

УДК 681.587.72

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ ШАГОВЫХ ПРИВОДОВ
ПРЕЦИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕКСАПОДА**

Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян

Рассмотрен линейный привод механизма с параллельной кинематикой (типа “гексапод”) и система его управления. Описаны возможные режимы работы двигателя в составе линейного привода, приведены их основные достоинства и недостатки. Определен наиболее оптимальный способ управления шаговыми двигателями линейных приводов механизма с параллельной кинематикой.

Ключевые слова: параллельная кинематика; гексапод; линейный привод; система управления; шаговый двигатель; микроконтроллер; вентильный двигатель.

**MODES OF OPERATION OF STEPPING DRIVES IN THE PRECISION POSITIONING SYSTEM
AND ORIENTATION OF SPACE APPLICATIONS ON THE BASIS OF HEXAPOD**

Y.A. Zhukov, E.B. Korotkov, N.S. Slobodzyan

The paper considers a linear drive of mechanism with parallel kinematics (of the “hexapod” type) and its control system. Possible modes of engine operation as a part of a linear drive are described, their main advantages and disadvantages are given. The most optimal method for controlling the stepping motors of linear drives of the mechanism with parallel kinematics is determined.

Keywords: parallel kinematics; hexapod; linear drive; control system; stepper motor; microcontroller; valve motor.

В БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова и АО “ИСС” им. академика М.Ф. Решетнева проводятся работы по созданию ряда многостепенных механизмов с параллельной кинематикой для обеспечения точного позиционирования и стабилизации бортовых приборов и устройств космического назначения.



Рисунок 1 – Эскиз гексапода

В настоящее время механизмы с параллельной структурой используются как подвижные симуляторы и параллельные манипуляторы, микро- и наноманипуляторы. Такие механизмы имеют множество конструктивных вариантов – от широко известной платформы Стюарта до разнообразных конструкций специальных роботов с упругими элементами.

В системах наведения и позиционирования бортовых приборов космической техники все большее распространение получают механизмы с параллельной кинематикой типа “гексапод”, выполненные по схеме платформы Стюарта [1, 2].

Рассматриваемый механизм, эскиз которого показан на рисунке 1, состоит из неподвижного основания 2 и подвижной платформы 1, которые механически связаны посредством шести идентичных звеньев – ног (штанг, стоек). Каждая нога выполняет функцию линейного привода и состоит из двух полуштанг 3 и 4, соединяемых шарнирами с основанием и платформой. Шаговый двигатель в каждой ноге формирует линейное перемещение



Рисунок 2 – Электронный модуль управления линейного привода

полуштанги 3 относительно полуштанги 4. Это движение реализуется за счет механической передачи “редуктор-винт-гайка” в конструкции ноги, преобразующей вращательное движение вала шагового двигателя в линейное (поступательное) движение полуштанги 3.

Перемещение верхней подвижной платформы с нагрузкой осуществляется путем изменения длины опорных ног, оснащенных линейными приводами (актуаторами). Таким образом, задача позиционирования верхней платформы относительно нижней сводится к задаче совместного управления шестью линейными приводами ног гексапода.

Кинематический анализ подобной системы показал, что для обеспечения заданного прецизионного перемещения и позиционирования верхней платформы (порядка 10 мкм по линейным координатам и десятков угловых секунд по угловым), точность управляемого перемещения длин ног должна быть не более 1 мкм.

Столь высокие требования по точности обеспечиваются применением высокоточных линейных приводов, построенных на базе прецизионных линейных механизмов с шарико-винтовыми передачами, шаговыми двигателями и системой цифрового управления.

В процессе разработки системы управления гексаподом в лаборатории махатронных и робототехнических систем БГТУ создан независимый функционально завершённый узел линейного привода, структурно состоящий из электронного модуля управления (рисунок 2) и электромеханического модуля линейного привода (рисунок 3).

Модуль управления состоит из управляющего микроконтроллера отечественного производства серии 1986VE9х [3] и исполняемого на нем программного обеспечения, преобразователей сигналов первичных датчиков углового положения, а также усилителя сигналов управления (драйвера).

В состав электромеханического модуля входит электродвигатель (в рассматриваемом приво-



Рисунок 3 – Электромеханический модуль линейного привода

де применяется шаговый биполярный двигатель), датчик углового положения (вращающийся трансформатор), редуктор и механическая передача (шарико-винтовая).

Датчик углового положения, установленный на выходном валу двигателя, используется для управления двигателем, он также может использоваться для измерения линейного перемещения подвижной штанги гексапода путем пересчета углового перемещения ротора датчика угла в линейное перемещение штока, осуществляемое посредством передачи “винт-гайка”. При этом для управления гексаподом возникает необходимость решения “расширенной” обратной задачи кинематики, на основе которой вычисляются угловые положения пары “винт-гайка” [4].

Кроме того, при реализации управления ногой гексапода по “косвенному” измерению длин ног на основе датчика углового положения возникают дополнительные погрешности измерения, сказывающиеся на точности линейного привода. В связи с этим лучшим решением является использование отдельной измерительной системы в составе гексапода [5].

Применение гибридного шагового двигателя в линейном приводе ноги гексапода позволяет добиться высокой точности и дискретности перемещения.

Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Гибридные двигатели дороже, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость [6].

Альтернативой шаговому двигателю в рассматриваемом линейном приводе мог бы стать трехфазный бесколлекторный двигатель постоянного тока, однако возможность запуска шагового двигателя в различных режимах, наличие момента самоторможения в пределах полного шага, большое количество пар полюсов (позволяющее получить малую скорость вращения) определили выбор в пользу последнего типа двигателя. Классический двигатель постоянного тока не рассматривался ввиду наличия щеточно-коллекторного узла, требующего обслуживания.

В рассматриваемом линейном приводе возможна работа шагового двигателя в различных режимах, основными из которых являются: полношаговый режим, режим с дроблением шага и вентильный режим. При этом, благодаря наличию редуктора и шарико-винтовой передачи, требуемая выходная дискретность линейного перемещения штока привода достигается даже на полном шаге (в приводе используется двигатель с величиной полного шага $1,8^\circ$, что обеспечивает дискретность перемещения $0,2 \text{ мкм}$).

Результаты моделирования гексапода с двигателями, работающими в полношаговом режиме, в целом удовлетворяют требованиям по точности и динамическим показателям [7], однако для определения оптимального способа управления шаговыми двигателями линейных приводов механизма с параллельной кинематикой необходимо рассмотреть достоинства и недостатки указанных режимов работы двигателей.

В полношаговом режиме работы при подаче на обмотки двигателя импульса напряжения поворот его ротора осуществляется на некоторый угол (шаг двигателя). При вращении с постоянной скоростью полношаговом режиме поле статора вращается прерывисто, шагами.

Недостаток такого способа управления заключается в том, что двигатель фактически работает в разомкнутом режиме, а момент вращения ротора максимален на минимальной скорости вращения, непостоянен и зависит от положения ротора в пределах полюсного деления. Однако здесь проявляется одно из достоинств полношагового способа управления – возможность обходиться без механических тормозных систем, поскольку на полном шаге при протекании тока через обмотки двигателя возникает значительный тормозной момент, позволяющий удерживать ротор двигателя в равновесном состоянии [6].

Кроме того, имеется сильно выраженное явление механического резонанса, поскольку ротор не сразу устанавливается в новую позицию, а совершает затухающие колебания. При каждом шаге происходит толчок ротора, который начинает колебаться, а на некоторых частотах вращения двигатель теряет свой момент.

Существует также проблема пропуска шагов, проявляющаяся при возникновении моментных нагрузок на валу, превышающих максимально допустимые в спецификации на двигатель. При управлении сложным пространственным механизмом, каким является гексапод с нагрузкой, могут возникать допустимые кратковременные динамические моменты на валах шаговых двигателей

линейных приводов, а также моменты сухого и вязкого трения, что может повлечь за собой указанное явление.

Однако проблема пропуска шагов эффективно решается за счет учета сигналов датчика фактического углового перемещения вала двигателя.

В качестве достоинства можно отметить, что для реализации полношагового режима управления достаточно использовать простейшие электронные ключи, где не требуется высокочастотная коммутация, а сам алгоритм коммутации достаточно прост [8].

Режим с дроблением шага (или микрошаговый режим) обеспечивается путем получения поля статора, вращающегося более плавно, чем в полношаговом режиме. Размер микрошага ротора двигателя зависит от режима дробления шага. Вращающееся поле статора порождается переменными напряжениями двух фаз А и В, сдвинутыми друг относительно друга на 90 электрических градусов. В идеальном случае – это синусоидальные сигналы. Степень аппроксимации формируемых системой управления напряжений питания определяет степень дробления шага. Существует много различных микрошаговых режимов, с величиной шага от $1/2$ полного шага до $1/32$ и даже меньше [8].

В результате дробления шага обеспечиваются меньшие вибрации и практически бесшумная работа вплоть до нулевой частоты. Кроме того, меньший угол шага способен обеспечить более точное позиционирование, по сравнению с полношаговым режимом. Однако и такой способ управления имеет недостатки: нарастание момента в зависимости от угла поворота в пределах полного шага; несинусоидальная зависимость между моментом и углом поворота ротора конструктивных отклонений. Также требуется более сложная мостовая схема коммутации обмоток двигателя, требующая наличия сравнительно высокочастотных (20 кГц) электронных ключей для формирования широтно-импульсно модулированных (ШИМ) сигналов, и специальный алгоритм формирования управляющих напряжений статора.

Вентильный режим работы двигателя в настоящее время является наиболее перспективным. Принципиально термин “вентильный двигатель” относится к любой синхронной машине с синхронно-синфазным движением полей статора и ротора, который обеспечивается токовым питанием в функции положения, или самокоммутацией [9].

Шаговый двигатель также является синхронным электродвигателем. При повороте поля статора ротор тоже поворачивается, стремясь занять новое положение равновесия. При этом максимальный

момент развивается двигателем тогда, когда вектор магнитного потока статора ортогонален вектору магнитного потока ротора. Для определения положения ротора (и связанного с ним положения вектора магнитного потока ротора) используется датчик углового положения, имеющийся в составе линейного привода. При этом путем формирования фазных токов поддерживается необходимое ортогональное положение вектора магнитного потока статора с учетом текущего положения вектора магнитного потока ротора.

Преимуществами вентильного режима являются: широкий диапазон изменения частоты вращения (момент при этом постоянен); более точное позиционирование вала двигателя; отсутствие резонансных явлений.

В качестве относительного недостатка можно отметить сравнительную сложность системы управления: электронная часть вентильного двигателя содержит микроконтроллер, транзисторные мосты (по одному на каждую фазу), для формирования фазных токов используется принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом управляющими сигналами являются именно токи фаз, а не напряжения, что достигается применением токовых датчиков и замыканием соответствующих сигналов обратной связи по току.

Исследования системы управления линейными приводами гексапода на основе шаговых двигателей позволили определить достоинства и недостатки режимов управления приводами. Для прецизионного управления гексаподом в позиционном режиме при ограниченных возможностях микропроцессорного блока рекомендуется шаговый или микрошаговый режим работы двигателя. Для контурного управления гексаподом и линейными приводами наиболее подходящим является вентильный режим работы шагового двигателя, обеспечивающий лучшие статические и динамические характеристики. В качестве перспективной задачи планируется развитие методов управления линейными приводами с учетом внешних и внутренних возмущений, применение адаптивных алгоритмов управления.

Работа выполнена в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 в рамках НИОКТР, при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор

от 01.12.2015 № 02.G25.31.0160). Головным исполнителем НИОКТР является ФГБОУ ВО БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д. Ф. Устинова.

Литература

1. *Stewart D.* A Platform with Six Degrees of Freedom / D. Stewart // UK Institution of Mechanical Engineers Proceedings. 1965. Vol. 180. Part 1. № 15.
2. *Коротков Е.Б.* Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов / Е.Б. Коротков, С.А. Матвеев, Н.Г. Яковенко // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.
3. Микроконтроллер 1986BE92 [Электронный ресурс] // Сайт АО “ПКК Миландр”. URL: <http://milandr.ru/> (дата обращения: 01.05.2017).
4. *Жуков Ю.А.* Система управления механизмом с параллельной кинематикой для перемещения бортовых приборов КЛА на базе современного отечественного радиационно-стойкого микроконтроллера с процессорным ядром Cortex-M4F / Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 48–54.
5. *Горбунов А.В.* Высоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения / А.В. Горбунов, Е.Б. Коротков, Н.С. Слободзян // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42–48.
6. *Рентюк В.* Шаговые двигатели и особенности их применения / В. Рентюк // Компоненты и технологии. 2013. № 10.
7. *Жуков Ю.А.* Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей / Ю.А. Жуков, Е.Б. Коротков, А.В. Мороз // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
8. Шаговый двигатель [Электронный ресурс] // Сайт ООО “НПФ Электропривод”. URL: <http://electroprivod.ru/stepmotor.htm/> (дата обращения: 01.05.2017).
9. *Балковой А.П.* Прецизионный электропривод с вентильными двигателями / А.П. Балковой, В.К. Цаценкин. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 328 с.