

КИНЕТОСТАТИКА И КВАЗИСТАТИЧЕСКОЕ УПРУГОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ

Решена прямая задача кинематики для конкретных пространственных параллельных манипуляторов (ППМ) итерационным методом Денавита-Хартенберга. Разработаны методики и подходы, алгоритмические и программные основы исследования квазистатического напряженно-деформированного состояния ППМ.

Робототехника как быстроразвивающаяся отрасль машиностроения связана с созданием и применением манипуляционных роботов. Технический прогресс приводит к необходимости нового подхода в их проектировании. В последнее время созданы пространственные параллельные манипуляторы (ППМ) с подвижными и неподвижными платформами и образованные замкнутыми кинематическими цепями, которые воспринимают больше нагрузок.

ППМ стал интересовать более широкий круг научных, инженерно-технических работников из Канады, Японии, США, Австрии, Китая, Франции и др. [1, 2], занимающихся непосредственной разработкой конструкций и их эксплуатацией. В Казахстане научные труды ученых по ППМ основаны на результатах в области пространственных механизмов высоких классов (МВК) [3–6]. Успехи, достигнутые в этой области, привели к созданию новых типов ППМ [7–8].

Высокие требования при проектировании ППМ приводят к необходимости учитывать упругости звеньев. В данной работе на основе разработанных методик и алгоритмов исследования квазистатики, устойчивости, динамики упругих МВК [9–13] изучается квазистатика упругих ППМ при действии внешних сил, а также решается прямая задача кинематики конкретных ППМ.

Прямая задача кинематики ППМ решается различными методами. В рассматриваемой работе при анализе их кинематики используется итерационный метод Денавита–Хартенберга [14–16], который позволяет осуществить исчерпывающий анализ перемещений любой точки ППМ.

Когда характерные оси движения предыдущей и последующей кинематических пар ППМ

расположены между собой перпендикулярно, геометрию и положение любого звена можно полностью описать четырьмя параметрами (например, механизм Брикарда, рис. 1, а), а для ППМ с произвольным расположением осей движения пар – шестью параметрами (ППМ, рис. 1, б–г) Денавита-Хартенберга [14–16].

Постоянные параметры Денавита-Хартенберга позволяют записать для каждого контура в отдельности символическое уравнение механизма Брикарда (рис. 1, а) для 6 пар, а ППМ (рис. 1, б–г) для 9 кинематических пар.

Запишем матричное уравнение порядка $9\theta(n_{li}-m)$ по определению ошибки $d\theta_{li}$ начальной оценки по отношению к точной величине θ_{li} [15]:

$$\sum_{i=m}^n B_{li} d\theta_{li} \cong I - B_{li}. \quad (1)$$

Здесь

$$B_{li} = A_{l1} \bar{A}_{l2} \bar{A}_{l3} \dots A_{ln}, \quad (2)$$

$$B_{li} = (A_{l1} \bar{A}_{l2} \dots \bar{A}_{l(i-1)} Q_{lab} \bar{A}_{li} \dots \bar{A}_{l(n-1)} A_{ln}) d\theta_{li},$$

m – число обобщенных координат; l – контур; n_{li} – число звеньев в контуре; A_{ln} – матрицы преобразования.

Матричный оператор Q_{lab} порядка $4\theta 4$ в (2) для вращательной пары имеет вид $Q_{113} = -1$, $Q_{132} = 1$ [14]. Остальные элементы этой матрицы равны нулю. Для сферической пары первый оператор идентичен вращательной паре, а остальные два оператора представлены в работах [5, 6].

Углы поворотов ведомых звеньев ППМ определяются при реализации итерационного процес-

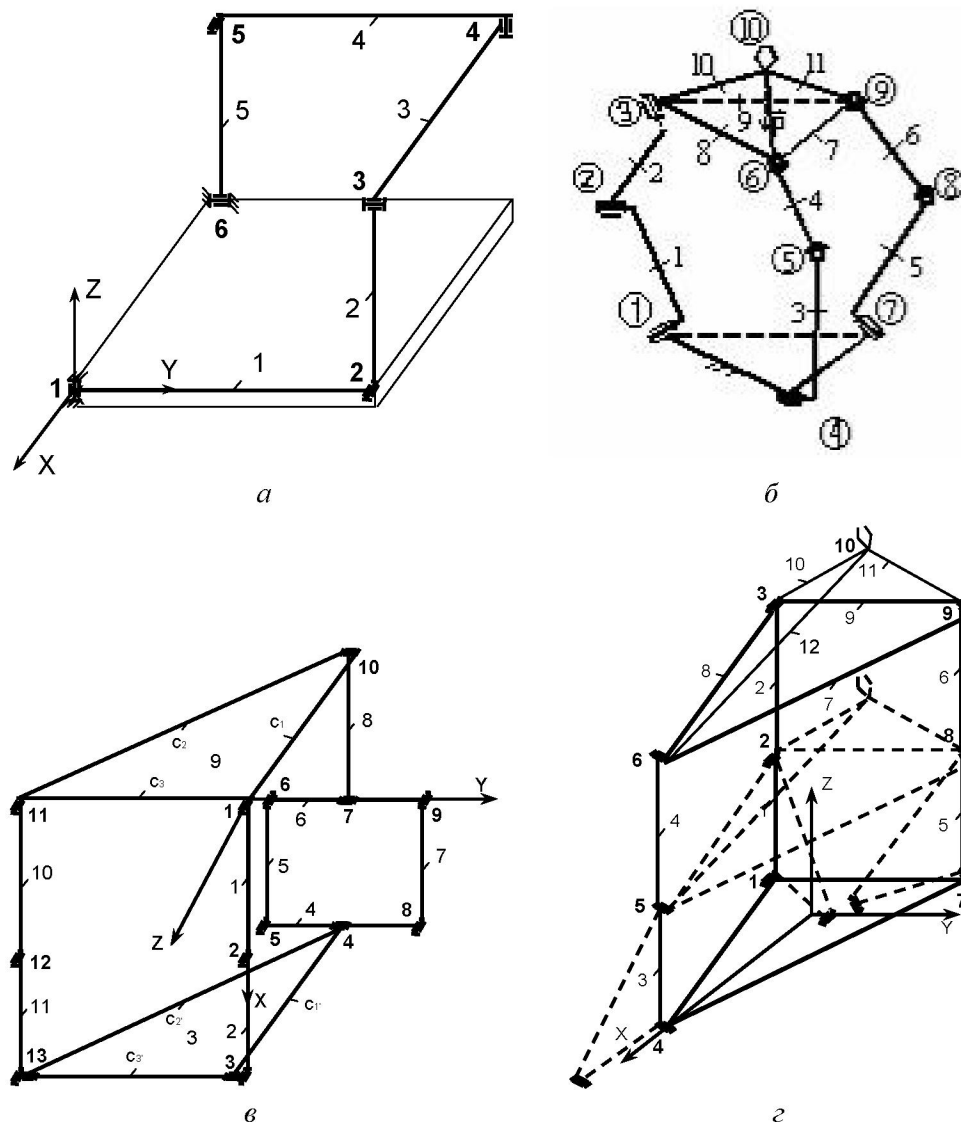


Рис. 1. Пространственные механизмы и параллельные манипуляторы: пространственный механизм Брикарда (а), ППМ позиционирующего типа (б), ППМ с вращательными кинематическими парами (в, г)

са по ошибкам $d\theta_{li}$.

Дифференцируя по времени матричного соотношения произведения матриц преобразования, находим скорости и ускорения точек ППМ.

Для проверки эффективности метода Дена-вита-Хартенберга были составлены программы на ПЭВМ. Они были испытаны при анализе кинематики ППМ (рис. 1) и дали весьма удовлетворительные результаты (рис. 2). По горизонтальной оси отложено время в с, по вертикальной оси – значения кинематических характеристик ППМ в м, м/с, м/с², а также изменения ошибок $d\theta_{li}$ и углов поворота узлов в радианах.

Анализ результатов показывает примени-

мость этого метода для решения кинематики широкого класса ППМ.

Квазистатическое напряженно-деформированное состояние (НДС) ППМ изучается методом конечных элементов (МКЭ), который значительно упрощает сам процесс построения их математической модели, так как в методе имеется ряд процедур построения матриц, описывающих различные свойства его элементов.

Для описания конечно-элементной модели ППМ разбиваем его на элементы, соединенные в узлах через кинематические пары. Для ППМ, состоящих в основном из отдельных стержневых звеньев, такое расчленение является естественным. Узлы ППМ имеют нумерацию в ГСК,

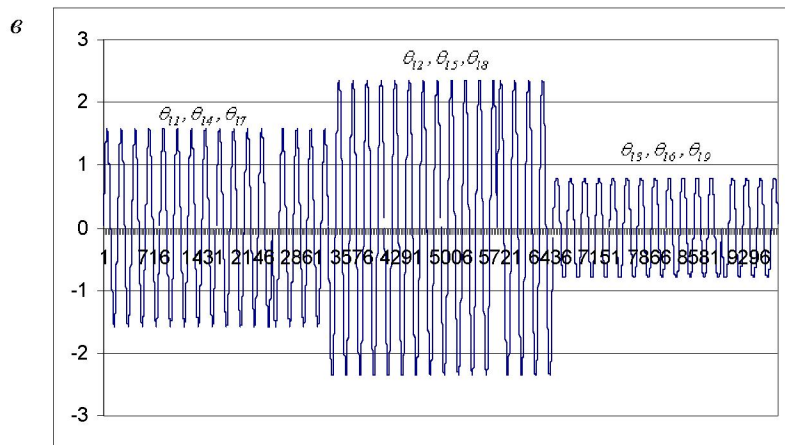
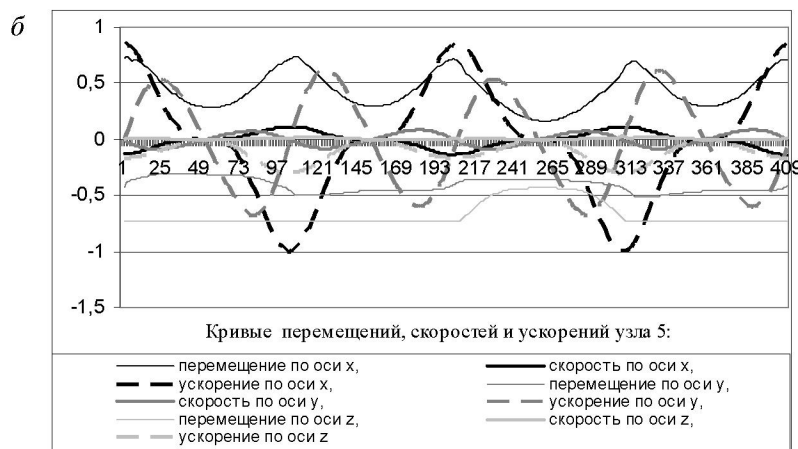
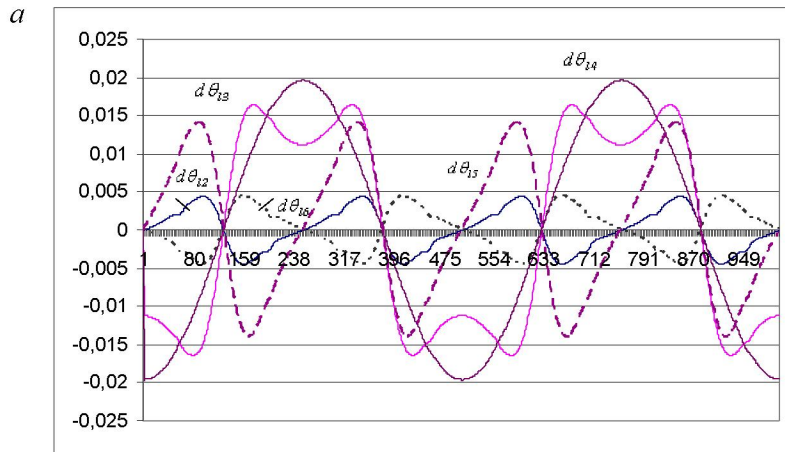


Рис. 2. Кинематические характеристики ППМ: изменения ошибок $d\theta_{ij}$ по времени по отношению к точной величине в механизме Брикарда (*a*), кинематические характеристики, показанной на рис. 1, в ППМ (*б*), изменение углов поворота вращательных кинематических пар показанной на рис. 1, в ППМ по времени (*в*)

элементы имеют свои номера – начальный и конечный.

При конечно-элементном моделировании ППМ (рис. 1, б) разбиваем его на 12 прямолинейных двухузловых стержневых элементов, соединенных между собой в 10 узлах. Элементы на рисунке обозначены арабскими цифрами, узлы обведены кружочками. При конечно-элементном

подходе для других ППМ узлы на рисунках обозначены жирными цифрами.

Составлено уравнение равновесия ППМ в целом

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\}, \quad (3)$$

где $[K]$ – матрица жесткости системы; $\{U\}$ – упругие перемещения в узлах ППМ в глобальной

системе координат (ГСК); $\{F\}$ – внешние силы в узлах.

Для нахождения неизвестных $\{U\}$ в уравнении (3) используются различные модификации итерационного метода Гаусса–Зейделя [18].

Переход от ГСК к локальной системе координат (ЛСК) производится по разработанному алгоритму и находятся реакции, внутренние усилия, напряжения на концах элементов в ЛСК.

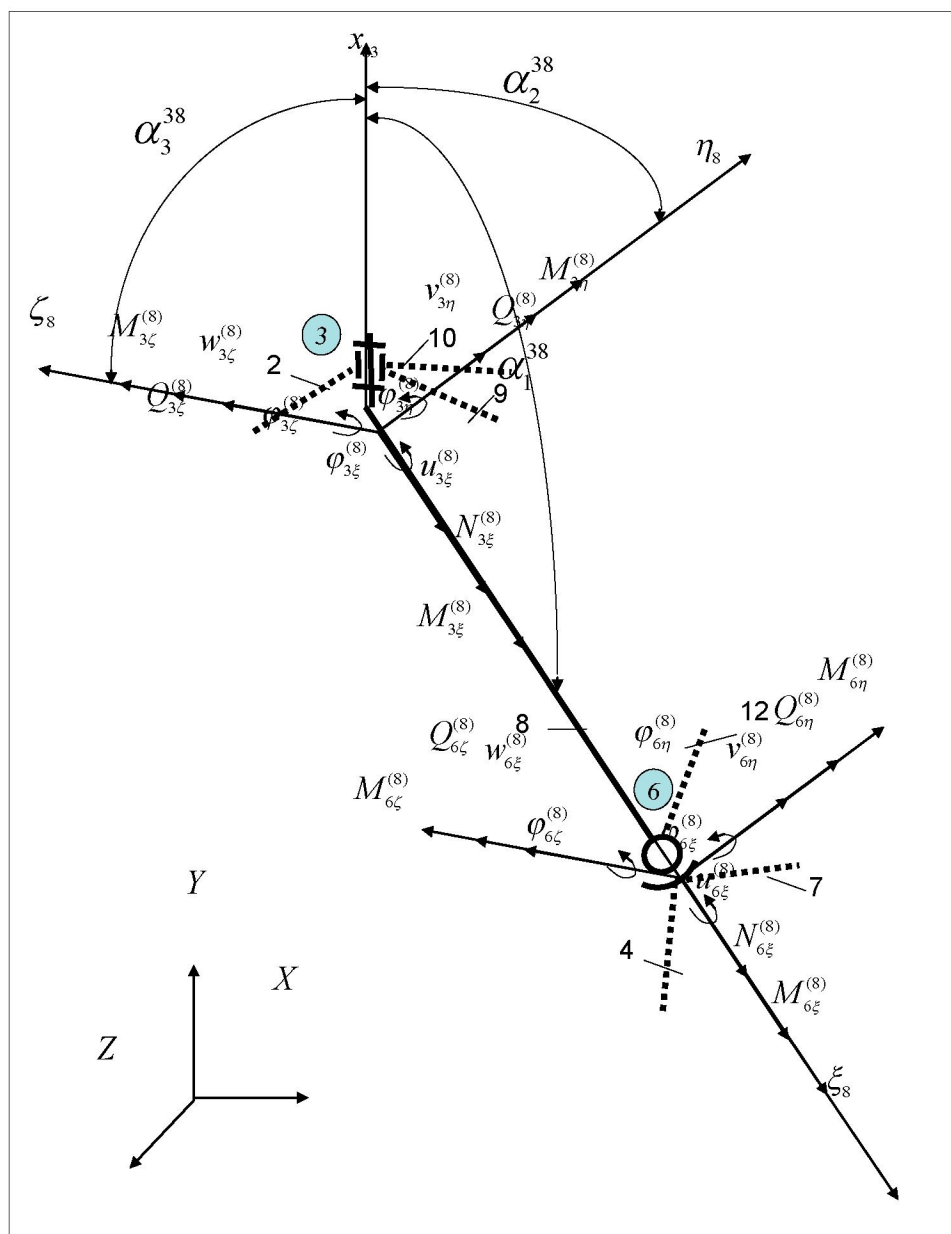
Разработанный алгоритм расчета квазистатики реализован с помощью МКЭ на упругих ППМ (рис. 1).

Кинестатический анализ ППМ (рис. 1, б) проводится под действием статической внешней

силы, приложенной в узле 10. ППМ образован из бинарных звеньев вида ВВ, ВС, СС, где через В и С обозначены вращательная и сферическая кинематические пары [4]. На рис. 3 моделировано бинарное звено вида ВС с указанием положительных направлений упругих перемещений и внутренних усилий. Присоединяемые элементы обозначены штриховыми линиями.

В зависимости от расположения осей вращательных кинематических пар в них появляются те или иные усилия. Постоянные углы между осями вращений вращательных пар и ЛСК обозначены через α_i^{jk} , $i = 1, 2, 3$, где $j = 3, 6$ – начальный и ко-

Рис. 3. Бинарное звено вида ВС



нечный узлы $k = 8$ -го элемента; x_{83} – ось, жестко связанная с осью вращения вращательной пары; $N_{3\xi}^{(8)}, N_{6\xi}^{(8)}, Q_{3\eta}^{(8)}, Q_{6\eta}^{(8)}, Q_{3\zeta}^{(8)}, Q_{6\zeta}^{(8)}, M_{3\xi}^{(8)}, M_{6\xi}^{(8)}$ – внутренние усилия в узловых сечениях.

Другие ППМ (рис. 1, а, в, г) имеют бинарные звенья вида ВВ.

Каждому элементу ППМ присваиваются набор упругих постоянных материала – модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν ; плотность ρ :

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad \rho = 7900 \text{ кг/м}^3, \quad \nu = 0,25. \quad (4)$$

Звенья ППМ изготовлены из стальных стержней диаметром поперечного сечения 0,006 м. Формы и размеры сечения, упругие свойства материалов постоянны. Размерами и конструкцией узлов пренебрегают.

В ППМ (рис. 1, в) ведущими являются звенья 1, 8, 10. Длины звеньев следующие:

$$l_1 = l_8 = l_{10} = 0,3 \text{ м}, \quad l_2 = l_5 = l_7 = l_{11} = l_1 \sqrt{2} \text{ м},$$

$$l_4 = l_6 = 2l_2 \text{ м}, \quad l_9 = l_{c_2} = l_{c_3} = 2l_1 \text{ м}. \text{ В механизме Брикарда ведущим является звено 1. Даны длины звеньев: } l_1 = l_4 = 12,7 \text{ м}, \quad l_2 = l_3 = l_5 = 5,08 \text{ м}.$$

В ППМ (рис. 1, г) входными являются звенья 1, 3, 5. Длины звеньев принимают следующие значения:

$$l_2 = l_4 = l_6 = \sqrt{2} \cdot l_1 \text{ м}, \quad l_7 = l_8 = l_9 = 1,5l_1 / \cos 30^\circ \text{ м}.$$

В реальности материалы звеньев ППМ могут демпфироваться. Матрицу упругого демпфирования определяет для всей системы на основании общей диссипативной энергии по Релею в

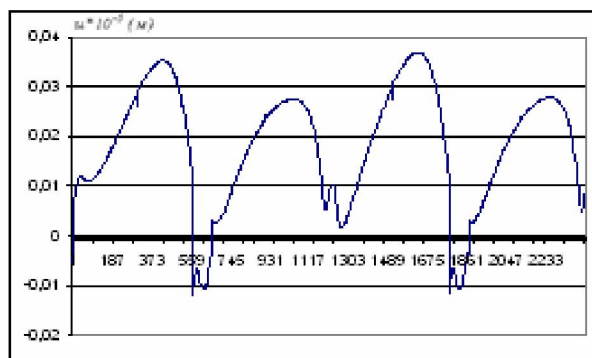
течение действия нагрузки через матрицы масс $[M]$ и жесткости системы $[C] = a[M] + b[K]$ [18]. Основная трудность заключается в определении коэффициентов a, b этой матрицы. В данной работе проведен численный эксперимент для их получения по двум данным значениям коэффициентов демпфирования, относящимся к двум различным частотам колебаний, из решения задачи о собственных значениях [10, 11, 18], которые вычисляются стандартной подпрограммой.

Моделировано уравнение квазистатики с учетом матрицы $[C]$:

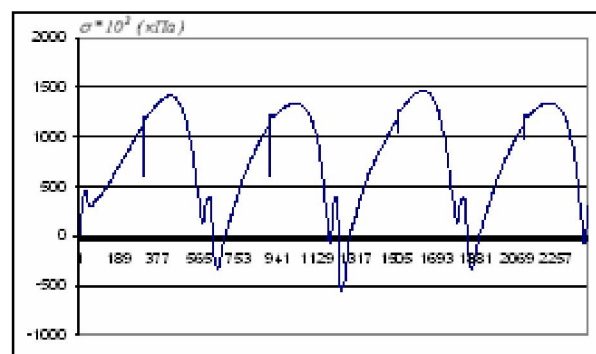
$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F_B\}, \quad (5)$$

Проводится анализ НДС упругих ППМ. Результаты численного расчета квазистатики ППМ (рис. 1, в) при учете упругого демпфирования материалов приведены на рис. 4. По горизонтальной оси отложено время в секундах, по вертикальной оси (рис. 4, а) – значения упругого поперечного перемещения (м) в сечениях наиболее нагруженного 4-го звена, где оно имеет максимальное значение. На рис. 4, б по вертикальной оси отложено значение нормального напряжения в сечении 8-го элемента, где оно имеет свое максимальное значение. В сечениях остальных элементов упругие перемещения и напряжения имеют меньшие величины.

Таким образом, для выбора основных параметров, повышения жесткости звеньев, автоматизации расчета упругих ППМ разработаны механико-математическая модель квазистатики, единые методические, алгоритмические и программные основы исследования НДС с помощью МКЭ. Разработанные методики и подходы ис-



а



б

Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние ППМ, показанное на рис. 1, в

следования кинематики, квазистатики позволяют рассчитать стержневые конструкции и ППМ с различными кинематическими парами. Использование разработанных программных средств и выводов позволяют выявить наиболее нагруженные звенья, наихудшие положения ППМ в пространстве, новые эффекты в закономерностях распределения напряжений, перемещений, усилий, определить оптимальные параметры проектируемых ППМ при различных нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu X., Tang X., Wang J. Singularity Analysis of a New Parallel Manipulator with Revolute Actuators // Proceedings of the XI World IFToMM Congress. 1-4 April, 2004. P. 1977-1981, Tianjin, China.
2. Ottaviano E., Ceccarelli M., Casterelli G. Experimental results of a 3-DOF Parallel Manipulator as an Earthquake motion simulator // Proceedings of the XI World IFToMM Congress. 1-4 April, 2004. P. 1-8, Tianjin, China.
3. Baigunchekov Zh.Zh., Joldasbekov U.A. High Class Spatial Mechanisms. – The Theory of Machines and Mechanisms // Proc. of the 7-th World Congress, 17-22 September, 1987, Sevilla, Spaine. Vol. 1. P. 309-312.
4. Байгунчехов Ж.Ж., Джолдасбеков С.У. Основы структурного, кинематического и динамического анализа пространственных МВК. Алматы, 1994, 148 с.
5. Baigunchekov Zh.Zh., Nurakhmetov B.K., Absadykov B.N., e. a. Kinematics of the Parallel Manipulators with Functionally Independent Drives (Part I, Part II). Proceedings of the 11th World IFToMM Congress. 1-4 April, 2004. P. 1647-1952, Tianjin, China.
6. Baigunchekov Zh.Zh., Nurakhmetov B.K., Absadykov B.N. Kinematic Synthesis of Positioning Parallel Manipulator With Functionally Independent Drives by Quadratic Approximation (Part I, Part II). Proceedings of the International Workshop on Computational Kinematics СК 2005. May 4-6, 2005. Cassino, Italy.
7. Байгунчехов Ж.Ж., Уайт А., Гилл Р., Чанмугам Р. и др. Патент РК. №9429. Исполнительный механизм параллельного манипулятора. Оpubл. 21.05.1999г.
8. Байгунчехов Ж.Ж., Дайжонг Су, Барри Хулл, Мир Насири, Нурахметов Б.К. и др. Патент РК. №11956. Исполнительный механизм ППМ. Оpubл. 19.10.2000г.
9. Масанов Ж.К., Темірбеков Е.С., Биртанов Е.А. Анализ сил и колебаний конструкций механизмов высоких классов пространственной топологии. Деп. в КазГосИНТИ, №6871-КА96. Деп. От 12.04.96г. - 254с.
10. Масанов Ж.К., Байгунчехов Ж.Ж., Сартаев К.З., Абдраимова Г.А. Упругое напряженно-деформированное состояние пространственных параллельных манипуляторов // Материалы II международной конференции «Проблемы механики современных машин». Улан-Удэ, 23-29 июня 2003. Т. 3. С. 59-62.
11. Масанов Ж.К., Абдраимова Г.А. Квазистатическая упругая устойчивость пространственных МВК // Материалы II междуна. конференции «Проблемы механики современных машин». Улан-Удэ, 23-29 июня 2003. Т. 3. С. 62-65.
12. Масанов Ж.К., Елеусинова А.Е., Тулепов А.С. Квазистатика трехмерных МВК с криволинейными упругими звеньями и силами трения в кинематических парах // Вестник КазНУ. Серия математика, механика, информатика. 2002. №2 (30). С.132-138.
13. Масанов Ж.К., Сартаев К., Хаджиева Л.А., Жолдасов С. Конечно-элементная модель движения упругих механизмов // Тр. VI Межд. конф. Санкт-Петербург, Россия. 14-17 июня 2005.
14. Айкер, Денавит, Хартенберг. Итерационный метод анализа перемещений простр. механизмов // Констр. и техн. машиностроения. 1965. №1. С. 169-176.
15. Уйкер мл. Динамика простр. механизмов. Часть I. Точные уравнения движения // Конструирование и технология машиностроения. 1969. №1. С. 264-270.
16. Фу К., Гансалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989. 624 с.
17. Курков С.В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов. СПб.: Политехника, 1991. 224 с.
18. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и МКЭ. М.: Стройиздат, 1982. 447 с.

Резюме

Денавит-Хартенбергтің итерациялық әдісімен нақты кеңістік параллель манипуляторлар (КПМ) кинематикасының тура есебі шығарылды. КПМ-нің квазистатикалық кернеулі-деформациялық күйін зерттеудің әдістемесі, алгоритмі және программалық негізі құрылды.

Summary

The direct problem of kinematics for concrete spatial parallel manipulators (SPM) is solved by iterative method Denavit-Hartenberg. Techniques are developed and approached, algorithmic and program bases of research quasistatic is intense – deformed conditions of elements SPM.

АО «Казахстанско-Британский
технический университет»,
г. Алматы

Поступила 28.09.06г.