоков МДС в электромагнитном фазовом модуле:  
 $\xi_c$  – постоянная МДС;  $\xi_a, \xi_b$  – фазовые МДС фаз А, В; P1, P2, P3, P4 – полюсы фаз

Следствием этого является тот факт, что при разной величине магнитных потоков постоянной МДС, проходящих через полюсы ЭФМ, различаются и тяговые силы, приложенные к полюсам фаз, что вызывает неравенство микрошаговых перемещений внутри периода зубцовой поверхности. При электронном дроблении полного шага перемещения результирующее тяговое усилие формируется фазовыми МДС электромагнитных фазовых модулей. Тяговые усилия каждой из фазовых МДС направлены противоположно друг другу. Точки позиционирования ЭФМ соответствуют узлам координатной сетки дискретности, координаты которых определяются соотношением величин взаимодействующих фазовых МДС, причем изменение соотношения величин фазовых МДС приводит к перемещению ЭФМ в другой узел координатной сетки.

Координаты узлов сетки дискретности координатной системы при использовании в ЛШД двухфазного ЭФМ с постоянной МДС, расположенной между фазами (рис. 1), определяются из условия равенства нулю результирующей тяговой силы по выражению

$$\begin{aligned} & |A + E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_1\tau)}{\tau} + |B - E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_2\tau)}{\tau} + \\ & + |B - E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_3\tau)}{\tau} + |A + E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_4\tau)}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  – номинальное значение тяговой силы полюсов P1, P4;  $B$  – номинальное значение тяговой силы полюсов P2, P3;  $E_a, E_b$  – периодические функции тяговой силы, развиваемой фазовыми МДС на полюсах фаз А и В;  $E_a = E \cos \alpha, E_a = -E \sin \alpha$ , где  $E$  – амплитудное значение тяговой силы, развиваемой фазовой МДС на полюсах ЭФМ,  $\alpha$  – аргумент функции тяговой силы, определяющий уровни квантования управляющих токов фаз, изменяется дискретно в диапазоне  $[0; 2\pi]$ ;  $x$  – величина перемещения от начала периода зубцовой поверхности статора;  $S_1 \dots S_4$  – коэффициент относительного смещения зубцов полюсов ЛШД внутри периода зубцовой поверхности,  $S_i$  принимает значения 0; 0,25; 0,5; 0,75;  $\tau$  – период зубцовой поверхности.

На основании выражения (1) разработаны модели и алгоритмы формирования сетки дискретности для трехфазного и четырехфазного ЭФМ. Так, для четырехфазного ЭФМ математическая модель для расчета координат узлов сетки дискретности имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & |A + E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_1\tau)}{\tau} + |B - E_a| \sin \frac{2\pi(x + S_2\tau)}{\tau} + |B - E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_3\tau)}{\tau} + \\ & + |A + E_b| \sin \frac{2\pi(x + S_4\tau)}{\tau} + |A + E_c| \sin \frac{2\pi(x + S_5\tau)}{\tau} + |B - E_c| \sin \frac{2\pi(x + S_6\tau)}{\tau} + \\ & + |B - E_d| \sin \frac{2\pi(x + S_7\tau)}{\tau} + |A + E_d| \sin \frac{2\pi(x + S_8\tau)}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_a, E_b, E_c, E_d$  – периодические функции тяговой силы фазовых МДС на полюсах фаз;  $E_a = E \cos \alpha, E_a = -E \sin \alpha, E_c = -E \sin(\alpha - \pi/4), E_d = -E \cos(\alpha - \pi/4)$ ;  $S_1 \dots S_8$  – коэффициент

относительного смещения зубцов полюсов ЛШД внутри периода зубцовой поверхности,  $S$ ; принимает значения 0; 0,5; 0,75; 0,25; 0,125; 0,625; 0,875; 0,375.

### Методика формирования координатной сетки дискретности

На основании предложенной математической модели авторами разработана прикладная методика формирования координатной сетки дискретности, которая учитывает различные факторы, влияющие на погрешность положения узлов сетки дискретности. Наиболее значимыми из них являются следующие:

– соотношение величин значений тяговых сил  $A$ ,  $B$  и  $E$ , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ;

– соотношение номинальных смещений координат зубцов зубцовой поверхности полюсов ЭФМ на периоде зубцовой поверхности статора, которое может нарушить изотропность магнитных характеристик системы периодических зубцовых поверхностей статора и полюсов ЭФМ и привести к отклонению координат узлов сетки от номинальных значений;

– анизотропия магнитных свойств статора, которая приводит к колебаниям величин магнитных сопротивлений, замыкающих магнитный поток между полюсами ЭФМ, и изменению величин тяговых сил  $A$ ,  $B$ ,  $E_a$ ,  $E_b$ , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ.

Кроме того, в предложенной методике на последующей стадии верификации учитывается, что распределение тяговых сил полюсов ЭФМ отклоняется от синусоидального в силу неодинаковости величины периода зубцовой поверхности, неодинаковости магнитного сопротивления полюсов и областей статора, изменения размеров ЭФМ вследствие теплового дрейфа, тангажа и рыскания индуктора при перемещении по статору, магнитного гистерезиса материалов ЭФМ и статора. Вследствие отклонения формы тягового усилия от синусоидальной дробление периода на полном шаге перемещения будет неравномерным. Проведенные исследования погрешности дробления периода перемещения на реальном двигателе показали, что ее значение неодинаково в пределах одного периода перемещения и не повторяется на разных периодах перемещения. Дискретность координатной сетки определяется величиной дискретности изменения аргумента  $\alpha$  функций тяговых сил фазовых МДС в выражениях (1) и (2), поэтому уменьшение дискретности изменения аргумента  $\alpha$  приводит к уменьшению дискретности формируемой координатной сетки.

Так как рабочим режимом ЛШД является условие  $|E_a|, |E_b| \leq |A|$ , то в выражении (1) знак модуля можно заменить скобками и после преобразований получить окончательное выражение для определения координат узлов сетки дискретности двухфазного ЭФМ с постоянной МДС, расположенной между фазами, в виде

$$(A - B + 2E_a) \sin \frac{2\pi x}{\tau} - (B - A - 2E_b) \cos \frac{2\pi x}{\tau} = 0. \quad (3)$$

Произведенные по выражению (3) расчеты показали, что при  $A = 0,85 B$  и выше полоса колебания шага сетки дискретности координатной системы не превосходит  $0,006\tau$ . Это соответствует погрешности положения узла сетки дискретности координатной системы  $\pm 1,92$  мкм при  $\tau = 640$  мкм. Эта особенность присуща конструкциям ЭФМ с промежуточным расположением постоянной МДС и циклически повторяется на каждом периоде перемещения.

Разработанная методика формирования координатной сетки дискретности высокого разрешения содержит следующие стадии.

1. Формирование равномерной сетки дискретности отдельного периода перемещения с использованием переменной дискретности аргумента управляющего воздействия  $\alpha$  посредством определения базового набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз ЛШД, минимизирующих величину отклонения координат узлов сетки дискретности от номинальных.

2. Коррекция закона изменения дискретности аргумента управляющего воздействия  $\alpha$  для каждого отдельного периода перемещений по контрольным точкам, координаты которых измерены предварительно.

3. Статическая стыковка сеток координат смежных периодов перемещения путем коррекции координат узлов сетки дискретности текущего периода перемещения; поправка осуществляется на величину индивидуальной погрешности координаты начала текущего периода.

4. Динамическая стыковка сеток координат смежных периодов перемещения в процессе функционирования координатной системы путем коррекции координат узлов сетки дискретности текущего периода перемещения; поправка выполняется на величину температурного дрейфа размеров координатной системы.

### Верификация математической модели

Верификация математической модели проводилась на серийных координатных системах планарного типа, производимых ГНПО «Планар», с периодом зубцовой поверхности индуктора и статора, равным  $\tau = 1,0$  мм, путем исследования точности позиционирования по всему рабочему полю статора. В системах управления приводах использовались программные файлы коррекции перемещений, разработанные на основе представленных выше математической модели и методики формирования координат узлов сетки дискретности высокого разрешения. Экспериментальные исследования точности позиционирования выполнялись на специально созданной станции контроля точностных параметров координатных систем [3], в которой система измерений координат выполнена на основе лазерного измерителя Dynamic Calibrator HP 5529A фирмы Hewlett Packard, позволяющую измерять координату с дискретностью 0,0001 мкм.

Верификация производилась в несколько стадий: технологический прогон, базовая коррекция сетки дискретности одного периода перемещений, коррекция накопленной погрешности, минимизация погрешности координат в пределах периода перемещения. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований была осуществлена верификация разработанной методики формирования набора оптимальных уровней квантования управляющих токов фаз, по которой разработано программное обеспечение автоматизированной станции контроля точностных параметров линейного шагового привода (ЛШП), используемое в настоящее время для формирования файлов коррекции сетки дискретности координатных систем прецизионного оборудования.

На рис. 2, а представлен график экспериментально измеренной погрешности позиционирования координатной системы без использования файлов коррекции координат узлов сетки дискретности в системе управления. В этом случае поле колебаний погрешности лежит в пределах  $-30 \dots +40$  мкм. На рис. 2, б представлен график погрешности для той же системы, но с управлением на основе использования файла коррекции. В этом случае поле колебаний погрешности позиционирования уменьшилось по сравнению с предыдущим случаем приблизительно в 10 раз и находится в пределах  $-3,5 \dots +4,5$  мкм.

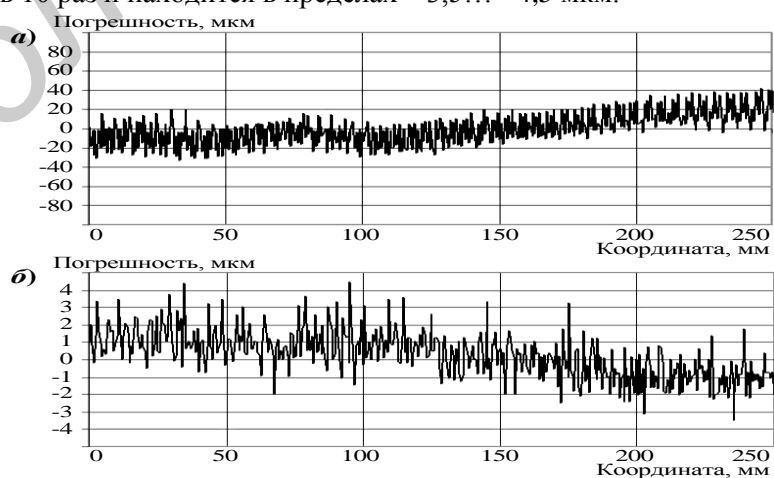


Рис. 2. Графики погрешности позиционирования ЛШД с периодом зубцовой поверхности  $\tau = 0,508$  мм: а – без использования файлов коррекции; б – с использованием файлов коррекции (график приведен в увеличенном масштабе)

Проведенные экспериментальные исследования и верификация алгоритмов управления на других системах перемещений однокоординатного и двухкоординатного исполнений, производимых на ГНПО «Планар», показали, что использование программных файлов коррекции позволяет увеличить точность позиционирования до 10 раз, номинальную скорость перемещения в 2,0...2,5 раза и ускорение в 1,8...1,9 раза.

### Заключение

На основании предложенной математической модели и проведенных экспериментальных исследований были проанализированы основные факторы, влияющие на уровень разрешения формируемой сетки дискретности. Установлено, что наибольшее влияние имеют следующие из них:

– соотношение величин значений тяговых сил  $A$ ,  $B$  и  $E$ , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ;

– соотношение номинальных смещений координат зубцов зубцовой поверхности полюсов ЭФМ на периоде зубцовой поверхности статора, которое может нарушить изотропность магнитных характеристик системы периодических зубцовых поверхностей статора и полюсов ЭФМ и привести к отклонению координат узлов сетки от номинальных значений;

– анизотропия магнитных свойств статора, которая приводит к колебаниям величин магнитных сопротивлений, замыкающих магнитный поток между полюсами ЭФМ, и изменению величин тяговых сил  $A$ ,  $B$ ,  $E_a$ ,  $E_b$ , развиваемых постоянной и фазовыми МДС на полюсах ЭФМ.

## MATHEMATICAL MODEL OF THE FORMING OF HIGH RESOLUTION DISCRETE GRID FOR MOTION SYSTEM BASED ON LINEAR STEPPING DRIVE

I.V. DAINIAK, S.E. KARPOVICH, V.P. OGER, A.V. BEZLYUDOV, D.S. TITKO

### Abstract

The mathematical model of the forming of high resolution discrete grid for various configurations of toothing surface of poles of stator and inductor of linear stepping motor. The method of the forming of discrete grid was developed on the base of mathematical model; it takes into account various factors which affect to the accuracy of position of discrete grid nodes. The verification results of mathematical model developed were shown, they confirm the increasing of accuracy of motion systems on the base of linear stepping motors.

### Список литературы

1. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Программируемые движения в прецизионных системах перемещений. Минск, 2008.
2. Огер В.П., Безлюдов А.В. // Инж. вестник. 2006. № 1 (21)/5. С. 70–75.
3. Огер В.П. // Изв. Белор. инж. акад. 2001. № 1(11)/3. С. 167–168.