

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115

Хуртасенко А.В., Чуев К.В., *Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: rl_bqtu@intbel.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОМОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ И РЕАЛИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены и проанализированы различные варианты конструктивного исполнения роботизированных платформ подвижности (РПП), которые могут быть использованы в составе законченных испытательных стендов и симуляторов для обучения операторов специальной техники. На основе параметризованной имитационной модели (MSC Adams) проведены исследования на предмет оптимального расположения точек крепления шарнирных соединений в верхней подвижной платформе. При этом в качестве критерия оптимизации выбрана минимизация силовых параметров в реакциях соответствующих опор. При исследовании отработывались несколько возможных траектории движения, исследованы различные варианты относительного положения шарниров основания и верхней подвижной платформы РПП, выполнено определение возможностей применения конкретного типоразмера платформы в соответствии с граничными значениями параметров её приводных звеньев для отработки условленных геометрических параметрах траектории. Входными параметрами для тестирования системы управления установлены законы движения приводных звеньев, электроцилиндров. Для рассматриваемых траекторий выполнено исследование и анализ силовых параметров, возникающих в шарнирных опорах при разных базовых диаметрах расположения шарниров основания и верхней подвижной платформы. В качестве исходной оптимальной конфигурации принят вариант с классическим расположением шарниров. Моделирование и поиск наиболее оптимальных вариантов исполнений выполнено на основе разработанной имитационных цифровых модели РПП в системе MSC Adams. Представлены результаты математического и имитационного моделирования.

Ключевые слова: платформа, роботизация, траектория, конфигурация, гексапод, тренажер, моделирование, цифровизация, проектирование.

Введение. В современных отраслях производства: строительстве, машиностроении, авиации все чаще рассматривается применение механизмов, использующих параллельную кинематику [1–5]. В первую очередь это роботы с кинематическими цепями по параллельной схеме. Такие механизмы могут иметь ряд преимуществ: высокие скорость и ускорения, жесткость, полезная нагрузка [6–8].

Подобные механизмы находят широкое применение для решения важных практических задач:

- в качестве испытательной платформы для высокотехнологичного оборудования и компонентов;

- в качестве подвижного основания в тренажерах (симуляторах) обучения управления дорожно-строительной техникой; автомобили, самолёты, корабли, специализированная и военная техника.

- в качестве специализированных платформ удержания положения при движении, для оптических, лазерных, радиолокационных, медицинских, боевых и прочих систем.

Важными и актуальными вопросами являются исследования, связанные с кинематическим

анализом роботизированных платформ подвижности (РПП), которые рассмотрены в работах [9–11].

Цели и задачи исследования. Для обеспечения требуемых траекторий перемещения выходного звена (исполнительного устройства или перемещаемого объекта) необходимо протестировать систему управления РПП, проанализировать возможные конструктивные исполнения. Ещё одной задачей является определение законов управления перемещениями в приводных звеньях (в нашем случае ЭЦ) в соответствии с заданной траекторией перемещения конечного звена (обратная задача кинематики). Анализ вариантов конструктивных исполнений РПП целесообразно проводить по приведенным ниже направлениям с учетом требований топологии общего вида и геометрических размеров:

- наиболее эффективное расположение точек крепления шарнирных опор на верхней подвижной платформе и основании;

- наиболее эффективное относительное (взаимное) расположение шарниров верхней подвижной платформе и шарниров основания.

Метод исследования. Для решения поставленных задач воспользуемся методами имитационного моделирования цифровых моделей, в частности воспользуемся программным комплексом Adams.

Объект исследования. В качестве объекта исследования РПП рассмотрим платформу Гофа-Стюарта, которая так же известна под название гексапод. Данная роботизированная система относится к манипуляторам параллельной структуры, имеет 6 приводных кинематических пар, представленным в виде штанг изменяющийся по длине. При этом гексапод обладает пятью степенями свободы.

Варианты конструктивного исполнения верхней подвижной части платформы РПП. Рассмотрим различные варианты конструктивного исполнения верхней платформы РПП на базе гексапода, [12–19] представленной на рисунке 1.



Рис. 1. Эскизный 3D вид роботизированной платформы подвижности

Проведён анализ особенностей различных компоновочных исполнений при реализации требуемых величин перемещений, которые должна выполнять верхняя подвижная часть платформы. Варианты конструкций по расположению шарнирных опор приведены в таблице 1. Параметры конструкций приведены в таблице 2.

Таблица 1

Конструктивные исполнения по расположению опор РПП

Номер варианта исполнения		
1	2	3

Исследование возможных траекторий движения РПП. Рассмотрим случай, когда все варианты конструкции выполняли одинаковую траекторию при максимальной скорости с приложенной полезной нагрузкой (9810 Н) в соответствии с ТЗ. В соответствии с техническим заданием и целесообразностью длительности исследований время, за которое выполнялось одно элементарное движение принято равным 1 с.

Траекторию можно условно разделить на 5 элементарных движений, показанных в таблице 3 со следующим описанием:

- T0 – исходное положение (ИП) – неподвижное состояние верхней платформы: состояние старта и состояние окончания каждой траектории
- T1 – подвижная платформа совершает параллельное основанию вертикальное движение вдоль оси OY из исходного положения (ИП)
- T2 – параллельное основанию горизонтальное движение вдоль оси OZ из ИП
- T3 – параллельное основанию горизонтальное движение вдоль оси OX из ИП
- T4 - подвижная платформа совершает параллельный основанию поворот вдоль оси OY из ИП
- T5 – основанию поворот вдоль оси OX из ИП

Исследуемые характеристики РПП

Наименование	Обозначение	Значение
Условный диаметр расположения опор основания (мм)	D_d	1800
Условный диаметр расположения опор подвижной платформы (мм)	D_u	1800
Высота платформы (мм)	H	1200
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании (мм)	L_d	100
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе (по вариантам исполнений) (мм)	L_u1	900
	L_u2	450
	L_u3	100

Для идентификации динамических параметров полученных в ходе исследований с помощью

имитационного моделирования введены номерные обозначения шарниров платформы, представленные на рисунке 2.

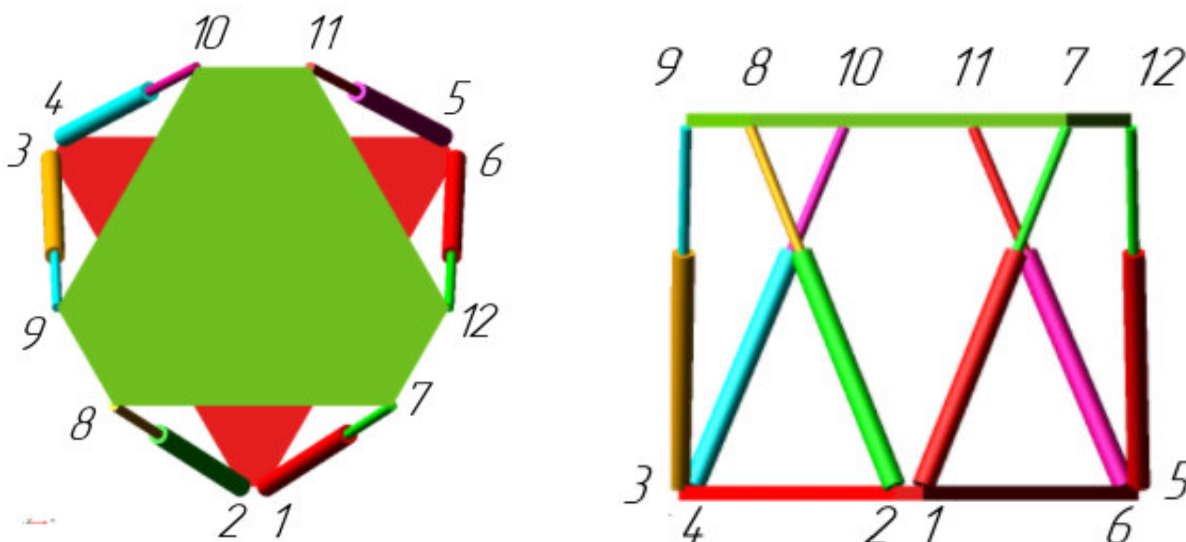


Рис. 2. Принятые обозначения шарниров в структурной схеме РПП: 1,2,3,4,5 и 6 – номера шарниров основания; 7,8,9,10,11, и 12 – номера шарниров верхней подвижной платформы

Предварительные исследования проведены на основе численного моделирования с использованием динамической имитационной модели РПП выполненной в системе MSC Adams.

Полученные результаты силовых характеристик при отработке принятых к исследованию траекторий для всех трех вариантов конструктивных исполнений приведены в таблицах 4 и 5. Графики показывают изменения силовых реакций в шарнирах в течении времени выполнения траектории [20]. Обозначения графиков H2i1, H2i2, H2i3 – соответствуют трем рассмотренным

вариантам конструктивных исполнений верхней подвижной платформы. Кривые FM_M1, FM_M2, FM_M3, FM_M4, FM_M5 и FM_M6 (таблица 4) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рис. 1 номерами 1,2,3,4,5 и 6 – соответственно. Кривые FM_M7, FM_M8, FM_M9, FM_M10, FM_M11 и FM_M12 (таблица 5) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рисунке 2 номерами 7,8,9,10,11 и 12 – соответственно

Таблица 3

Виды движений в траектории верхней платформы

Обозначение вида движения	Графическая интерпретация	
T0		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		

Таблица 4

Изменения величин силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к основанию при 3х конструкциях РПП

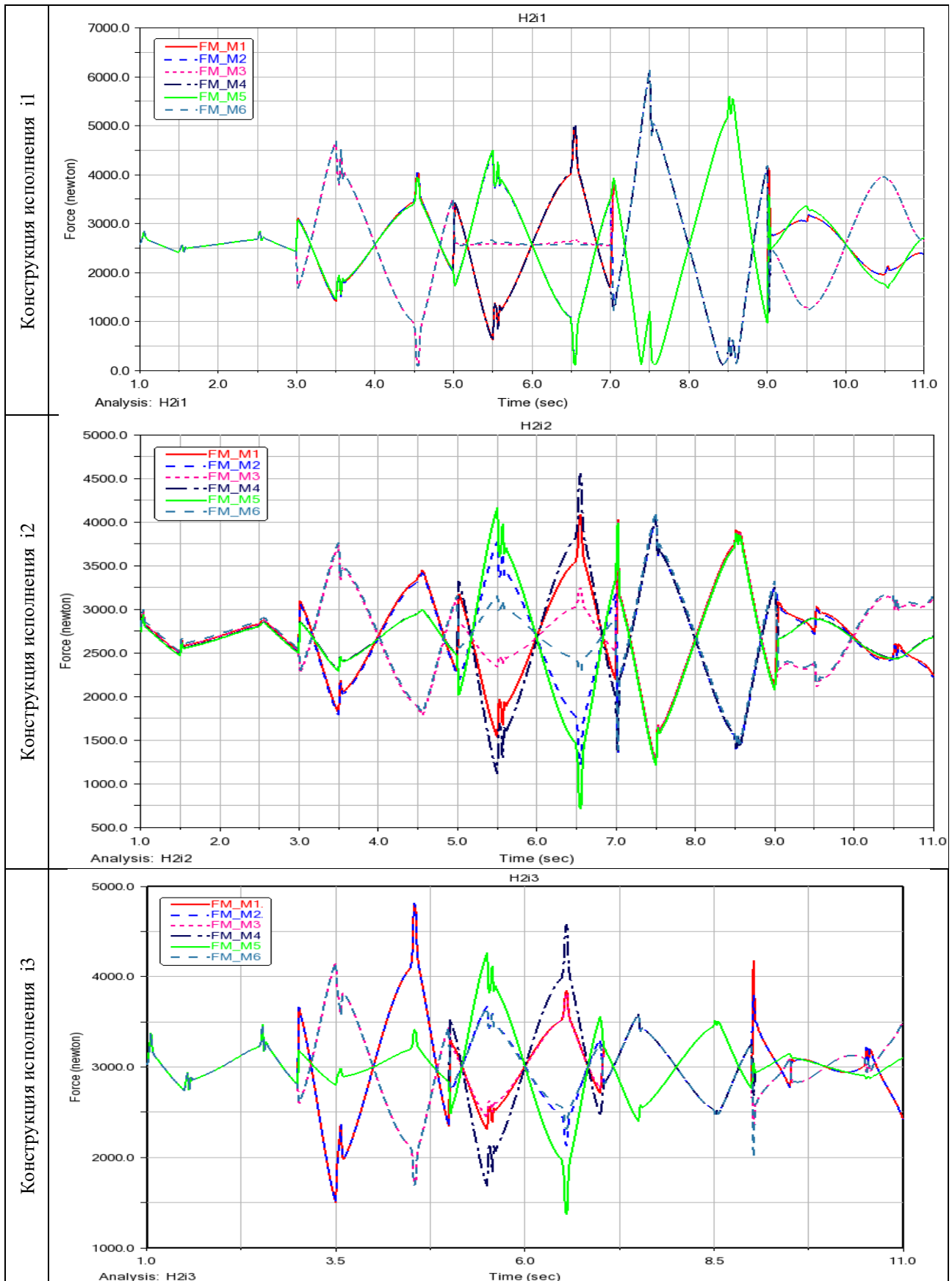


Таблица 5

Реакции в точках крепления шарниров ЭЦ к подвижной платформе при 3х конструкциях РПП

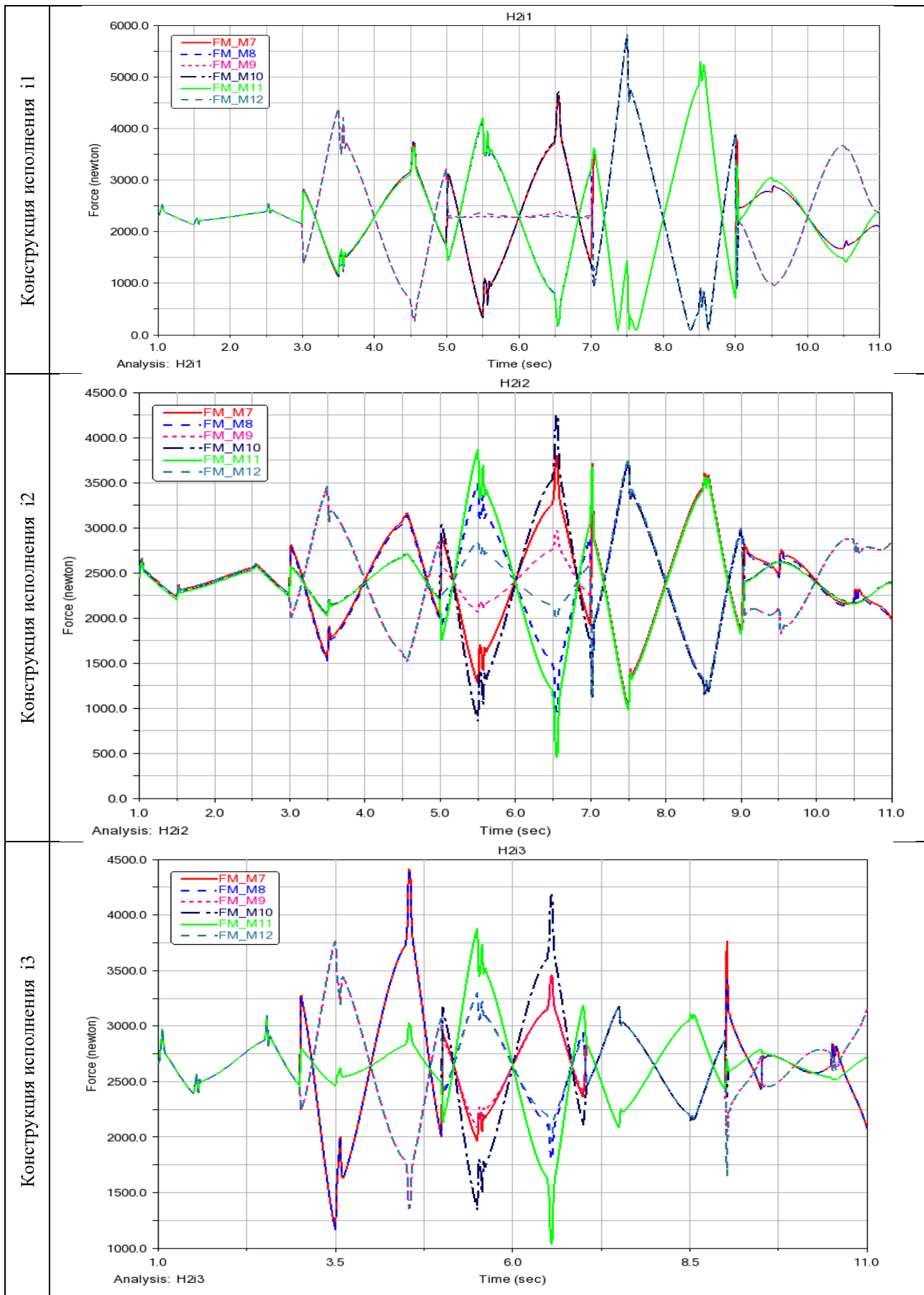


Таблица 6

Пиковые значения суммы сил в шарнирах, Н

Конструктивное исполнение	Обозначение шарнира					
	Нижнее основание					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
i1	5609	6142	5609	6142	5609	6142
i2	4087	4048	3998	4550	4160	4116
i3	4813	4813	4153	4575	4268	4153
	Верхняя подвижная платформа					
	M7	M8	M9	M10	M11	M12
	i1	5297	5826	5297	5826	5297
i2	3799	3743	3693	4261	3875	3779
i3	4418	4418	3770	4185	3884	3770

На основе параметризованной имитационной модели (MSC Adams) проведены исследования на предмет оптимального расположения точек крепления шарнирных соединений на подвижной платформе [15–20].

Исследования вариантов относительного положения шарниров основания и верхней подвижной платформы РПП.

Рассмотрим дополнительно 3 исполнения конструкции РПП, конструктивные исполнения и характеристики каждого из вариантов для исследования по второму направлению представлены таблицами 7 и 8.

Таблица 7

Конструктивные исполнения по взаимному расположению верхних и нижних опор РПП

Об-е	Варианты конструктивных исполнений	
H2i4		
H2i5		
H2i6		

В таблице 8 приведен параметры элементов конструкции РПП которые использовались при нахождении наиболее оптимальных вариантов

исполнений. Имитационно моделирование цифровой модели выполнялось в программной среде MSC Adams.

Таблица 8

Характеристики исполнений РПП

Схема конструкция РПП	Наименование	Обозначение	Значение
	Диаметр основания по вариантам исполнений (мм)	D_d4	1900
		D_d5	2000
		D_d6	2000
	Диаметр подвижной платформы (мм)	D_u4, D_u5	1800
		D_u6	1600
	Высота подвижной платформы в среднем положении (мм)	H	1200
	Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании (мм)	L_d	100
Расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе (мм)	L_u2	450	

Полученные результаты силовых характеристик при обработке траекторий для принятых к исследованию конструктивных исполнений приведены в таблицах 9 и 10.

Графики показывают изменения силовых реакций в шарнирах в течении времени. Обозначения графиков H2i4, H2i5, H2i6 соответствуют рассмотренным вариантам конструктивных исполнений для различных диаметральных положений шарнирных опор верхней подвижной платформы и основания. Кривые FM_M1, FM_M2, FM_M3, FM_M4, FM_M5 и FM_M6 (таблица 9) показывают изменения величины силовых реакций в шарнирах, обозначенных на рисунке 1.1 номерами 1,2,3,4,5 и 6 – соответственно. Кривые FM_M7, FM_M8, FM_M9, FM_M10, FM_M11 и FM_M12 (таблица 10) показывают изменения величины силовых реакций в

шарнирах, обозначенных на рисунке 1.1 номерами 7,8,9,10,11 и 12 – соответственно.

При моделировании выполнялся анализ величин перемещений в ЭЦ требуемых для реализации размерных параметров обрабатываемых траекторий. Интерпретация данных о перемещениях в ЭЦ для исполнения H2i4 представлена графиками на рисунке 3. Обозначения MM17, MM28, MM39, MM40, MM51, MM52 соответствуют отдельным ЭЦ соединяющим опорные точки на верхней подвижной платформе и основании. Анализ графиков показывает, что величины перемещений в штоках ЭЦ соответствуют заданным пределам и адекватно согласуются при обработке всех участков заданной в исследованиях траектории. Графики перемещений для исполнений H2i5, H2i6 имеют такой же характер.

Таблица 9

Изменения силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к основанию для рассматриваемых исполнений конструкций РПП

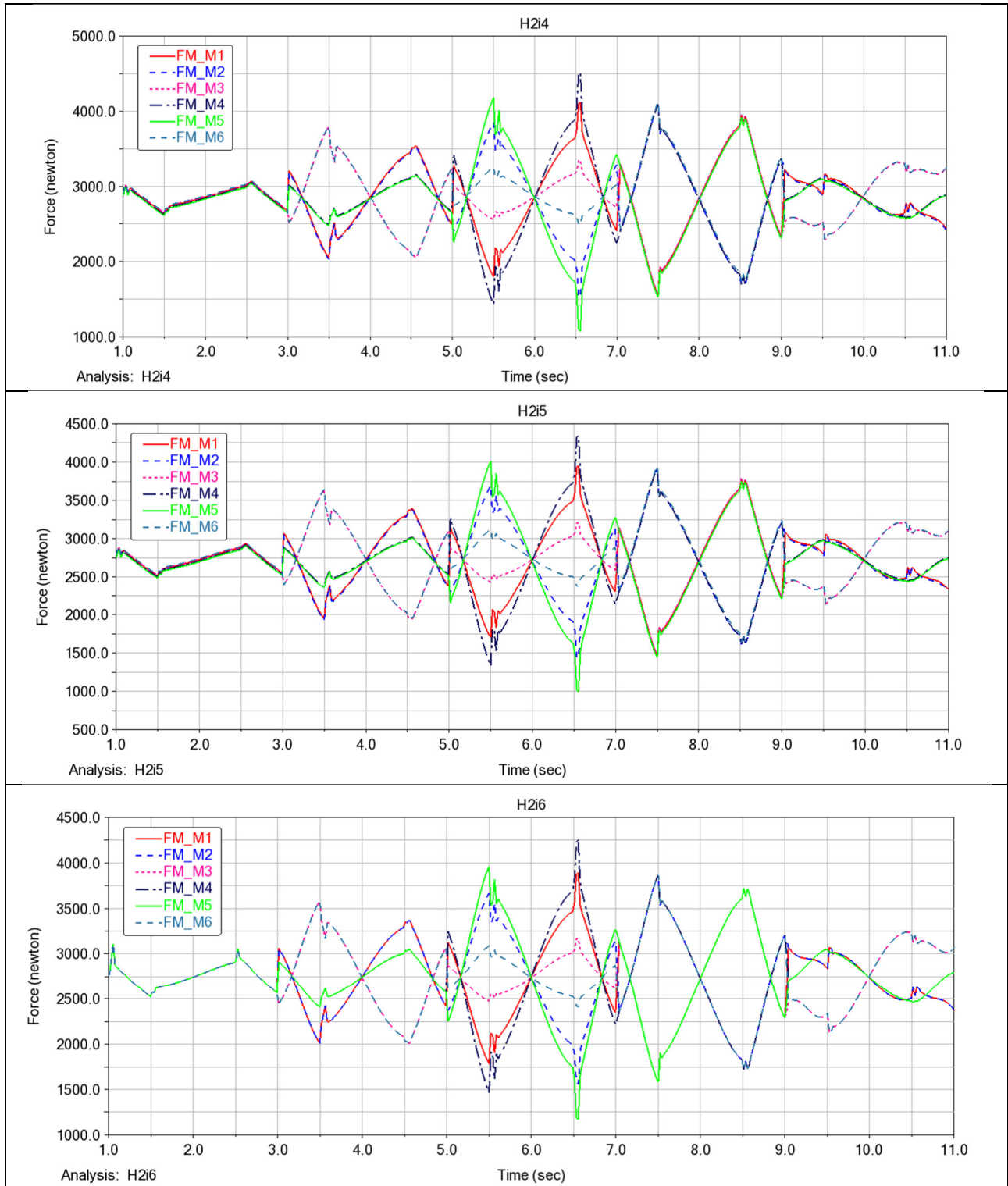
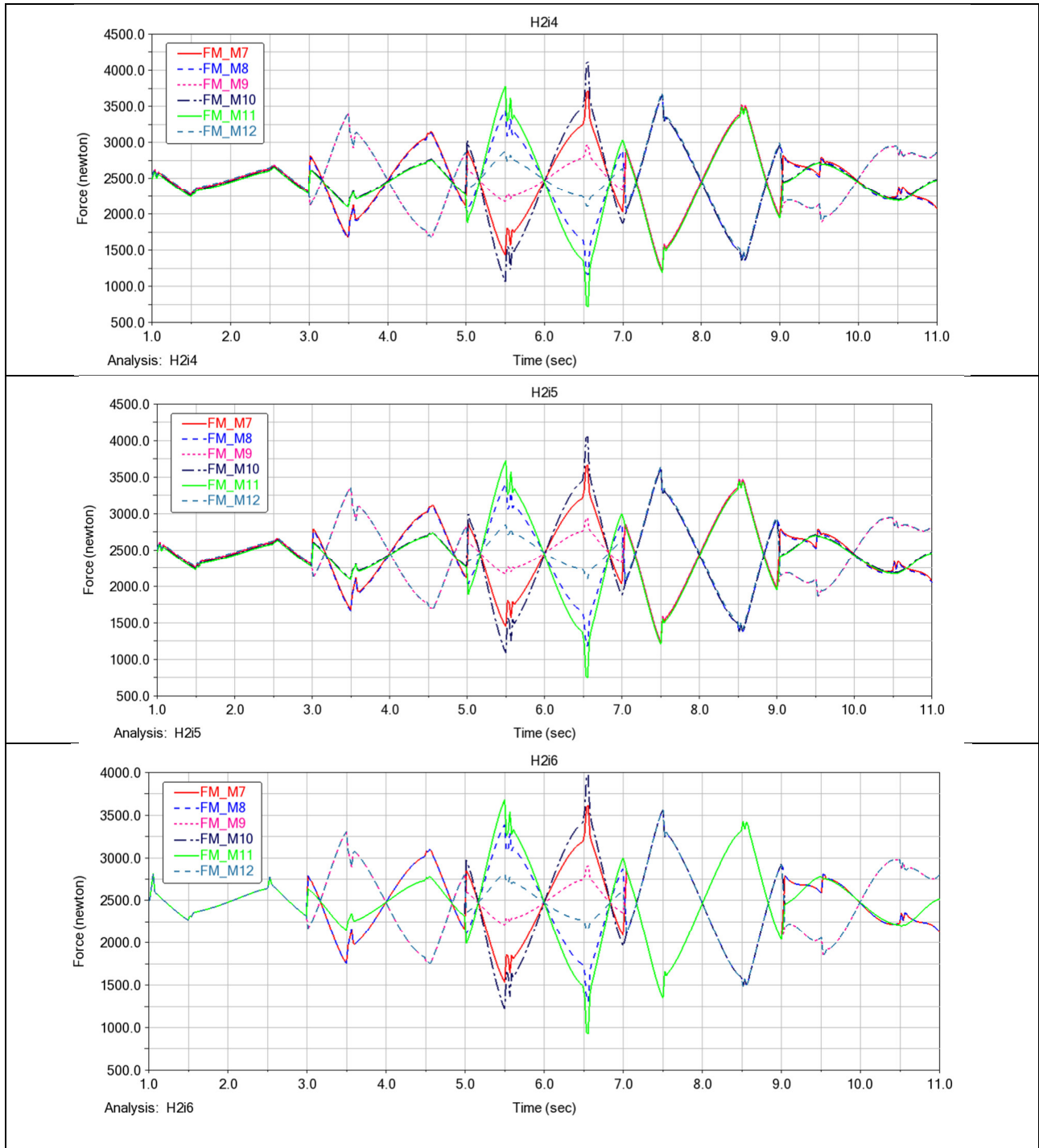


Таблица 10

Изменения силовых реакций в точках крепления шарниров ЭЦ к подвижной платформе для рассматриваемых исполнений конструкций РПП



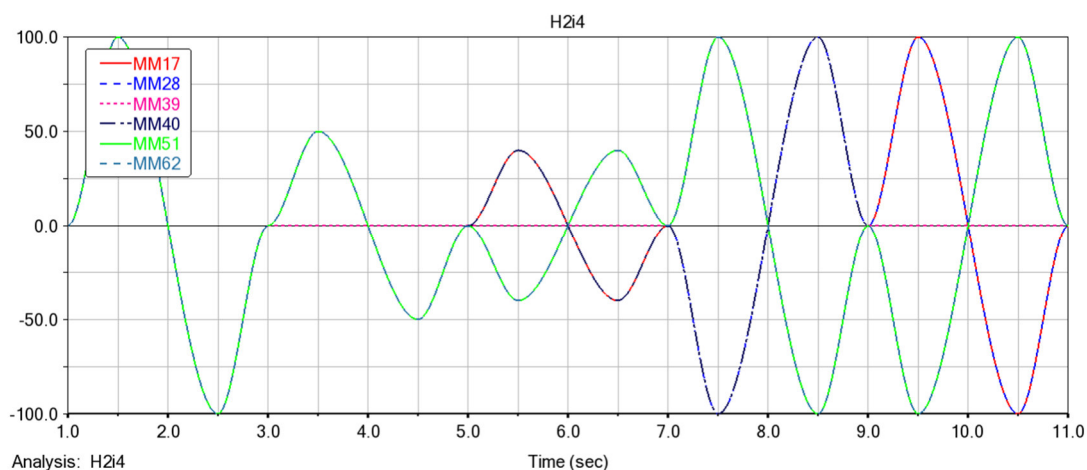


Рис. 3. Величины перемещений штоков ЭЦ для исполнения H2i5 конструкций РПП.

Таким образом, в ходе исследований были рассмотрены все варианты предложенных исполнений, которые обоснованы с точки зрения необ-

ходимых геометрических параметров, кинематических возможностей и динамических характеристик РПП. Варианты рассмотренных конструктивных исполнений приведены в табл. 11.

Таблица 11

Параметры вариантов конструктивных исполнений РПП

Основные параметры конструкции	Обозначение исполнений					
	H2i1	H2i2	H2i3	H2i4	H2i5	H2i6
D _d , мм	1800	1800	1800	1900	2000	2000
D _u , мм	1800	1800	1800	1800	1800	1600
H, мм	1200	1200	1200	1200	1200	1200
L _d , мм	100	100	100	100	100	100
L _u , мм	900	450	100	450	450	450

Обозначения параметров: D_d – диаметр основания; D_u – диаметр подвижной платформы; H – высота подвижной платформы; L_d – расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на основании; L_u – расстояние между шарнирами, на которых закреплены ЭЦ на подвижной платформе.

Заключение. В результате исследований определена оптимальная конфигурация платформы РПП, когда опоры располагаются регулярно по окружности с округленными значениями шагов между смежными теоретическими точками шарниров равными 450 и 1284 мм. Данным параметрам соответствует 2 вариант исполнения конструкции (исполнение i2). Такая конструкция обеспечивает наименьшие значения силовых реакций во всех шарнирах, как на неподвижной, так и на подвижной платформе (табл. 6). Округления величин шагов до целых значений практически не влияет на силовые характеристики в опорах для рекомендованного варианта конструкции.

Результаты исследования выявили наиболее рациональную конфигурацию платформы. Параметры данной конфигурации: диаметр неподвижной платформы, на которой расположены шарниры равен 2000мм, диаметр подвижной плат-

формы при расположении «спаренных» шарниров на расстояниях 1600 до 1800 составляет 450 мм, что составляет 8–9 % от длины окружности расположения (для расчетов при проектировании конструкций целесообразно использовать соотношение $L/D_u=1/3,5...4$, где L – расстояние между опорными точками «спаренных» шарниров, D_u – диаметр окружности расположения опорных точек верхней подвижной платформы

Наиболее рациональным соотношением между величинами базовых диаметров расположения шарнирных опор на нижнем основании (D_d) и верхней подвижной опоре (D_u) при фиксированной высоте платформы 1200 мм является соотношение, равное 1,25. Для реализации конструкций с различным исполнением шарнирных соединений могут потребоваться уточнения размерных параметров и конструктивных особенностей.

Исходя из того, что на всех участках траекторий, рассмотренных в исследовании наблюдаются перемещения в ЭЦ (работоспособность ЭЦ), т.е. при перемещении центра масс в любую точку рабочего пространства в каждый момент времени все ЭЦ обеспечивают достаточное количество степеней свободы, можно сделать вывод о работоспособности всех рассматриваемых конфигураций.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-11-2021-060 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства роботизированных 6DOF платформ подвижности для тренажеров и симуляторов для авиационной и ракетно-космической отрасли» (уникальный номер 000000S407521QLB0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi:10.1007/978-3-540-71990-8
2. Merlet J.-P. Parallel Robots. Berlin: Springer. 2007. 402 p.
3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity // IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327. 042092. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042092
4. Чуринов В.В. Использование компьютерных тренажеров для подготовки рабочих дорожно-строительных профессий // Молодой ученый. 2011. Т.3. № 4. С. 28–29.
5. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace // Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020, pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0_3.
6. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy // Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606. doi:10.1007/s00170-007-1360-x
7. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators // IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25. doi:10.1109/TRO.2004.833801
8. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process // Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169. doi:10.1177/0954406212444508
9. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm // IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335. doi:10.1109/ICMA.2006.257695
10. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms // Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi:10.1017/S0263574706003080
11. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms // CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14-17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99.
12. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 209–225. doi:10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68
13. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. Pp. 626–632. doi:10.3103/S1052618815070122
14. Белякова А.В., Савельев Б.В. Анализ информационных моделей тренажеров для обучения водителей транспортных средств (обзор) // Вестник СибАДИ. 2019. № 16(5). С. 558–571.
15. Воронин А.В., Шпякин И.К. Моделирование кинематической модели гексапода в программных комплексах MATLAB SIMULINK и CATIA // X Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии» (13-14 ноября, 2012, г. Томск, Россия). 2012. С. 261–263.
16. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Мороз А.В. Имитационная модель цифровой системы управления гексаподом с линейными приводами на базе шаговых двигателей // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 35–41.
17. Сапунов Е.А., Прошин И.А. Моделирование привода динамического стенда авиационного тренажера // Авиационно-космическое машиностроение. 2011. С. 337–340.
18. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator // Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15.
19. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures // ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics

and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179. doi:10.1007/978-3-319-78963-7_23

20. Коротков Е.Б., Матвеев С.А., Яковенко Н.Г. Пути повышения качественных показателей системы управления механизмом с параллельной

структурой (гексапод, трипод) на базе российских и мировых доступных электронных компонентов // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 8. С. 85–91.

Информация об авторах

Хуртасенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технология машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чуев Кирилл Витальевич, зав. лаб. кафедры технология машиностроения. E-mail: kirill.chuev@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Волошкин Артем Александрович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чередников Игорь Иванович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Гаврилов Дмитрий Владимирович, инженер-исследователь, аспирант, кафедры технология машиностроения. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.12.2021 г.

© Хуртасенко А.В., Чуев К.В., Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В., 2022

*Hurtasenko A.V., Chuev K.V., *Voloshkin A.A., Cherednikov I.I., Gavrilov D.V.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: rl_bqtu@intbel.ru*

OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF ROBOTIC PLATFORMS AND IMPLEMENTATION OF THE TRAJECTORY OF MOTION

Abstract. The article discusses and analyzes various options for the design of robotic mobility platforms (RMP), which can be used as part of complete test benches and simulators for training operators of various equipment. Various trajectories of movement of the mobile platform of the RMP are considered. Investigations have been carried out based on a parameterized simulation model (MSC Adams) to determine the optimal location of the attachment points of the joints in the upper movable platform. Minimization of the force parameters in the reactions of the corresponding supports was chosen as an optimization criterion in this case. All the accepted trajectories were worked out during the investigation. Various options of the relative position of the joints of the base and the upper movable platform of the RMP have been investigated. Similarly, for the selected trajectories, an investigation and analysis of the force parameters arising in the joints at different main diameters of the location of the base and upper movable platform joints were carried out. As the initial optimal configuration, a variant with the location of hinged supports was adopted. Modeling and search for the most optimal execution options are carried out based on the developed digital simulation model of the RMP in the MSC Adams system. The results of mathematical and simulation modeling are presented.

Keywords: platform, robotization, trajectory, configuration, hexapod, simulator, modeling, digitalization, design.

REFERENCES

1. Kong H., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. H. Kong, C.M. Gosselin. Berlin: Springer. 2007. 276 p. doi:10.1007/978-3-540-71990-8

2. Merlet J.-P. Parallel Robots, 2nd ed. J.-P. Merlet. Berlin: Springer. 2007. 402 p.

3. Rybak L., Khalapyan S., Gaponenko E. Issues of planning trajectory of parallel robots taking into account zones of singularity. IOP Conference

Series-Materials Science and Engineering. 2018. No. 327: 042092. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042092

4. Churin V.V. The use of computer simulators for training workers in road-building professions [Ispol'zovaniye komp'yuternykh trenazherov dlya podgotovki rabochikh dorozhno-stroitel'nykh professiy]. Young Scientist. 2011. Vol. 3. Iss. 4. Pp. 28–29. (rus)

5. Rybak L., Malyshev D., Gaponenko E. Optimization algorithm for approximating the solutions set of nonlinear inequalities systems in the problem of determining the robot workspace. Advances in Optimization and Applications. OPTIMA 2020. Communications in Computer and Information Science, volume 1340, Springer, Cham, 2020. Pp. 27–37. doi:10.1007/978-3-030-65739-0_3.

6. Liu X.-J., Wang J., Oh K.-K., Kim J. A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2004. Vol. 39. Iss. 2. P. 209–225. doi:10.1007/s00170-007-1360-x

7. Rashoyan G.V., Lastochkin A.B., Glazunov V.A. Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. Iss. 7. P. 626–632. doi:10.1109/TRO.2004.833801

8. Belyakova A.V., Savelyev B.V. Analysis of information models of simulators for training drivers of vehicles (review) [Analiz informatsionnykh modeley trenazherov dlya obucheniya voditeley transportnykh sredstv (obzor)]. Bulletin of SibADI. 2019. No. 16 (5). Pp. 558–571. doi:10.1177/0954406212444508 (rus)

9. Voronin A.V., Shpyakin I.K. Modeling the kinematic model of a hexapod in the MATLAB SIMULINK and CATIA software complexes [Modelirovaniye kinematicheskoy modeli geksapoda v programmnykh kompleksakh MATLAB SIMULINK i CATIA]. X International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies" (November 13-14, 2012, Tomsk, Russia). 2012. Pp. 261–263. doi:10.1109/ICMA.2006.257695 (rus)

10. Zhukov Yu.A., Korotkov E.B., Moroz A.V. A simulation model of a digital control system for a hexapod with linear drives based on stepper motors [Imitatsionnaya model' tsifrovoy sistemy upravleniya geksapodom s lineynymi privodami na baze shagovykh dvigateley]. Radio electronics issues. 2017. No. 7. Pp. 35–41. doi:10.1017/S0263574706003080 (rus)

11. Sapunov E.A., Proshin I.A. Simulation of the drive of the dynamic stand of the aviation simulator [Modelirovaniye privoda dinamicheskogo stenda aviatsionnogo trenazhera]. Aviation-Space Engineering. 2011. Pp. 337–340. (rus)

12. Zabalza I., Ros J., Gil J., Pintor J.M., Jimenez J.M. TRI-SCOTT. A New Kinematic Structure for a 6-DOF Decoupled Parallel Manipulator. Proceedings of Workshop on 96 Fundamental Issues and Future Directions for Parallel Mechanics and Manipulators (October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada) 2002. Pp. 12–15. doi:10.1023/B:JINT.0000015403.67717.68

13. Brinker J., Schmitz M., Takeda Y., Corves B. Dynamic Modeling of Functionally Extended Delta-Like Parallel Robots with Virtual Tree Structures. ROMANSY 22 – Robot Design, Dynamics and Control. Springer, Cham, 2018. Pp. 171–179.

14. Korotkov E.B., Matveev S.A., Yakovenko N.G. Ways to improve the quality indicators of the control system for a mechanism with a parallel structure (hexapod, tripod) based on Russian and world accessible electronic components [Puti povysheniya kachestvennykh pokazateley sistemy upravleniya mekhanizmom s parallel'noy strukturoy (geksapod, tripod) na baze rossiyskikh i mirovykh dostupnykh elektronnykh komponentov]. Questions of radio electronics. 2016. No. 8. Pp. 85–91. (rus)

15. Parikh P.J., Lam S.S. Solving the forward kinematics problem in parallel manipulators using an iterative artificial neural network strategy. Int J Adv Manuf Technol. 2009. Vol. 40. Pp. 595–606.

16. Parikh P.J., Lam S.S. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators. IEEE Trans Rob. 2005. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 18–25.

17. Liu S., Li W., Du Y. Forward kinematics of the Stewart platform using hybrid immune genetic algorithm. IEEE international conference on mechatronics and automation, (June 25–28, 2006, Luoyang, China). 2006. Pp. 2330–2335.

18. He J., Gu H., Wang Z. Solving the forward kinematics problem of six-DOF Stewart platform using multi-task Gaussian process. Journal of Mechanical Engineering Science. 2013. Vol. 227. Iss. 1. Pp. 161–169.

19. Wang Y.F. A direct numerical solution to forward kinematics of general Stewart-Gough platforms. Robotica. 2007. Vol. 25. Pp. 121–128. doi: 10.1007/978-3-319-78963-7_23

20. Cruz P., Ferreira R., Sequeira S.J. Kinematic modeling of Stewart-Gough platforms. CINCO 2005 - Robotics and automation (September 14-17, 2005, Barcelona, Spain). 2005. Pp. 93–99.

Information about the authors

Khurtasenko, Andrey V. PhD, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Chuev, Kirill V. Head. lab. Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: kirill.chuev@qmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Voloshkin, Artem A. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Cherednikov, Igor I. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Gavrilov, Dmitry V. Research Engineer, Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering Technology. E-mail: rl_bqtu@intbel.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukov, 46.

Received 13.12.2021

Для цитирования:

Хуртасенко А.В., Чуев К.В., Волошкин А.А., Чередников И.И., Гаврилов Д.В. Оптимизация конструктивных параметров роботомобильных платформ и реализация траектории движения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 101–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115

For citation:

Hurtasenko A.V., Chuev K.V., Voloshkin A.A., Cherednikov I.I., Gavrilov D.V. Optimization of design parameters of robotic platforms and implementation of the trajectory of motion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 4. Pp. 101–115. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-7-4-101-115