

УДК 62-83

ТРАЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КООРДИНАТНЫМИ СИСТЕМАМИ СУБМИКРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

И.В. ДАЙНЯК, В.В. ЖАРСКИЙ, С.Е. КАРПОВИЧ

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

Поступила в редакцию 04 марта 2013

Проанализированы измерительные средства, используемые при формировании программируемых движений в сборочном и оптико-механическом оборудовании микроэлектроники. Предложена структура системы траекторного управления на основе подходов аппаратно-программного моделирования и верификации в режиме реального времени. Приведены результаты использования предложенной системы траекторного управления в координатных системах перемещений прецизионного оборудования.

Ключевые слова: координатная система, система траекторного управления, прецизионное оборудование, микроэлектроника.

Введение

Одним из базовых узлов технологического оборудования, определяющим возможность дальнейшего технического прогресса, являются координатные системы перемещения, которые строятся на основе линейных, планарных и поворотных систем электропривода. Диапазон требуемых типов и видов систем перемещений для прецизионного оборудования очень широк. Только по показателю точности позиционирования он находится в пределах десятков микрометров для реализации вспомогательных периферийных узлов, таких как модули загрузки, и сотых долей микрометра для систем главных перемещений, используемых в оптико-механическом оборудовании, к которым относятся генераторы изображений, мультипликаторы, установки контроля и ремонта оригиналов топологий и др.

В связи с этим разработка методов и средств формирования программируемых движений высокого разрешения по точности, включая траекторное управление координатными системами субмикронного оборудования, построенного на базе приводов прямого действия синхронного типа, является весьма актуальной задачей, имеющей большой практический интерес.

Измерительные средства, используемые при формировании программируемых движений

Анализ контрольно-измерительных средств формирования программируемых движений системами перемещений технологического оборудования показал, что они существенно различаются в зависимости от заданных метрологических характеристик оборудования и конструктивно могут быть выполнены с использованием магнитных, индукционных, емкостных и оптоэлектрических преобразователей, а также оптических приборов на базе лазерной интерферометрии.

В системах перемещений сборочного оборудования [1, 2] для достижения точности $\pm 3 \dots \pm 5$ мкм достаточно обратных связей на магнитно-индукционных датчиках Холла [3], которые и были использованы нами для конфигурирования измерительных схем относительного отсчета для всех типов координатных модулей, включая линейные, поворотные круговые, по-

воротные торцевые и планарные. Пример одной из таких конфигураций для линейного координатного модуля и ее расчетная схема замещения показаны на рисунке.

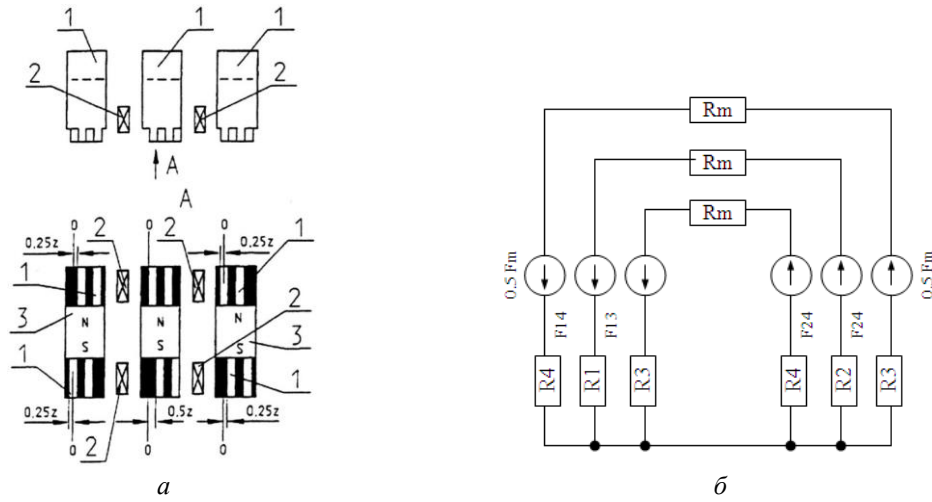


Рис. 1. Измерительная система с тремя магнитопроводами:
 а – структура измерительной системы; б – схема замещения;
 1 – магнитопроводы; 2 – преобразователи Холла; 3 – постоянные магниты;
 z – период зубцовой структуры датчика Холла

Поскольку преобразователи Холла расположены между магнитными сопротивлениями $R_1 \leftrightarrow R_3$, $R_1 \leftrightarrow R_4$, $R_2 \leftrightarrow R_3$, $R_2 \leftrightarrow R_4$ (рис. 1, а), то для определения их информационных сигналов на основании схемы замещения (рис. 1, б) соответствующие магнитодвижущие силы (МДС) F_{13} , F_{14} , F_{23} , F_{24} могут быть рассчитаны по формулам

$$\begin{aligned}
 F_{13} &= \Phi \cdot (R_1 - R_3) = \Phi R_m \left(\sin \frac{2\pi x}{z} - \cos \frac{2\pi x}{z} \right) = -\sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} - \frac{\pi}{4} \right); \\
 F_{14} &= \Phi \cdot (R_1 - R_4) = \Phi R_m \left(-\sin \frac{2\pi x}{z} - \cos \frac{2\pi x}{z} \right) = -\sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} + \frac{\pi}{4} \right); \\
 F_{23} &= \Phi \cdot (R_2 - R_3) = \Phi R_m \left(\cos \frac{2\pi x}{z} + \sin \frac{2\pi x}{z} \right) = \sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} + \frac{\pi}{4} \right); \\
 F_{24} &= \Phi \cdot (R_2 - R_4) = \Phi R_m \left(\cos \frac{2\pi x}{z} - \sin \frac{2\pi x}{z} \right) = \sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} - \frac{\pi}{4} \right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где Φ – магнитный поток полюса; R_m – магнитное сопротивление постоянной МДС; x – текущая координата.

Так как информационные сигналы преобразователей Холла прямо пропорциональны МДС F_{13} , F_{14} , F_{23} , F_{24} , то из формул (1) следует, что рассматриваемая измерительная система позволяет получить две пары противофазных сигналов $F_{13} - F_{24}$ и $F_{23} - F_{14}$, сдвинутых между собой на 90 электрических градусов, в виде

$$\begin{aligned}
 E_1 &= F_{24} - F_{13} = 2\sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} - \frac{\pi}{4} \right); \\
 E_2 &= F_{23} - F_{14} = 2\sqrt{2} \Phi R_m \cos \left(\frac{2\pi x}{z} + \frac{\pi}{4} \right).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Проведенный нами анализ измерительных средств, используемых в прецизионных координатных системах субмикронного технологического оборудования, показал, что современным требованиям достижимой разрешающей способности, достоверности и стабильности получаемой измерительной информации, быстродействия измерительной системы, удобства получения, хранения и передачи измерительной информации отвечают два вида первичных изме-

рительных устройств: лазерные интерферометры, основанные на измерении фазового сдвига методом компенсации, и прецизионные оптические датчики отражательного типа с интерферометрическим принципом сканирования. Среди них оптимальным выбором для измерения наноперемещений являются оптические датчики отражательного типа с интерферометрическим принципом сканирования. Такие датчики с малым периодом входного сигнала и выходным сигналом «синус–косинус» позволяют получить разрешение измерительной системы до 0,44 нм, что вполне достаточно для современного и перспективного в ближайшие 3...5 лет оптико-механического оборудования.

Траекторное управление на основе верификации в режиме реального времени

Разработанная нами обобщенная структура системы управления [4] представляет собой аппаратно-программный комплекс, включающий аппаратную часть в виде контроллера, сконфигурированного под конкретный тип электродвигателя, и программы верхнего уровня, обеспечивающей информационную связь между контроллером и пользователем, а также поддерживающей штатный автоматический режим работы устройства с регулированием движения по скорости, ускорению и положению в зависимости от требуемой технологической операции.

В соответствии с предложенной структурой управления многофункциональными прецизионными координатными системами разработан программно-аппаратный комплекс LSMC-х на базе современного процессора семейства DSP MS320VC33, позволяющий одновременно управлять шестью позиционными осями с электроприводами в серворежиме (подчиненное регулирование по положению или его первой и второй производной, а также регулирование по усилию или моменту). В зависимости от конфигурации и функционального назначения координатных систем контроллер может комплектоваться одним или двумя сервоконтроллерами UC48NQ, контроллерами ввода-вывода SPS/IO-8(16), линейкой усилителей мощности (в двухфазном исполнении PU2 (200 Вт) и PU3 (500 Вт), в трехфазном исполнении PU10 (1 кВт) и PU20 (5 кВт)).

При работе с контроллером LSMC-х имеется возможность траекторного управления и динамического программирования параметров перемещения, скорости и ускорения приводов. Контроллер обладает блоком внутренней памяти, в который при необходимости записываются заданные пользователем параметры движения. Впоследствии сохраненные данные могут быть переданы на управляющий персональный компьютер для дальнейшей обработки и анализа. Пересылка команд от компьютера к контроллеру, а также получение информации от контроллера осуществляется через последовательный интерфейс RS-232, USB или Ethercat. Контроллер LSMC-х совместим с программной оболочкой DSP-Host и инструментарием MATLAB Real-Time Workshop, что позволяет реализовать методику аппаратно-программного моделирования и верификации математической модели линейного двигателя.

Использование подходов аппаратно-программного моделирования и верификации [5] позволило реализовать в системе управления приводами адаптивный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор), расчет параметров которого основан на верификации в MATLAB в режиме реального времени компьютерной модели исполнительного привода по информации, поступающей с датчиков обратной связи и токовых контуров усилителей мощности. Передаточная функция управления одной координатой при этом имеет вид

$$G_{cy}(s) = \frac{\left(K_{пр} + \frac{K_{и}}{s} + K_{д}s\right)(G_{ym}(s)G_{cd}(s)) + G_{фф}(s)G_{ym}(s)G_{cd}(s)}{1 + \left(K_{пр} + \frac{K_{и}}{s} + K_{д}s\right)G_{ym}(s)G_{cd}(s)G_{д}(s)}, \quad (3)$$

где $K_{пр}, K_{и}, K_{д}$ – параметры пропорционального, интегрального и дифференциального каналов ПИД-регулятора соответственно; $G_{фф}(s)$ – параметр упреждающего канала ПИД-регулятора; $G_{ym}(s)$ – передаточная функция усилителя мощности; $G_{cd}(s)$ – передаточная функция синхронного двигателя; $G_{д}(s)$ – передаточная функция датчика Холла.

Программа определения оптимальных параметров ПИД-регулятора, разработанная в MATLAB/Simulink, позволила реализовать разработанный адаптивный регулятор в системе управления LSMC-х с удобным для пользователя интерфейсом, включающим как числовую информацию о предельно допустимых и текущих задаваемых и искомым параметрах синхронного двигателя, так и графическую информацию о переходных процессах и им соответствующих функциях изменения управляющих токов и напряжений. На рис. 2 в качестве примера показана копия окна программы с графиком амплитуды задаваемых и действительных управляющих токов, а также график напряжения в рассматриваемой фазе при реализации позиционного управления перемещением на 40 мм со скоростью 1 м/с и ускорением 15 м/с².

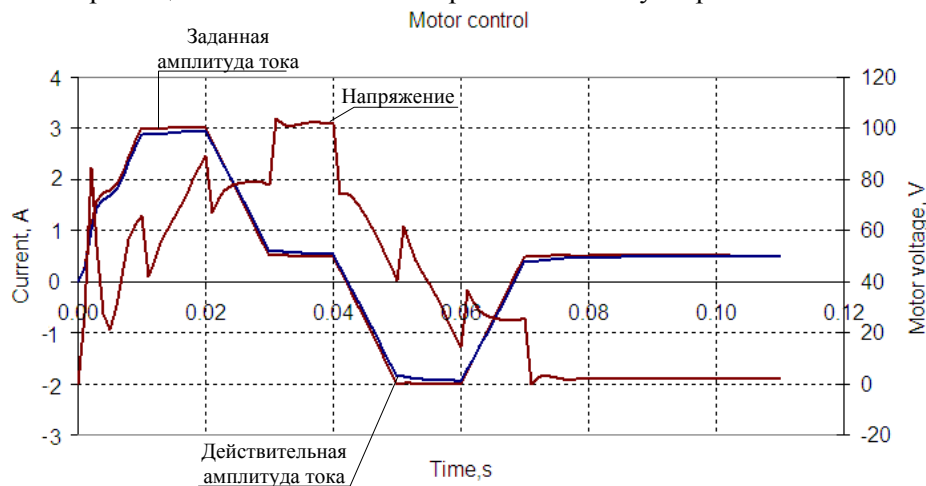


Рис. 2. Графики управляющих токов и напряжений

Анализ возможных алгоритмов управления показал, что для систем перемещений сборочного оборудования во многих случаях достаточно реализовать обратные связи по положению на основе токовых сигналов, снимаемых с датчиков Холла. Системы перемещений для субмикронного оборудования, безусловно, требуют реализации обратных связей как по положению, так и по скорости и ускорению с реализацией программных компенсаторов статической и динамической погрешностей.

Внедрение разработанных контрольно-измерительных средств и системы траекторного управления в технологическое оборудование микроэлектроники позволило получить следующие результаты.

Координатные системы для сборочного оборудования в комплекте с системой управления LSMC-х, разработанные как автономные мехатронные модули с датчиками обратных связей на магнитно-индукционных и оптоэлектронных преобразователях, обеспечивают разрешение до 50 нм, точность позиционирования до 1 мкм, скорость до 1 м/с, ускорение до 2 м/с².

Координатные системы для оптико-механического оборудования в комплекте с системой управления LSMC-х модульно встраиваются в конкретное оборудование, работающее в сочетании с лазерными интерферометрами измерительной системы, обеспечивая разрешение до 1 нм, точность позиционирования до 5 нм, скорость до 0,5 м/с, ускорение до 5 м/с².

Выводы

В системах перемещений сборочного оборудования микроэлектроники для достижения точности позиционирования и траекторной погрешности в пределах $\pm 3 \dots \pm 5$ мкм достаточно измерительной системы, обеспечивающей обратные связи в системе управления на магнитно-индукционных датчиках Холла.

Для систем перемещений оптико-механического оборудования, особенно перспективного с перемещениями наноуровня, необходимо использовать абсолютную систему измерений на основе лазерных интерферометров, позволяющих получить разрешение до 0,5 нм и лучше.

TRAJECTORY CONTROL OF COORDINATE SYSTEMS OF SUBMICRON MICROELECTRONICS EQUIPMENT

I.V. DAINIAK, V.V. JARSKI, S.E. KARPOVICH

Abstract

Measuring tools used for the forming of programming motions in the assembly and opto-mechanical equipment of microelectronics were analyzed. The structure of the trajectory control system based on approach of hardware-in-the-loop modeling and real-time verification was proposed. The results of using the proposed trajectory control system in coordinate systems of precision equipment were shown.

Список литературы

1. *Карпович С.Е.* Прецизионные координатные системы на основе электропривода прямого действия. Минск, 2001.
2. *Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В.* Программируемые движения в прецизионных системах перемещений. Минск, 2008.
3. *Sharski V.V., Trusov N.K.* Positionssensor für den Anker eines elektromagnetischen Schrittmotors / Offenlegungsschrift DE 101 03 478 A 1 Bundesrepublik Deutschland von 02.08.2001.
4. *Jarski V.* // SPIE. 2009. Vol. 7377. CID 7377 1A.
5. *Ahranovich A., Karpovich S., Zharsky V.* // Electronics and Electrical Engineering. 2007. № 5(77). P. 49–52.