

УДК 62-83

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ НА ГИБРИДНЫХ ПРИВОДАХ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

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

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 8 февраля 2019

Аннотация. Представлены результаты по дальнейшему развитию теории разработки и принципов создания мехатронных систем координатных перемещений с повышенными характеристиками точности и быстродействия, построенных на реконфигурируемых механизмах параллельной кинематики и гибридных многокоординатных приводах прямого действия. Приведены некоторые из разработанных систем перемещений с примером алгоритмизации математических моделей для имитационного моделирования их кинематики, динамики и управления. Представлены перспективы использования полученных результатов при разработке прецизионного сборочного и опико-механического оборудования для микроэлектроники.

Ключевые слова: мехатронные системы, механизмы параллельной кинематики, привод прямого действия, алгоритмизация моделей, имитационное моделирование.

Abstract. The results of the further development of the theory of creating of mechatronic coordinate displacement systems with enhanced characteristics of accuracy and speed based on reconfigurable mechanisms of parallel kinematics and hybrid multi-axis direct-acting drives are presented. Some of the developed displacement systems with an example of algorithmic mathematical models for simulation modeling of their kinematics, dynamics and control are given. The prospects for the use of the results obtained in the development of precision assembly and optical-mechanical equipment for microelectronics are presented.

Keywords: mechatronic systems, mechanisms of parallel kinematics, direct drive, model algorithmization, simulation modeling.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 120, No. 2, pp. 59-72

Mechatronic system of parallel kinematics on hybrid direct action drivers

S.E. Karpovich, I.V. Dainiak, V.V. Kuzniatsov

Введение

В настоящее время особенно остро ставится задача дальнейшей интенсификации производства, повышения его эффективности и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции. Достижение этих целей возможно лишь при осуществлении существенного роста производительности технологического оборудования и наиболее полной его автоматизации. Для приборостроения и микроэлектроники также остро ставится проблема повышения точности, связанная с развитием мехатроники, микромеханики и особенно с высокими темпами уменьшения топологической нормы при производстве изделий электронной техники. Эффективным средством реализации этих целей является широкое внедрение и применение гибкого автоматизированного оборудования, построенного на мехатронных системах перемещений, представляющих собой механо-аппаратно-программные комплексы, управляемые от ЭВМ и работающие по принципу гибких перенастраиваемых на требуемую технологию систем.

Особая роль и возможности многокоординатного синхронного привода в спецтехнологическом автоматизированном оборудовании определяется полной

автономностью каждого координатного модуля по питанию и управлению, способностью конфигурирования модулей с другими однотипными координатными позиционерами в зависимости от конструктивной геометрии статора, встраиваемого в единое технологическое пространство конкретного оборудования. Все это предопределило реализованные авторами подходы к построению систем многокоординатных перемещений [1–10], которые обладают способностью конфигурирования и комбинирования однотипных координатных позиционеров в гибридный многокоординатный синхронный привод с жестким программным согласованием в единой системе координат всех производственных и транспортных перемещений на основе алгоритмов совместной и бесколлизийной работы. Технической основой для построения сложных движений служат электромагнитные модули координатных перемещений с электрическим дроблением шага [11–21], позволяющие универсально и технически просто преобразовывать цифровую информацию в требуемые законы и изменения фазных токов, формирующих, в конечном итоге, требуемые траекторные движения.

Все многообразие систем перемещений на модулях движения многокоординатных приводов прямого действия в полной мере зависит от конфигурации самого привода [4]. В настоящее время разработаны электромагнитные модули движения с числовым управлением различных типов: однокоординатные линейные, однокоординатные поворотные, двухкоординатные планарные, на базе которых строится все многообразие многокоординатных приводов с числом внутренней подвижности, определяемой числом электромагнитных модулей. Тем самым внутренняя подвижность системы перемещения может быть любая, определяемая технологическим процессом.

Эффективным средством решения описанных выше проблем является широкое внедрение и применение гибкого автоматизированного оборудования, построенного на системах перемещений параллельной кинематики с гибридным приводом прямого действия. Для таких систем профессором С. Е. Карповичем была предложена концепция управляемого движения в трехмерном пространстве на базе многокоординатного привода прямого действия и реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

Исследования в этом направлении на протяжении более 20 лет проводятся в БГУИР в НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы», а также в совместной учебно-научной лаборатории БГУИР и ГНПО «Планар» под научным руководством профессора С. Е. Карповича. По результатам исследований в этом научном направлении защищено 5 докторских и более 20 кандидатских диссертаций аспирантами, докторантами и другими соискателями научных степеней, включая научных сотрудников ГНПО «Планар».

Разработаны подходы к построению систем многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики. Базовыми элементами рассматриваемых систем являются многокоординатные системы гибридных приводов, построенные на управляемых синхронных шаговых модулях линейного, поворотного и планарного типов и механизмах параллельной кинематики со структурой пространственных групп Ассура третьего класса в виде различных схемных и конструктивных исполнений. Структурно-кинематическое согласование этих элементов в систему многокоординатных перемещений, в конечном итоге, дает возможность получить все многообразие последних с возможностью реконфигурирования и адаптации при встраивании в конкретное оборудование.

Предложена и научно обоснована концепция модульного построения электромеханических преобразователей синхронных шаговых двигателей, принцип действия которых основан на взаимодействии магнитных полей дискретных электромагнитных фазных модулей и периодического стационарного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, сконфигурированными в виде пространственной линейной или круговой чередующейся магнитной последовательности. Благодаря этому решению появилась возможность существенно увеличить магнитную индукцию в рабочем зазоре электромагнитного преобразователя и тем самым расширить возможности систем координатных перемещений по динамическим показателям, обеспечивая в 2–3 раза увеличение скорости и ускорения по сравнению с традиционным линейным шаговым двигателем. На основании полученных результатов имитационного моделирования предложены четыре типа конструктивного исполнения шаговых электроприводов прямого действия для систем координатных перемещений автоматизированного оборудования [3].

Для реализации сложных пространственных движений предложено использовать механизмы параллельной кинематики, реконфигурируемые в зависимости от конструктивной конфигурации многокоординатного синхронного привода. Разработаны различные конфигурации исполнительных систем многокоординатных перемещений, включающие системы перемещений на кольцевом сегментном приводе, системы перемещений на многокоординатном приводе с треугольным статором, системы перемещений на трех планарных позиционерах и системы перемещений на комбинированном гибридном шестикоординатном приводе. Проводилась алгоритмизация их математических моделей и имитационное компьютерное моделирование в среде MATLAB кинематических, динамических и предельных эксплуатационных характеристик, связанных с обеспечением требуемого движения рабочей платформы в трехмерном пространстве [2, 26–35].

Разрабатывались новые методы и средства построения и реализации управляющих алгоритмов, позволяющих реализовывать управление системами многокоординатных перемещений в режиме реального времени. Так, за основу одного из разработанных методов, был принят метод оценочных функций, позволяющий синтезировать вычислительные структуры, называемые интерполяторами, с помощью которых осуществляются расчеты шаговых траекторий и выработка сигналов на управляющие входы исполнительных двигателей многокоординатного привода [1, 31]. При использовании представленных алгоритмов возможно формирование траекторий высокого порядка, задаваемых на плоскости и в трехмерном пространстве. Для этих алгоритмов характерны простота расчета, отсутствие накапливающейся погрешности, возможность автоматизации подготовки исходной информации для цифровых управляющих аппаратных средств.

Для реализации режима управления реальным временем предложено использовать современную информационную технологию EtherCAT, использующую в качестве среды передачи данных сеть Ethernet. Уникальный функциональный принцип аппаратной обработки информации «на лету» без промежуточной буферизации дает возможность получить время цикла шины в диапазоне микросекунд, а не миллисекунд, что позволяет полностью использовать ресурс системы для решения в реальном времени задач генерации траекторий, сплайн-интерполяции, обработки сигналов датчиков, расчета положения и скорости объекта управления.

В настоящей статье представлены некоторые из полученных авторами результатов по дальнейшему развитию теории разработки и принципов создания прецизионных мехатронных систем многокоординатных перемещений на основе предложенного современного цифрового многокоординатного привода и реконфигурируемых механизмов параллельной кинематики.

Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики

На основе общих теоретических подходов [1, 3] авторами были разработаны исполнительные механизмы параллельной кинематики, конфигурируемые из пространственной структурной группы Ассур при числе звеньев $4 \leq n \leq 7$ и одной из систем многокоординатных приводов, реализуемых на шаговых двигателях линейного, поворотного и планарного типов. Таким образом, на основании этих структур могут быть предложены различные конструктивные исполнения систем перемещений. В качестве примеров в статье рассмотрены три системы перемещений на трех различных многокоординатных приводах прямого действия: кольцевого, с треугольным статором и планарного типа.

Система перемещений на кольцевом сегментном приводе. Система перемещений на кольцевом сегментном приводе (рис. 1) определяется конфигурацией многокоординатного кольцевого привода с шестью подвижными сегментными модулями. Она является механо-аппаратно-программным комплексом, относящимся к классу мехатронных систем перемещений, и состоит из механизма параллельной кинематики со структурой $n = 7$, $p_3 = 9$ и шестикоординатного кольцевого привода, в котором управление всеми координатами происходит через специальный контроллер от программы верхнего уровня, управляющей ЭВМ.

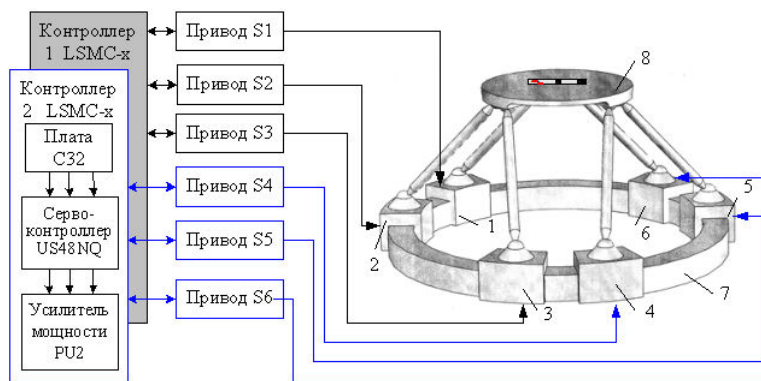


Рис. 1. Система перемещений на кольцевом сегментном приводе

Система перемещений на кольцевом сегментном приводе (рис. 1) состоит из механизма параллельной кинематики и многокоординатного привода, представляющего собой гибридную структуру из сегментных синхронных двигателей 1, 2, ..., 6, которые через сферические шарниры передают управляемое движение на рабочую платформу 8.

Исполнительные двигатели в виде подвижных сегментов, расположенных на кольцевом статоре, по образующей которого регулярно уложены постоянные магниты, имеют автономные управления их перемещениями. В результате этого в рассматриваемом случае обеспечивается внутренняя подвижность с шестью степенями свободы.

В качестве конструктивного прототипа авторами был принят поворотный синхронный сегментный двигатель серии RSMS - M36, разработанный и выпускаемый на предприятии «Рухсервомотор» (Минск). Он конструктивно состоит из одного или нескольких неподвижных сегментов с трехфазной системой обмоток, залитых теплопроводящим компаундом, и подвижного стального кольца статора (ротора) с регулярно наклеенными редкоземельными постоянными магнитами. В систему такого двигателя может быть встроен инкрементный датчик положения для реализации регулирования по законам перемещения.

На этой базе был предложен многокоординатный кольцевой двигатель [14], полученный из прототипа путем инверсии его механики, когда в качестве неподвижного был принят ротор, а неподвижные сегменты статора были приняты подвижными, автономно управляемыми, число которых может быть как два, так и более. На рис. 2 представлен кольцевой двухкоординатный двигатель, состоящий из неподвижного статора 2 и двух подвижных координатных сегментов 1 и 3. На основании инверсионной компоновки авторами был разработан многокоординатный привод для систем перемещений с числом степеней свободы до шести включительно. Кроме того, отличительной особенностью таких систем является способность реализации неограниченного поворота вокруг вертикальной оси.

Рассматриваемая система перемещений состоит из механизма параллельной кинематики в виде раскрывающегося тетраэдра и трехкоординатного кольцевого сегментного двигателя. Механизм параллельной кинематики построен на группе Асура третьего класса, которая состоит из трех шатунов в виде треугольных звеньев 8 – 9, 10 – 11, 12 – 13, связанных сферическими шарнирами 5, 6, 7 с управляемыми подвижными сегментными модулями 2, 3, 4, а соответствующими вращательными шарнирами – с подвижной треугольной платформой. При перемещении сегментных модулей 2, 3, 4 по неподвижной кольцевой направляющей статора 1, их движение через сферические шарниры, шатуны и вращательные шарниры механизма параллельной кинематики передается на исполнительное звено – треугольную платформу 23, которая принимает однозначное положение и ориентацию в трехмерном пространстве. Система перемещений (рис. 3) позволяет реализовывать прецизионные движения по шести взаимосвязанным координатам в трехмерном пространстве, включая три линейные и три угловые, обеспечивая высокие точностные и динамические характеристики перемещения объекта. При этом обеспечивается технический результат при довольно простой и дешевой в изготовлении конструкции самого исполнительного механизма. Способность реализации дополнительного переносного движения управляемого разворота вокруг вертикальной оси в диапазоне $\pm 360^\circ$ расширяет область управляемого движения платформой.

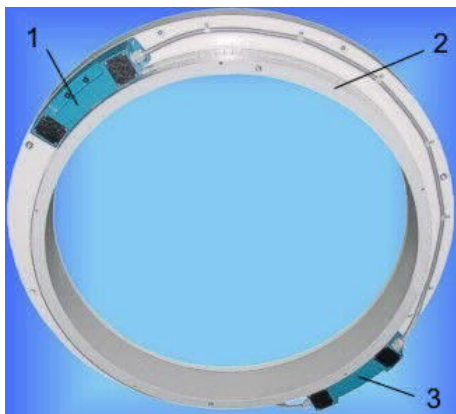


Рис. 2. Кольцевой двухкоординатный двигатель

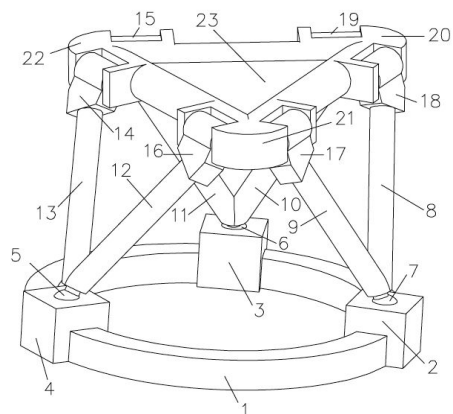


Рис. 3. Система перемещений с тремя степенями свободы

Система перемещений на многокоординатном приводе с треугольным статором. Система перемещений на шестикординатном приводе с треугольным статором, представленная на рис. 4, состоит из треугольного статора 1 с зубцовой нарезкой, по направляющим которой перемещаются подвижные линейные модули 2, 3..., 7, движение которых через промежуточные шатуны 8, 9..., 13 передается на подвижную платформу 14. При этом линейные перемещения шести подвижных модулей преобразуются в сложное движение платформы с шестью степенями свободы.

Принципиальная схема конструкции одного подвижного модуля треугольного линейного шагового двигателя приведена на рис. 5.

Синхронный шаговый двигатель состоит из основания 1, на котором расположен статор, включающий магнитопровод 2 и постоянные магниты 3, расположенные с чередующей полярностью магнитных полюсов вдоль направления перемещения.

На основании 1 закреплены две линейные направляющие 4 с подшипниками 5, на которых с помощью каретки 6 закреплен якорь двигателя. Якорь состоит из ряда П-образных магнитопроводов 7 с обмотками 8 управления, закрепленных с помощью теплопроводящего компаунда и выступов в металлическом немагнитном, например, из дюралюминия, корпусе 9. Корпус 9 с помощью несущей балки 10 крепится к каретке 6 и теплоизолирован от нее и балки 10 посредством прокладок 11. Для подведения потока охлаждающей жидкости корпус 9 снабжен каналами 12.

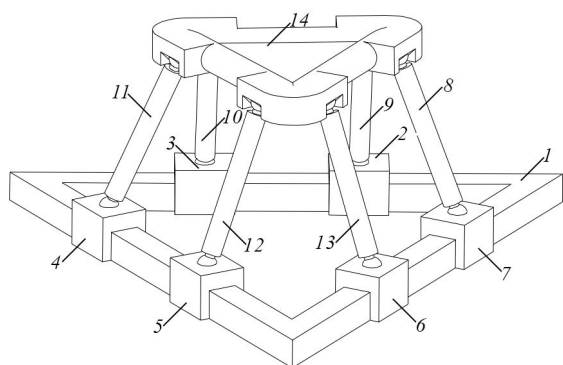


Рис. 4. Система перемещений на треугольном приводе

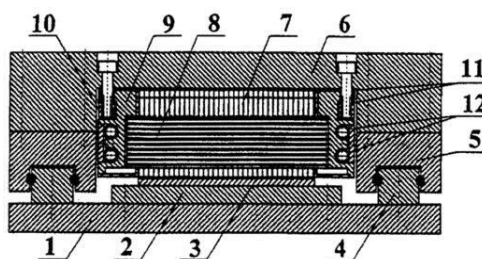


Рис. 5. Конструкция подвижного модуля

Система перемещений на планарных приводах прямого действия. Рассматриваемая система перемещений на планарных приводах прямого действия, представленная на рис. 6, сконфигурирована из многокоординатного привода прямого действия на трех планарных позиционерах и механизма параллельной кинематики в виде подвижного раскрывающегося тетраэдра [3, 26].

Она обладает шестью степенями свободы и состоит из группы Ассура третьего класса (звенья 5, 6, 7, 8) и шестикоординатного привода в виде трех управляемых планарных позиционеров 1, 2, 3, перемещающихся на одном общем для них плоском статоре 4. Такая конструктивная особенность системы перемещений накладывает специфические требования, которые необходимо учитывать при разработке алгоритмов для имитационного моделирования ее кинематики [30]. Планарный позиционер представляет собой двухкоординатный линейный шаговый двигатель с совмещенными координатами, которые содержат зубчатый ферромагнитный статор и индуктор, выполненный в виде плоского корпуса. Симметрично относительно центра корпуса расположены и закреплены электромагнитные модули каждой координаты. Индуктор находится над статором на небольшом расстоянии порядка 10–30 мкм, которое создается благодаря уравниванию сил притяжения индуктора к статору, создаваемых за счет электромагнитных модулей, и сил отталкивания, создаваемых сжатым воздухом.

Особенность такой конструкции состоит в появлении угловых колебаний индуктора вокруг вертикальной оси, причем амплитуда и частота этих колебаний зависит от температуры. Двухкоординатный планарный позиционер обладает высокими точностными и динамическими показателями за счет того, что электромагнитные модули выполнены однофазными, что дополнительно позволяет обеспечить их симметрирование относительно осей корпуса, параллельных координатам перемещений. Электромагнитные модули одной координаты позиционера расположены около оси корпуса параллельно другой координате. Такая ортогональная компоновка магнитных модулей позволяет реализовать систему перемещения по двум независимым ортогональным координатам в плоскости перемещения.

Для достижения высоких точностей по координатам и контурным перемещениям используется система измерений на однотипных датчиках линейных перемещений, построенная на базе интерферометров с двухчастотным лазером (рис. 7).

Это позволяет при автоматическом управлении реализовывать обратные связи по положению, скорости и ускорения в режиме реального времени и обеспечивать высокую динамику (скорость до 1 м/с, ускорения до 30 м/с²) при точности и повторяемости в пределах от 1 до 5 мкм.

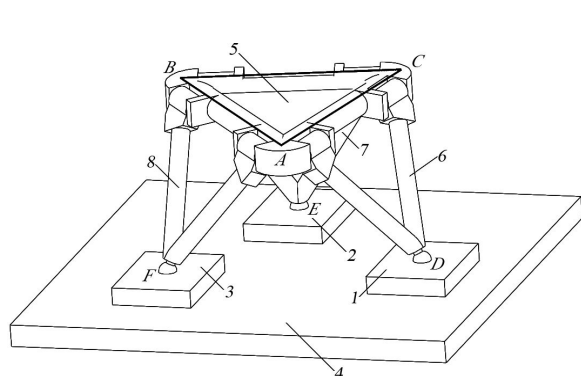


Рис. 6. Система перемещений на трех планарных позиционерах

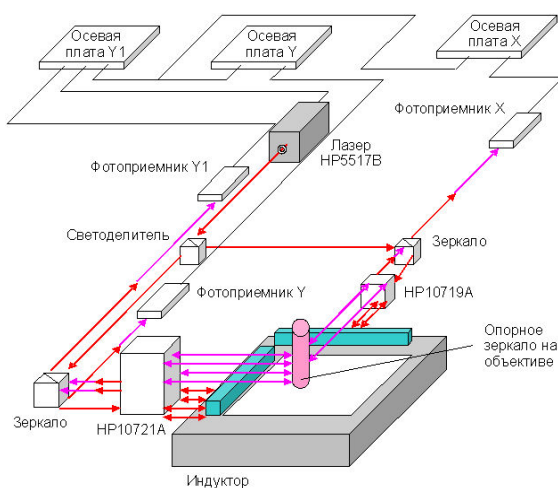


Рис. 7. Позиционная система измерений

Основные разработанные системы перемещений и многокоординатные гибридные привода прямого действия для мехатронных систем параллельной кинематики запатентованы авторами [11–20].

Программируемые движения мехатронной системы параллельной кинематики

Разработанные авторами подходы к построению программируемых движений для мехатронных систем параллельной кинематики реконфигурируемой структуры ниже будут проиллюстрированы на примере системы перемещений «ТриПланар», созданной

в техническом университете г. Ильменау (Германия) при участии НИГ 3.2 «Мехатроника и микросистемы» БГУИР (научный руководитель профессор С. Е. Карпович) и предприятия «Рухсервомотор» (г. Минск).

Система перемещений «ТриПланар» на трех планарных позиционерах (рис. 8) разработана на предложенном механизме параллельной кинематики [3], который обеспечивает перемещение рабочей платформы с инструментом с шестью степенями свободы. Она предназначена для прецизионной обработки фасонных наружных поверхностей, фасонного фрезерования внутренних поверхностей сложных деталей. Система также может быть использована для механической обработки, включая финишную, сферических и асферических линз объективов для генераторов изображений и другого оптико-механического оборудования микро- и нанoeлектроники.

Система перемещений «ТриПланар» включает три планарных позиционера, которые между собой связаны механизмом параллельной кинематики в виде раскрывающегося тетраэдра, состоящего из шарнирных треугольных звеньев. Структурно-кинематическая схема рассматриваемой системы перемещений представлена на рис. 9. При этом треугольные звенья 6, 7, 8 предпочтительно изготавливать, из соображений унификации, в виде одинаковых равносторонних треугольников, а планарные позиционеры 1, 2, 3 использовать серийной стандартной конструкции [3] в проекции на статор 4, представляющий квадратный контур. Планарные позиционеры кинематически связаны с подвижной платформой через механизм параллельной кинематики. Треугольное звено DEF представляет собой подвижную в пространстве платформу, с которой связана подвижная система координат $S_1(x_1, y_1, z_1)$, а неподвижная система координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ связана с неподвижным статором 4.



Рис. 8. Фотография системы перемещений

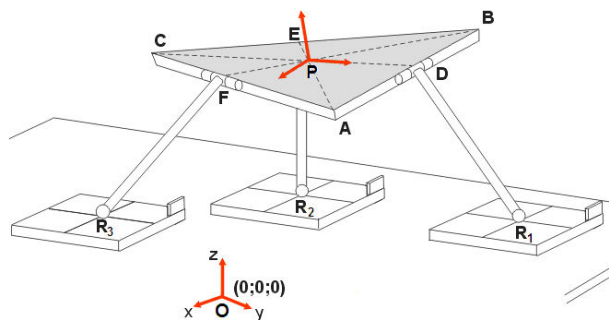


Рис. 9. Структурно-кинематическая схема системы перемещений

К преимуществам системы перемещений, построенной на трех планарных позиционерах, можно отнести: возможность перемещения платформы с шестью степенями свободы; возможность расширения рабочей области за счет увеличения размеров статора; высокая долговечность благодаря использованию магнитно-воздушной опоры; высокие динамические и точностные показатели, включая повторяемость исполнения одинаковых команд; высокая жесткость и одновременно высокая кинематическая гибкость системы.

Для реализации управления системой перемещений по шести независимым координатам, определяющим положение и ориентацию платформы, авторами был предложен аналитический подход [6], на базе которого разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики с использованием инструментов среды MATLAB.

Алгоритмизация математической модели. В среде MATLAB была разработана функция `plat_posit_has.m`, позволяющая формировать задание на перемещение платформы. После ввода пользователем входных параметров движения (траектория, скорость, ускорение) осуществляется цикл расчетов, результатом которых является массив, включающий шесть обобщенных координат положения и ориентации платформы и параметр время. На базе сформированного функцией `plat_posit_has.m` массива координат производится вычисление

текущих ортогональных координат (x, y) каждого из трех планарных позиционеров. Для определения векторов элементарных перемещений для каждого из трех планарных позиционеров на каждом шаге траектории в MATLAB разработана функция `lsm_inverse.m`, позволяющая решать обратную задачу кинематики по предложенному авторами сегментированному алгоритму.

Конечное аналитическое представление вычислительного алгоритма по определению шести линейных ортогональных координат $x_{R_1}, y_{R_1}, x_{R_2}, y_{R_2}, x_{R_3}, y_{R_3}$, определяющих соответствующие положения трех планарных позиционеров в системе координат $S_0(x_0, y_0, z_0)$ плоскости статора, имеют вид:

$$x_{R_1} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{B_1 \frac{y_D A_1^2 - D_1 B_1 - x_D A_1 B_1}{A_1^2 + B_1^2} +}{\frac{A_1 \sqrt{-2y_D D_1 B_1 - (A_1 x_D + B_1 y_D)^2 + (l^2 - z_D^2)(A_1^2 - B_1^2)} - D_1^2 - 2A_1 x_D D_1}{A_1^2 + B_1^2} + D_1} \right);$$

$$y_{R_1} = \left(\frac{B_1 \frac{y_D A_1^2 - D_1 B_1 - x_D A_1 B_1}{A_1^2 + B_1^2} +}{\frac{A_1 \sqrt{-2y_D D_1 B_1 - (A_1 x_D + B_1 y_D)^2 + (l^2 - z_D^2)(A_1^2 - B_1^2)} - D_1^2 - 2A_1 x_D D_1}{A_1^2 + B_1^2}} \right);$$

$$x_{R_2} = \frac{1}{A_2} \left(\frac{B_2 \frac{y_E A_2^2 - D_2 B_2 - x_E A_2 B_2}{A_2^2 + B_2^2} +}{\frac{A_2 \sqrt{-2y_E D_2 B_2 - (A_2 x_E + B_2 y_E)^2 + (l^2 - z_E^2)(A_2^2 - B_2^2)} - D_2^2 - 2A_2 x_E D_2}{A_2^2 + B_2^2} + D_2} \right);$$

$$y_{R_2} = \left(\frac{B_2 \frac{y_E A_2^2 - D_2 B_2 - x_E A_2 B_2}{A_2^2 + B_2^2} +}{\frac{A_2 \sqrt{-2y_E D_2 B_2 - (A_2 x_E + B_2 y_E)^2 + (l^2 - z_E^2)(A_2^2 - B_2^2)} - D_2^2 - 2A_2 x_E D_2}{A_2^2 + B_2^2}} \right);$$

$$x_{R_3} = \frac{1}{A_3} \left(\frac{B_3 \frac{y_F A_3^2 - D_3 B_3 - x_F A_3 B_3}{A_3^2 + B_3^2} +}{\frac{A_3 \sqrt{-2y_F D_3 B_3 - (A_3 x_F + B_3 y_F)^2 + (l^2 - z_F^2)(A_3^2 - B_3^2)} - D_3^2 - 2A_3 x_F D_3}{A_3^2 + B_3^2} + D_3} \right);$$

$$y_{R_3} = \left(\frac{B_3 \frac{y_F A_3^2 - D_3 B_3 - x_F A_3 B_3}{A_3^2 + B_3^2} +}{\frac{A_3 \sqrt{-2y_F D_3 B_3 - (A_3 x_F + B_3 y_F)^2 + (l^2 - z_F^2)(A_3^2 - B_3^2)} - D_3^2 - 2A_3 x_F D_3}{A_3^2 + B_3^2}} \right);$$

где $x_D, y_D, z_D, x_E, y_E, z_E, x_F, y_F, z_F$ – координаты базовых расчетных точек D, E, F платформы соответственно;

$$A_1 = x_B - x_A; B_1 = y_B - y_A; C_1 = z_B - z_A; D_1 = -A_1 x_D - B_1 y_D - C_1 z_D;$$

$$A_2 = x_C - x_B; B_2 = y_C - y_B; C_2 = z_C - z_B; D_2 = -A_2 x_E - B_2 y_E - C_2 z_E;$$

$$A_3 = x_A - x_C; B_3 = y_A - y_C; C_3 = z_A - z_C; D_3 = -A_3 x_F - B_3 y_F - C_3 z_F; B_3 = y_A - y_C.$$

Полученное координатное задание на перемещения планарных позиционеров поступает на контроллер системы управления, в котором оно преобразуется в соответствующие команды управления для силовых драйверов многокоординатного привода.

Динамическая имитационная модель

Построение имитационной динамической модели мехатронных систем перемещений выполняется при помощи встроенной среды Simulink в программный продукт MATLAB с использованием пакетов Simscape Multibody и Simscape Multibody Link, которые позволяют: разрабатывать 3D-модели рассматриваемой системы перемещений в Autodesk Inventor с определенными конструктивными параметрами, определяющими массогабаритные и инерционные характеристики; конвертировать созданную модель в Autodesk Inventor с помощью пакета Simscape Multibody среды Simulink в блочно-модульную схему рассматриваемого механизма параллельной кинематики. Обобщенная блочно-модульная схема имитационной динамической модели представлена на рис. 10.

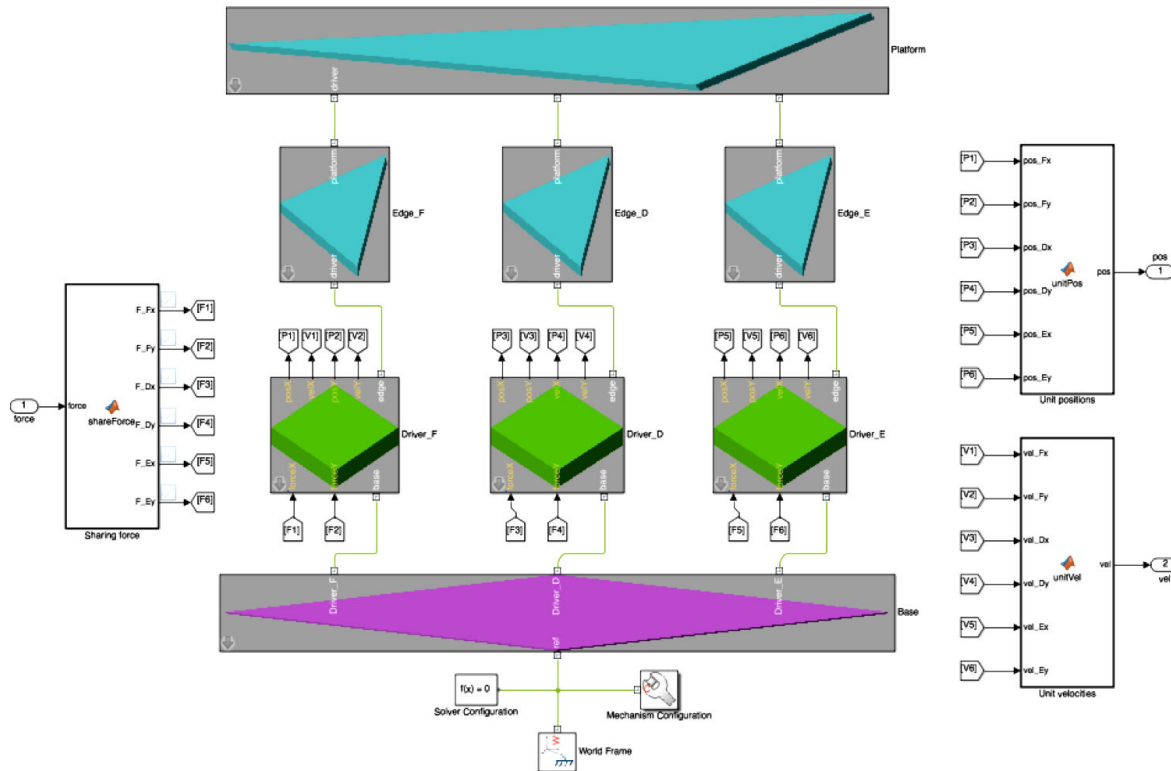


Рис. 10. Обобщенная блочно-модульная схема

Представленная схема включает блок *Sharing force* для подачи массива сил на планарные позиционеры, статор *Base*, планарные позиционеры *Driver_F*, *Driver_D*, *Driver_E*, связывающие элементы *Edge_F*, *Edge_D*, *Edge_E*, представляющие боковые звенья механизма и статор. Боковые звенья, в свою очередь, находятся в непосредственном контакте с рабочей платформой *Platform*.

Таким образом, имитационное моделирование динамики рассматриваемой системы перемещений с шестью степенями свободы может быть выполнено в среде MATLAB/Simulink в соответствии с концепцией моделирования пакета Simscape. Динамическая модель системы реализуется в виде блочно-схемного описания механической структуры с помощью соответствующих функциональных элементов. В процессе моделирования автоматически осуществляется преобразование описания механической структуры физического объекта во внутреннюю эквивалентную математическую модель, построенную на основе уравнений Ньютона-Эйлера. Это значительно упрощает построение и реализацию динамической модели, не требуя непосредственного использования целого ряда дифференциальных уравнений, описывающих механические компоненты системы.

Поддержка интеграции с CAD (Computer-Aided Design) платформами, такими как Autodesk Inventor и SolidWorks, позволяет автоматически импортировать структурно-параметрическое описание модели системы в среду MATLAB/Simulink.

Моделирование управления

Для реализации управления системой перемещений в режиме реального времени на базе инструментария MATLAB Real-Time Workshop создана интерактивная программа управления. В основу создания интерактивного программного обеспечения легли подход быстрого макетирования (Rapid Control Prototyping) и dSPACE система RTI1003 4.3. Интерактивная программа управления, интерфейс которой показан на рис. 11, была реализована на базе ControlDesk и интерфейса mlib.

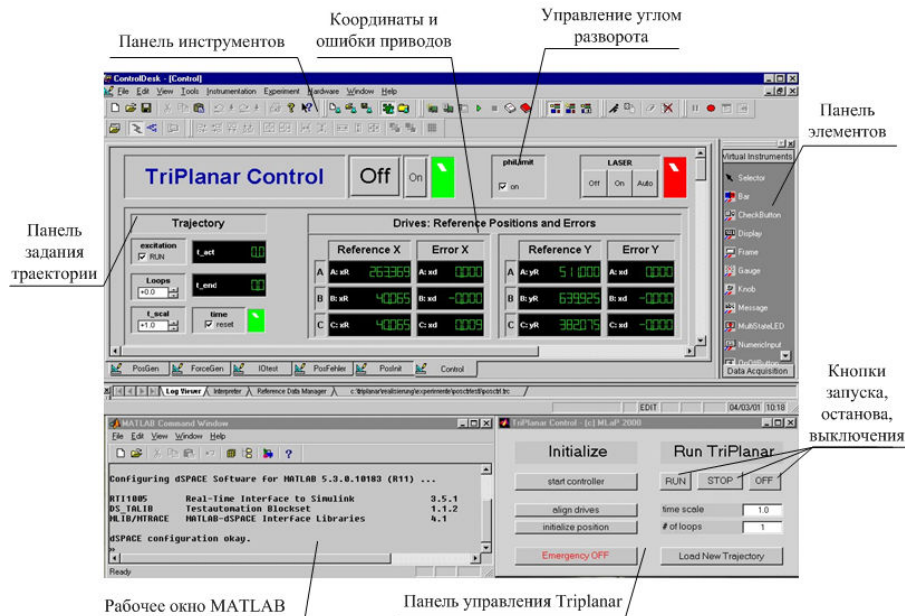


Рис. 11. Интерфейс программы управления

Интерактивная программа управления верхнего уровня формирует управляющие параметры в виде шести координат центра рабочей платформы. Для построения шестикординатного вектора положения платформы в MATLAB была разработана функция *plat_posit_has.m*, позволяющая формировать задание на перемещение для платформы. Реализация этой функции базируется на методах голономных автоматических систем [6]. После ввода пользователем входных параметров движения (траектория, скорость, ускорение) осуществляется цикл расчетов, результатом которых является семимерный массив, включающий шесть координат, три линейных и три угловых положения платформы и время. Укрупненная вычислительная структура формирования задания на перемещение представлена на рис. 12. Разработанная траекторная функция позволяет формировать массивы точек с задаваемой дискретностью до 0,05 мкм. Примеры реализации результатов вычислений функции *plat_posit_has.m* в виде кривых на сфере представлены на рис. 13. Разработан алгоритм параметризации программируемых пространственных перемещений по заданной кривой, на основании которого выполнены решения дифференциальных систем траекторного состояния, позволяющие определять управляющие функции. Разработано программное обеспечение в среде MATLAB для моделирования управления системой перемещений на трех планарных позиционерах с интерактивной визуализацией результатов в реальном режиме времени. Для тестовой визуализации пространственных перемещений как рабочей платформы, так и системы перемещений в соответствии с полученными результатами моделирования в среде MATLAB была разработана программа интерактивной визуализации выполняемых перемещений в режиме реального времени. Интерфейс программы содержит окна задания координат, кнопки трассировки, сохранения результатов в файл, а также запуска моделирования в среде MATLAB. Также в интерфейсном окне программы визуализации выполняется в реальном масштабе времени анимационное отображение системы перемещений и полученных траекторий перемещений планарных позиционеров. Разработанное программное обеспечение управления системой перемещений основано на параметризации сегментированных алгоритмов решения задач кинематики.

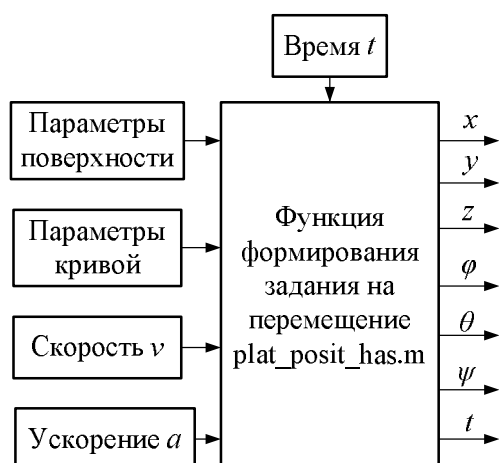


Рис. 12. Укрупненная вычислительная структура

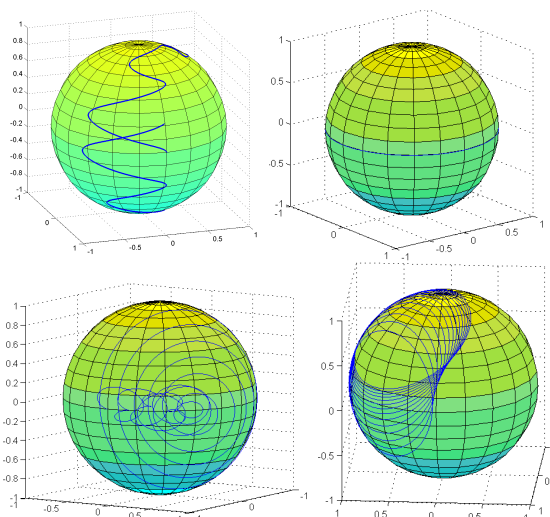


Рис. 13. Результаты траекторных вычислений

Заключение

В статье представлены результаты исследований, полученные в совместной с ГНПО «Планар» учебно-научной лаборатории «Математическое моделирование технических систем и информационных технологий» и НИГ.3.2 «Мехатроника и микросистемы», по дальнейшему развитию концепции построения прецизионных систем перемещений как мехатронных систем параллельной кинематики, реконфигурируемых в зависимости от гибридного многокоординатного привода прямого действия. На основании предложенного подхода к структурному синтезу разработано свыше десяти систем многокоординатных перемещений с числом степеней свободы от 3 до 6 и возможностью управления движением инструмента или заготовки по трем линейным и трем угловым независимым координатам в трехмерном пространстве. Новые технические решения по системам перемещений и гибридным многокоординатным приводам прямого действия защищены патентами Республики Беларусь.

Список литературы

1. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2017. 254 с.
2. Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2013. 254 с.
3. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Бестпринт, 2013. 208 с.
4. Карпович С.Е., Дайняк И.В., Жарский В.В. Программируемые движения в прецизионных системах перемещений. Минск: Бестпринт, 2008. 206 с.
5. Жарский В.В., Карпович С.Е., Дайняк И.В. Привод прямого действия для мотор-колес мобильных систем. Минск: Бестпринт, 2009. 175 с.
6. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Имитационное моделирование голономных и мобильных автоматических систем. Минск: Бестпринт, 2008. 212 с.
7. Аналитическая механика и мехатронные системы перемещений / С.Е. Карпович [и др.]. Минск: Технопринт, 2004. 187 с.
8. Численные методы решения задач на ПЭВМ: в 2 ч. / С.Е. Карпович [и др.]. Ч. 1: Минск: Бестпринт, 2004. 150 с. Ч. 2: Минск: Бестпринт, 2005. 236 с.
9. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники / А.П. Достанко [и др.]. Т. 3. Минск: Бестпринт, 2001. 290 с.
10. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники / А.П. Достанко [и др.]. Минск: Бестпринт, 2011. 216 с.

11. Механизм шагового перемещени: пат. 6986 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Ю.С. Межинский, А.В. Стреха, И.В. Дайняк, Д.А. Степанов; дата публ.: 30.06.2005.
12. Способ микрошагового управления шаговым двигателем и устройство для его осуществления: пат. 7005 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, С.В. Ковалев, И.А. Павлюковский, Ю.С. Межинский, И.В. Дайняк; дата публ.: 30.06.2005.
13. Шаговый двигатель: пат. 9728 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Поляковский, Е.А. Литвинов, В.В. Жарский, Д.Г. Бегун, Н.И. Кекиш, Е.А. Титко, Д.С. Титко; дата публ.: 30.03.2003.
14. Многокоординатный синхронный электродвигатель: пат. 18732 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, В.В. Жарский; дата публ.: 30.12.2014.
15. Манипулятор с шестью степенями свободы на кольцевом сегментном двигателе: пат. 20222 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов, М.А. Ареби; дата публ.: 30.08.2016.
16. Манипулятор параллельной кинематики для реализации прецизионных движений с шестью степенями свободы: пат. 6657 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, Е.А. Литвинов; дата публ.: 30.12.2004.
17. Электродвигатель мотор-колеса: пат. 21634 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Жарский, В.В. Поляковский, Д.С. Титко; дата публ.: 28.02.2018.
18. Механизм параллельной кинематики с тремя степенями свободы: пат. 11671 Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, И.В. Дайняк, В.В. Кузнецов, А.Ю. Войтов, М.М. Форулан; дата публ.: 30.04.2018.
19. Линейный шаговый многокоординатный двигатель: пат. 2956 Респ. Беларусь / В.В. Жарский, С.Е. Карпович, С.Н. Сидорук; дат. публ.: 15.09.1999.
20. Синхронный стержневой мотор: пат. 4760 Респ. Беларусь / В.В. Жарский, В.И. Лазовский, А.И. Михалев, Н.К. Трусов; дата публ.: 30.12.2002.
21. Механизм параллельной кинематики с шестью степенями свободы: пат. Респ. Беларусь / С.Е. Карпович, В.В. Кузнецов, А.Ф. Марко, К.В. Чеушев, В.Н. Нестеренко, Д.С. Титко; дата публ.: 20.12.2018.
22. Математическая модель и алгоритмизация прямой задачи кинематики параллельного манипулятора с шестью степенями свободы / С.Е. Карпович [и др.] // ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 137–143.
23. Карпович С.Е., Салманзадех Г.Й., Жарский В.В. Системы многокоординатных перемещений на механизмах параллельной кинематики // ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 18–22.
24. Кузнецов В.В. Имитационное моделирование динамики параллельного манипулятора на трех планарных позиционерах // ТиПМ. Вып. 33. 2018. С. 287–294.
25. Дайняк И.В., Кузнецов В.В., Поляковский В.В. Управление мехатронными системами перемещений в режиме реального времени ТиПМ. 2018. Вып. 33. С. 86–91.
26. Kuzniatsou V. Computer modeling of kinematics and dynamics of parallel manipulator with six degrees of freedom // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 65–73.
27. Construction of the equations of a motion of coordinate system of the robot on the nonholonomic program / S. Karpovich [et al.] // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 135–143.
28. Кузнецов В.В., Поляковский В.В. Интерактивное управление мехатронной системой перемещений на трех планарных позиционерах // ТиПМ. 2017. Вып. 32. С. 283–292.
29. Кузнецов В.В., Титко Д.С., Бегун Д.Г. Динамическая модель механизма параллельной кинематики с шестью степенями свободы в среде matlab // ТиПМ. Вып. 32. 2017. С. 170–175.
30. Кузнецов В.В. Алгоритмизация и моделирование пространственной системы параллельной кинематики на трех планарных позиционерах // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. 2017. №. 3. С. 309–318.
31. Program motion planning and control for multicoordinate mechanical system / S. Karpovich [et al.]. // Актуальные вопросы машиноведения. 2016. Вып. 5. С. 25–30.
32. Карпович С.Е., Кузнецов В.В. // Алгоритмизация обратной задачи кинематики параллельного манипулятора на шестикординатном линейном шаговом двигателе. Актуальные вопросы машиноведения. 2016. Вып. 5. С. 64–68.
33. Кузнецов В.В., Войтов А.Ю. Кинематика системы перемещений с шестью степенями свободы // Аспирант. 2016. № 1. С. 74–78.
34. Investigation of static and dynamic systems in the maple environment / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P 36–47.
35. Karpovich S., Kuzniatsou V. Simulation of control system of the 6-dof spatial parallel mechanism. Lomza, 2016. P. 83–94.
36. Algorithmization of control functions for realizing of motion program of mechanical system / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P. 63–75.
37. Карпович С.Е., Кузнецов В.В., Форулан М.М. Имитационное моделирование кинематики системы перемещений с интерактивной визуализацией результатов // Докл. БГУИР. 2016. №. 3. С. 22–28.

References

1. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij na mehanizmah paralle'noj kinematiki / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2017. 254 s. (in Russ.)

2. Modelirovanie mehanizmov parallel'noj kinematiki v srede MATLAB/Simulink / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2013. 254 s. (in Russ.)
3. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij i ispolnitel'nye mehanizmy dlja precizionnogo tehnologicheskogo oborudovanija / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2013. 208 s. (in Russ.)
4. Karpovich S.E., Dajnjak I.V., Zharskij V.V. Programmiruemye dvizhenija v precizionnyh sistemah peremeshhenij. Minsk: Bestprint, 2008. 206 s. (in Russ.)
5. Zharskij V.V., Karpovich S.E., Dajnjak I.V. Privod prjamogo dejstvija dlja motor-koles mobil'nyh sistem. Minsk: Bestprint, 2009. 175 s. (in Russ.)
6. Karpovich S.E., Zharskij V.V., Dajnjak I.V. Imitacionnoe modelirovanie golonomnyh i mobil'nyh avtomaticheskikh sistem. Minsk: Bestprint, 2008. 212 s. (in Russ.)
7. Analiticheskaja mehanika i mehatronnye sistemy peremeshhenij / S.E. Karpovich [i dr.]. Minsk: Tehnoprnt, 2004. 187 s. (in Russ.)
8. Chislennye metody reshenija zadach na PJeVM: v 2 ch. / S.E. Karpovich [i dr.]. Ch. 1: Minsk: Bestprint, 2004. 150 s. Ch. 2: Minsk: Bestprint, 2005. 236 s. (in Russ.)
9. Plazmennye processy v proizvodstve izdelij jelektronnoj tehniki / A.P. Dostanko [i dr.]. T. 3. Minsk: Bestprint, 2001. 290 s. (in Russ.)
10. Jelektrofizicheskie processy i oborudovanie v tehnologii mikro- i nanojelektroniki / A.P. Dostanko [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2011. 216 s. (in Russ.)
11. Mehanizm shagovogo peremeshheni: pat. 6986 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, Ju.S. Mezhinskij, A.V. Streha, I.V. Dajnjak, D.A. Stepanov; data publ.: 30.06.2005. (in Russ.)
12. Sposob mikroshagovogo upravlenija shagovym dvigatelem i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija: pat. 7005 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, S.V. Kovalev, I.A. Pavljukovskij, Ju.S. Mezhinskij, I.V. Dajnjak; data publ.: 30.06.2005. (in Russ.)
13. Shagovyj dvigatel': pat. 9728 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Poljakovskij, E.A. Litvinov, V.V. Zharskij, D.G. Begun, N.I. Kekish, E.A. Titko, D.S. Titko; data publ.: 30.03.2003. (in Russ.)
14. Mnogokoordinatnyj sinhronnyj jelektrodvigatel': pat. 18732 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov, V.V. Zharskij; data publ.: 30.12.2014. (in Russ.)
15. Manipuljator s shest'ju stepenjami svobody na kol'cevom segmentnom dvigatele: pat. 20222 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov, M.A. Arebi; data publ.: 30.08.2016. (in Russ.)
16. Manipuljator parallel'noj kinematiki dlja realizacii precizionnyh dvizhenij s shest'ju stepenjami svobody: pat. 6657 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, E.A. Litvinov; data publ.: 30.12.2004. (in Russ.)
17. Jelektrodvigatel' motor-kolesa: pat. 21634 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Zharskij, V.V. Poljakovskij, D.S. Titko; data publ.: 28.02.2018. (in Russ.)
18. Mehanizm parallel'noj kinematiki s tremja stepenjami svobody: pat. 11671 Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, I.V. Dajnjak, V.V. Kuznecov, A.Ju. Vojtov, M.M. Forutan; data publ.: 30.04.2018. (in Russ.)
19. Linejnyj shagovyj mnogokoordinatnyj dvigatel': pat. 2956 Resp. Belarus' / V.V. Zharskij, S.E. Karpovich, S.N. Sidoruk; dat. publ.: 15.09.1999. (in Russ.)
20. Sinhronnyj sterzhnevoj motor: pat. 4760 Resp. Belarus' / V.V. Zharskij, V.I. Lazovskij, A.I. Mihalev, N.K. Trusov; data publ.: 30.12.2002. (in Russ.)
21. Mehanizm parallel'noj kinematiki s shest'ju stepenjami svobody: pat. Resp. Belarus' / S.E. Karpovich, V.V. Kuznecov, A.F. Marko, K.V. Cheushev, V.N. Nesterenko, D.S. Titko; data publ.: 20.12.2018. (in Russ.)
22. Matematicheskaja model' i algoritimizacija prjamoj zadachi kinematiki parallel'nogo manipuljatora s shest'ju stepenjami svobody / S.E. Karpovich [i dr.] // TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 137–143. (in Russ.)
23. Karpovich S.E., Salmanzadeh G.J., Zharskij V.V. Sistemy mnogokoordinatnyh peremeshhenij na mehanizmah parparallel'noj kinematiki // TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 18–22. (in Russ.)
24. Kuznecov V.V. Imitacionnoe modelirovanie dinamiki parallel'nogo manipuljatora na treh planarnyh pozicionerah // TiPM. Vyp. 33. 2018. S. 287–294. (in Russ.)
25. Dajnjak I.V., Kuznecov V.V., Poljakovskij V.V. Upravlenie mehatronnymi sistemami peremeshhenij v rezhime real'nogo vremeni TiPM. 2018. Vyp. 33. S. 86–91. (in Russ.)
26. Kuzniatsova V. Computer modeling of kinematics and dynamics of parallel manipulator with six degrees of freedom // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 65–73.
27. Construction of the equations of a motion of coordinate system of the robot on the nonholonomic program / S. Karpovich [et al.] // Present Day Trends of Innovations 7. Zilina, 2017. P. 135–143.
28. Kuznecov V.V., Poljakovskij V.V. Interaktivnoe upravlenie mehatronnoj sistemoj peremeshhenij na treh planarnyh pozicionerah // TiPM. 2017. Vyp. 32. S. 283–292. (in Russ.)
29. Kuznecov V.V., Titko D.S., Begun D.G. Dinamicheskaja model' mehanizma parallel'noj kinematiki s shest'ju stepenjami svobody v srede matlab // TiPM. Vyp. 32. 2017. S. 170–175. (in Russ.)
30. Kuznecov V.V. Algoritimizacija i modelirovanie prostranstvennoj sistemy parallel'noj kinematiki na treh planarnyh pozicionerah // Izv. Nac. akad. nauk Belarusi. 2017. №. 3. S. 309–318. (in Russ.)

31. Program motion planning and control for multicoordinate mechanical system / S. Karpovich [et al.]. // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2016. Vyp. 5. S. 25–30. (in Russ.)
32. Karpovich S.E., Kuznecov V.V. // Algoritmizacija obratnoj zadachi kinematiki parallel'nogo manipuljatora na shestikoordinatnom linejnom shagovom dvigatele. Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. 2016. Vyp. 5. S. 64–68. (in Russ.)
33. Kuznecov V.V., Vojtov A.Ju. Kinematika sistemy peremeshhenij s shest'ju stepenjami svobody // Aspirant. 2016. № 1. S. 74–78. (in Russ.)
34. Investigation of static and dynamic systems in the maple environment / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P 36–47.
35. Karpovich S., Kuzniatsou V. Simulation of control system of the 6-dof spatial parallel mechanism. Lomza, 2016. P. 83–94.
36. Algorithmization of control functions for realizing of motion program of mechanical system / S. Karpovich [et al.]. Lomza, 2016. P. 63–75.
37. Karpovich S.E., Kuznecov V.V., Forutan M.M. Imitacionnoe modelirovanie kinematiki sistemy peremeshhenij s interaktivnoj vizualizaciej rezul'tatov // Dokl. BGUIR. 2016. №. 3. S. 22–28. (in Russ.)

Сведения об авторах

Карпович С.Е., д.т.н., профессор, лауреат Государственной премии Республики Беларусь, профессор кафедры высшей математики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дайняк И.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры высшей математики Белорусского государственного университета.

Кузнецов В.В., магистрант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Karpovich S.E., D.Sci, professor, winner of the state prize of the Republic of Belarus, professor of high mathematics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Dainiak I.V., PhD, associate professor, associate professor of high mathematics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kuzniatsou V.V., master student of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220040, Республика Беларусь
г. Минск, ул. Гикало, 9
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-672-14-86;
e-mail: mmts@bsuir.by
Карпович Святослав Евгеньевич

Address for correspondence

220040, Republic of Belarus
Minsk, Hicaly st., 9
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-29-672-14-86;
e-mail: mmts@bsuir.by
Karpovich Sviataslau Eugenievich