



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 621.313.13-133.32

С.Е. КАРПОВИЧ, д-р техн. наук; В.П. ОГЕР, канд. техн. наук;
И.В. ДАЙНЯК, канд. техн. наук; А.В. БЕЗЛЮДОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

РЕДУКЦИЯ ШАГА СЕТКИ ДИСКРЕТНОСТИ В СИСТЕМАХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ЛИНЕЙНЫХ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Представлен способ и алгоритм повышения точности систем перемещений за счет редукции шага сетки дискретности, основанный на разработанной математической модели циркуляции магнитных потоков в рабочем зазоре линейного шагового двигателя. Приведено схемное решение, выполнена оптимизация уровней квантования управляющего воздействия с коррекцией расположения узлов координатной сетки дискретности, которые существенно уменьшают величину отклонений узлов этой сетки от номинальных значений. Показаны результаты экспериментальных исследований однокоординатного линейного шагового двигателя, подтверждающие эффективность разработанного способа и алгоритма повышения точности систем перемещений.

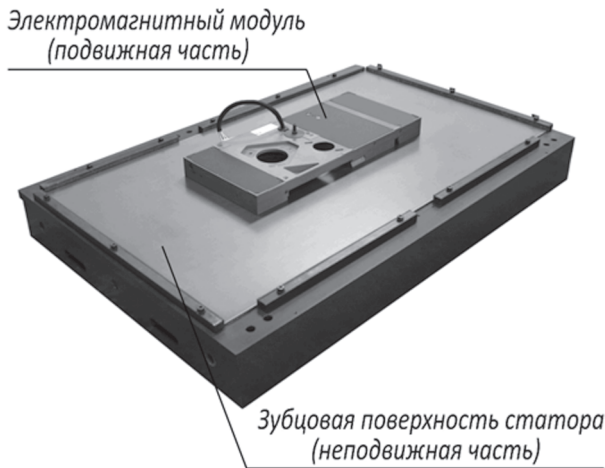
Ключевые слова: сетка дискретности, линейный шаговый двигатель, прецизионная система перемещений

Введение. Рост степени интеграции интегральных схем за счет уменьшения топологической нормы, а также увеличение размеров кремниевых пластин предъявляют более высокие требования к таким показателям назначения технологического оборудования микроэлектроники, как точность и производительность. При этом для сохранения конкурентоспособности желательно, чтобы производитель ИС имел возможность максимально долго использовать существующее оборудование, совершенствуя только его аппаратно-программное обеспечение [1, 2]. В связи с тем, что у большинства видов сборочного оборудования, включая установки зондового контроля, разделения пластин на кристаллы, присоединения проволочных выводов, герметизации в корпус и др., используются системы перемещений [1, 3], конфигурируемые из линейных шаговых двигателей (ЛШД) с системой управления без обратных связей. Наиболее современным автономным модулем однокоординатного движения является система перемещений, построенная на синхронных линейных шаговых двигателях с магнитной системой периодической магнитной проводимости и периодической магнитной полярности. На рисунке 1 представлены базовые типы таких систем перемещений, выпускаемых на предприятиях ГНПО «Планар» и предприятии «Рухсервомотор» (Беларусь), для которых проблема повышения точности и быстродействия

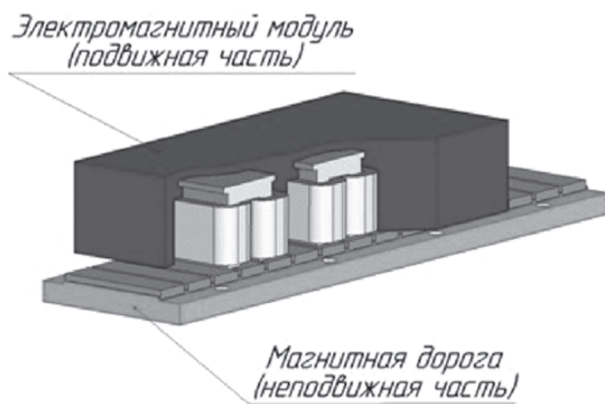
необходимо решать путем совершенствования алгоритмов управления формированием требуемых механических движений. Анализ известных подходов и алгоритмов формирования прецизионных программируемых движений системами перемещений ЛШД показал, что высокие показатели точности и быстродействия обеспечиваются, как правило, только учетом обратных связей по положению [4–6] или программной коррекцией годографа токовых состояний [7, 8] фаз электромагнитных модулей электромеханического преобразователя.

Представленный в статье способ и алгоритм повышения точности за счет редукции шага сетки дискретности, основанный на разработанной математической модели циркуляции магнитных потоков в рабочем зазоре и установленных закономерностях расположения узлов сетки дискретности в пределах периода зубцовой структуры с учетом возможностей аппаратно-программной реализации квантования амплитуды управляющего воздействия, являются новыми и имеют важное значение для повышения точности позиционирования и контурных перемещений координатных систем без обратных связей.

Математическая модель формирования сетки дискретности. Предложенный способ повышения точности за счет редукции шага виртуальной сетки дискретности построен на разработанной математической модели и результатах исследований цир-



а



б

Рисунок 1 — Типы синхронных линейных шаговых двигателей: а — ЛШД с магнитной системой периодической магнитной проводимости; б — ЛШД с магнитной системой периодической магнитной полярности

куляции магнитных потоков между полюсами электромагнитных модулей и зубцовой структурой статора. В его основе лежит анализ закономерностей формирования узлов сетки дискретности на основе схемы циркуляции магнитных потоков магнитодвижущей силы (МДС) фаз базового модуля линейного шагового двигателя, представленной на рисунке 2.

С точки зрения механики рассматриваемая подвижная система является одномассовой, на которую действует дискретно распределенная тяговая сила, возникающая в электромагнитном преобразователе в соответствии со схемой циркуляции магнитных потоков в магнитопроводе (см. рисунок 2). Результирующая тяговая сила представляет собой тангенциальную составляющую суммы всех сил, действующих на подвижную часть механической системы. При этом сила притяжения индуктора к статору скомпенсирована воздушной опорой, поэтому тяговая сила может быть вычислена как сумма проекций сил, формируемых магнитными потоками. В результате действия переменной силы тяги, которая зависит от токов возбуждения и характера намагничивания полюсов, подвижная часть механической

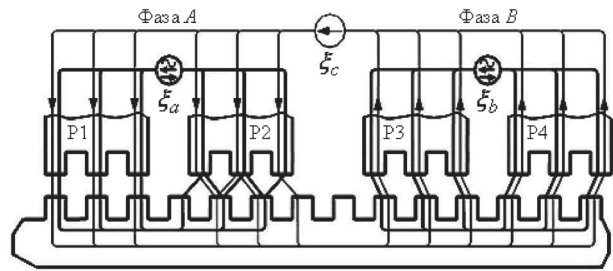


Рисунок 2 — Схема циркуляции магнитных потоков МДС в электромагнитном фазовом модуле: ξ_c — постоянная МДС; ξ_a, ξ_b — фазовые МДС фаз А и В; P1, P2, P3, P4 — полюсы фаз

системы перемещается в ближайшую точку устойчивого равновесного состояния, называемую в работе узлом сетки дискретности.

Как известно [6], сопротивление магнитному потоку постоянной МДС, проходящему через электромагнитный фазовый модуль (ЭФМ), носит переменный характер и при движении приводит к модуляции величины магнитного потока. Вследствие этого при разной величине магнитных потоков постоянной МДС, проходящих через полюсы ЭФМ, будут различными тяговые силы, приложенные к полюсам фаз, что вызывает неравенство микрошаговых перемещений внутри периода зубцовой структуры. При электронном дроблении полного шага результирующее тяговое усилие формируется фазовыми МДС электромагнитных фазовых модулей. В этом случае 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, определяются из условия равенства нулю результирующей тяговой силы по выражению [9]:

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

где A — номинальное значение тяговой силы полюсов P1 и P4; B — номинальное значение тяговой силы полюсов P2 и P3; E_a, E_b — периодические функции тяговой силы, развиваемой фазовыми МДС на полюсах фаз А и В; x — величина перемещения от начала периода в зубцовой поверхности статора; $S_1 \dots S_4$ — коэффициент относительного смещения зубцов полюсов ЛШД внутри периода зубцовой поверхности, каждый S_i принимает значения из набора 0; 0,25; 0,5; 0,75; τ — период зубцовой поверхности. При этом:

$$E_a = E \cos \alpha, E_b = -E \sin \alpha,$$

где E — амплитудное значение тяговой силы, развиваемой фазовой МДС на полюсах ЭФМ; α — ар-

гумент функции тяговой силы, определяющий уровни квантования управляющих токов фаз и изменяющийся дискретно в диапазоне $[0; 2\pi]$.

Подставляя значения коэффициентов относительных смещений для выбранной конфигурации $S_1 = 0; S_2 = 0,5; S_3 = 0,75; S_4 = 0,25$ в (1), получим параметрическое условие для формирования координатной сетки дискретности в виде:

$$|A + E \cos \alpha| \sin \frac{2\pi x}{\tau} - |B - E \cos \alpha| \sin \frac{2\pi x}{\tau} + |B + E \sin \alpha| \cos \frac{2\pi x}{\tau} + |A - E \sin \alpha| \cos \frac{2\pi x}{\tau} = 0. \quad (2)$$

Из условия (2) следует, что дискретность формируемой координатной сетки определяется дискретностью изменения аргумента α , входящего в тригонометрические функции.

Алгоритм увеличения редукции шага дискретности. Для увеличения редукции шага сетки дискретности в алгоритм расчета уровней управляющего воздействия была дополнительно включена возможность изменения амплитуды управляющего воздействия при сохранении закона его изменения. Это дает возможность увеличивать число уровней управляющего воздействия и выполнять их оптимальный подбор, что, в конечном итоге, приводит к наилучшему приближению координат узлов сетки дискретности к номинальным.

В основе алгоритма заложено схемное решение, которое базируется на включении цифроаналогового преобразователя (ЦАП) в режиме аналогового умножения (рисунок 3).

Рассмотрим подробно реализованный нами вариант повышения дробления на основе двух восьмиразрядных ЦАП. Первый ЦАП (DA1) должен быть включен в однополярном режиме (допустимые коды $M = 0 \dots + 127$), второй ЦАП (DA2) должен быть включен в биполярном режиме (допустимые коды $N = -127 \dots + 127$). Для простоты будем использовать входное опорное напряжение $U_0 = 1$ В, при любом другом опорном напряжении масштабируемость сохранится. При этом выходное напряжение U_a при любых комбинациях кодов M и N будет в диапазоне $-1 \dots + 1$ В. Такие исходные условия были выбраны специально, поскольку функция синус имеет тот же диапазон изменения.

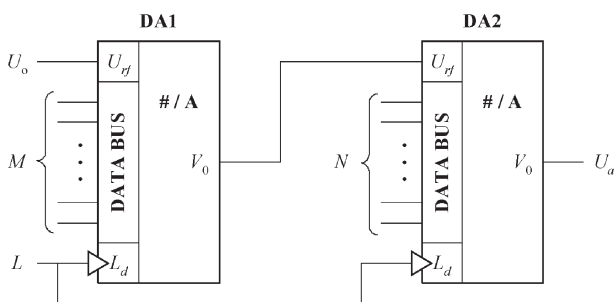


Рисунок 3 — Упрощенная схема включения ЦАП для задания токов в одной фазе ЛШД

Исходя из заданных условий, очевидно, что количество вариантов напряжения U_0 на выходе ЦАП DA2 без учета знака составит не более $M \times N$ вариантов. Это число и определяет максимально возможное число дроблений на периоде. Однако, из практических соображений, лучше подбирать число дроблений кратным 4 или даже 8, так как это упрощает программирование перемещения по полным шагам, равным $\frac{1}{4}\tau$. С учетом точности измерительной системы на основе калибратора HP-5529A фирмы Hewlett Packard с установкой дискретности измерения 10 нм, нами было выбрано число дроблений, равное $2^5 = 32$, соответствующее 1 мкм периода зубцовой структуры.

Редукция шага сетки дискретности для линейного шагового двигателя. Для расчета последовательных вариантов пар кодов $[M, N]$, при которых напряжение U_0 наиболее близко к функции синус, необходимо выполнить следующие действия.

1. Исходя из требуемой точности, задается полное количество дроблений, обозначаемое ddr . Сетка дискретности нами рассчитывалась для координатных осей на ЛШД с периодом зубцовой структуры $\tau = 480$ мкм. С учетом достижения предельной точности расчетное значение ddr составит $480 \cdot 32 = 15\,360$. Соответствующий шаг сетки дискретности в таком случае составит $\frac{\tau}{ddr} = \frac{480}{15360} = 0,03125$ мкм, или 31,25 нм.

2. Рассчитывается множество значений $U_k = \sin\left(\frac{2\pi k}{ddr}\right)$, где $k = 0, 1, 2, \dots, 15\,359$ — номер шага дробления; $ddr = 15\,360$ — заданное количество дроблений. Все рассчитанные значения сводятся в таблицу 1.

3. Рассчитывается множество значений $U_{mn} = \frac{M \cdot N}{15\,359}$, где M и N — коды цифроаналоговых преобразователей DA1 и DA2 соответственно. Все рассчитанные значения сводятся в таблицу 2.

4. Осуществляется выборка ddr значений из Q вариантов U_{mn} (см. таблицу 2) по следующему критерию:

Таблица 1 — Выходное напряжение

k	U_k
0	U_0
1	U_1
2	U_2
...	...
15 358	$U_{15\,358}$
15 359	$U_{15\,359}$

Таблица 2 — Комбинации выходного напряжения U_a при различных значениях кодов ЦАП

Q	M	N	U_{mn}
0	0	-127	U_{mn0}
1	0	-126	U_{mn1}
...
...	0	+126	...
...	0	+127	...
...	1	-127	...
...
...	1	+127	...
...
...	126	-127	...
...
...	126	+127	...
...	127	-127	...
...
...	127	+127	...

$$U_r = \min |U_k - U_{mn}|. \quad (3)$$

Для каждого значения U_k из таблицы 1 в формулу (3) поочередно подставляются все значения U_{mn} из таблицы 2. Т. е., фактически из всего множества полученных значений U_{mn} таблицы 2 выбирается то, которое минимально отличается от U_k . Кроме того, необходимо сохранить те значения M' и N' , которые обеспечили этот критерий для каждого U_k .

В результате получаем массив напряжений, показанный в таблице 3.

Пары значений кодов M' и N' (см. две последние колонки в таблице 3) являются искомыми управляющими кодами для цифроаналоговых преобразователей DA1 и DA2 соответственно, обеспечивающими заданное число дроблений ddr (15 360) на

Таблица 3 — Выходное напряжение

k	U_k	U_r	M'	N'
0	U_0	min	M'_0	N'_0
1	U_1	min	M'_1	N'_1
2	U_2	min	M'_2	N'_2
...
15 358	$U_{15\ 358}$	min	$M'_{15\ 358}$	$N'_{15\ 358}$
15 359	$U_{15\ 359}$	min	$M'_{15\ 359}$	$N'_{15\ 359}$

периоде, которые максимально приближены к функции синус по аргументу k .

Следует отметить, что изменение исходного опорного напряжения U_0 не приведет к изменению рассчитанных кодов M' и N' , т. к. этот параметр определяет только «аналоговый масштаб» выходного напряжения, т. е. величина U_0 должна входить в допустимый диапазон рабочих напряжений микросхем DA1 и DA2, используемых для задания токов в фазах ЛШД.

Для получения таблицы параметров M' и N' , рассчитанных для функции косинус (фаза ВЛШД), достаточно сместить полученные значения M' и N' на $\frac{ddr}{4}$ строк, что соответствует $\frac{\pi}{2}$.

Предложенный способ и алгоритм редукции, разработанный на его основе, были использованы в системе управления однокоординатного ЛШД. График отклонений $\Delta(x)$ координатных узлов сетки дискретности от номинальных значений при реализации базового алгоритма управления без редукции показан на рисунке 4.

В результате реализации алгоритма редукции с числом уровней квантования 15 360, соответствующих шагу сетки дискретности, равному 31,25 нм, было получено распределение величин отклонений координат узлов сетки дискретности от номинальных значений, показанное на рисунке 5.

Из приведенных графиков видно, что выполненная оптимизация уровней квантования по предложенному способу и алгоритму редукции с коррекцией расположения узлов координатной сетки дискретности существенно уменьшает величину отклонений узлов этой сетки от номинальных значений. В рассматриваемом в статье случае, как видно из рисунка 4 и рисунка 5, в исходной координатной сетке (до редукции)

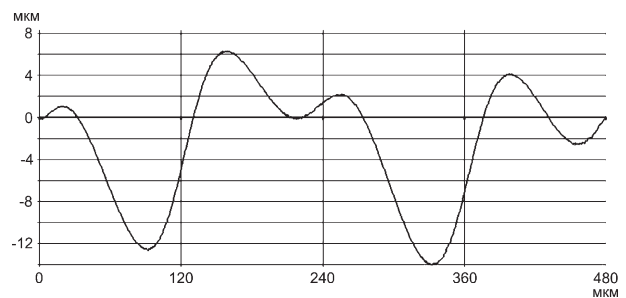


Рисунок 4 — Исходный график отклонений координатных узлов сетки дискретности от номинальных значений

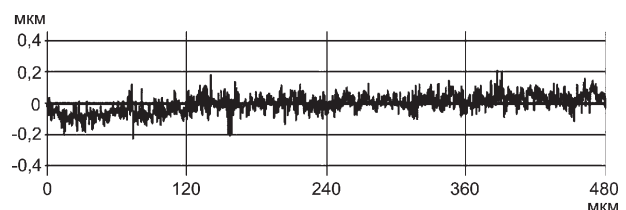


Рисунок 5 — График отклонений координатных узлов сетки дискретности от номинальных значений после применения алгоритма редукции

величина отклонений координатной линии от номинального значения на перемещении, равном шагу зубцовой структуры 0,48 мм, лежит в полосе шириной 20 мкм. В результате редукции координатной сетки дискретности максимальная ширина этой полосы уменьшается до 0,4 мкм, т. е. в 50 раз.

Заключение.

1. В результате применения разработанного алгоритма максимальное число уровней квантования амплитуды управляющего воздействия обеспечивается равным 15 360, что соответствует номинальному шагу сетки дискретности 31,25 нм.

2. Дальнейшее увеличение точности систем перемещений за счет редукции шага дискретности потребует увеличения МДС в рабочем зазоре, что, в свою очередь, даст возможность увеличить число уровней квантования управляющего воздействия и, соответственно, его номинальную величину. Новые возможности по МДС позволят провести адекватное совершенствование оптимизационного алгоритма по редукции шага сетки дискретности с возможностью обеспечения более высокой точности перемещений.

Список литературы

1. Карпович, С.Е. Системы перемещений на основе привода прямого действия / С.Е. Карпович, В.В. Жарский, И.В. Дайняк. — Минск: БГУИР, 2008. — 239 с.
2. Межинский, Ю.С. Построение систем перемещений для гибкого автоматизированного оборудования / Ю.С. Межинский. — Минск: Технопринт, 2002. — 120 с.
3. Ляшук, Ю.Ф. Линейный шаговый электропривод для прецизионного оборудования / Ю.Ф. Ляшук. — Минск: Технопринт, 2002. — 139 с.
4. Русецкий, А.М. Координатные позиционеры гибких производственных систем для электронного машиностроения / А.М. Русецкий. — Минск: Военная академия Республики Беларусь, 1998. — 177 с.
5. Zur optimalen Gestaltung von Parallelkinematikmaschinen mit Planarantrieben / J. Zentner. — Ilmenau: ISLE, 2006. — 123 p.
6. Балковой, А.П. Прецизионный электропривод с вентиляными двигателями / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. — М.: Изд. дом МЭИ, 2010. — 328 с.
7. Обобщенная математическая модель элементарного синхронного мотора / В.В. Жарский [и др.] // Инженерный вестник. — 2006. — № 1(21)/5. — С. 136–140.
8. Dainiak, I. Forming of Precision Program Motion in Coordinate System / I. Dainiak // Proc. of 54th Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, September 7–10, 2009 / Technical University of Ilmenau. — Pp. 105–106.
9. Огер, В.П. Исследование стационарности сетки дискретности координатных систем высокого разрешения / В.П. Огер, А.В. Безлюдов, И.В. Дайняк // Инженерный вестник. — 2006. — № 1(21)/5. — С. 76–81.

Karpovich S.E., Oger V.P., Dainiak I.V., Bezlyudov A.V.

Reduction of discrete grid step of motion systems based on linear stepping motor

The method and algorithm to improve the accuracy of motion systems by reducing the discrete grid step, which based on the developed mathematical model of magnetic flux circulation in the gap of a linear stepping motor, was presented. The circuit design was given, the optimization of quantization levels of control action with the correction of location of discrete grid nodes, which significantly reduces the deviation of the grid nodes from the nominal values, was carried out. The results of experimental investigations of one-coordinate linear stepping motor were shown; it confirms the effectiveness of the developed method and algorithm of improving the accuracy of motion systems.

Keywords: discrete grid, linear stepping motor, precision motion system

Поступила в редакцию 02.03.2013.