

В. П. ЯГЛИНСКИЙ, Г. В. КОЗЕРАЦКИЙ, А. Б. ХИХЛОВСКИЙ, О. Т. ОЗЕРНЮК

ПАРЕТООПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕНАЖЕРА-ГЕКСАПОДА ПО КРИТЕРИЯМ МАНЕВРЕННОСТИ

Для тщательной подготовки экипажа мобильных транспортных объектов по принятию быстрых решений по удержанию курса и мгновенных реакций по изменению движения предложено усовершенствовать тренажерную технологию путем эффективного использования рабочей зоны и снижения риска возникновения сингулярных конфигураций механизма тренажера. Предложены новые методы оценки свойства "маневренности" механизма параллельной структуры и кинематики типа гексапод в виде критериев эффективности рабочей зоны и сингулярности конфигураций. В результате Паретооптимизации критериальных показателей определена область оптимальных значений отношения радиусов ориентации шарниров платформы гексапода в интервале 0,75...0,95. Установлено, что конструктивные размеры авиатренажера модели Ан 124-100-D АНТК "Антонов" расположены в оптимальной области. Рекомендуемый диапазон значений углов тангажа (от 20° до 50°) позволяет эффективно использовать рабочую зону тренажера при одновременном снижении риска возникновения сингулярных конфигураций.

Ключевые слова: полноуправляемый авиасимулятор, платформа Стюарда, ориентация, матрица Якоби, жесткость.

В. П. ЯГЛИНСЬКИЙ, Г. В. КОЗЕРАЦЬКИЙ, А. Б. ХИХЛОВСЬКИЙ, О. Т. ОЗЕРНЮК ПАРЕТООПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРЕНАЖЕРА-ГЕКСАПОДА ЗА КРИТЕРІЯМИ МАНЕВРЕНОСТІ

Для ретельної підготовки екіпажу мобільних транспортних об'єктів по прийняттю швидких рішень щодо утримання курсу і миттєвих реакцій зі зміни руху запропоновано вдосконалити тренажерну технологію шляхом ефективного використання робочої зони і зниження ризику виникнення сингулярних конфігурацій механізму тренажера. Запропоновано нові методи оцінки якості "маневреність" механізму паралельної структури і кінематики типу гексапод у вигляді критеріїв ефективності робочої зони і сингулярності конфігурацій. В результаті Паретооптимізації критериальних показників визначена область оптимальних значень відношення радіусів орієнтації шарнірів платформи гексапода в інтервалі 0,75...0,95. Встановлено, що конструктивні розміри авіатренажера моделі Ан 124-100-D АНТК "Антонов" розташовані в оптимальній області. Діапазон значень кутів тангажа (від 20° до 50°) дозволяє ефективно використовувати робочу зону тренажера при одночасному зниженні ризику виникнення сингулярних конфігурацій.

Ключові слова: повнокерований авіасимулятор, платформа Стюарда, орієнтація, матриця Якобі, жорсткість.

V. P. YAGLINSKY, G. V. KOZERATSKY, A. B. KHIKHOVSKY, O. T. OZERNIUK PARETO-OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE SIMULATOR-HEXAPODE ON THE CRITERIA OF MANEUVERABILITY

To carefully prepare the crew of mobile transport facilities to make quick decisions on course retention and instant reactions to changing traffic, it is proposed to improve the training technology by effectively using the work area and reducing the risk of the occurrence of singular configurations of the simulator mechanism. is necessary. New methods for estimating the property of the "maneuverability" of the mechanism of parallel structure and kinematics of the hexapod type in the form of criteria for the efficiency of the working zone and the singularity of configurations are proposed. As a result of the analysis of known studies of singularity it is established that the singularity is a special kind of configuration in which the intrinsic rigidity of the hexapod mechanism is lost or there are uncontrollable degrees of freedom, which leads to loss of controllability. The singularity of the direct kinematics arises under the condition that the Jacobi matrix has rank less than 6 (not full rank). Physically this kind of singularity arises if two or three bars are parallel to each other, or three rods are located in a common plane. In such cases, the platform receives an additional one or more degrees of freedom, even if all the drives are locked. In order to avoid the singularity in this case, it is recommended to increase the rigidity of the mechanism by tilting two or three bars (to establish them not parallel to each other). The singularity of the inverse kinematics of mechanism arises if the direction of one or more bars is perpendicular to the axial directions of the drive hinges (for hexaglides). In this situation, the platform loses one or more degrees of freedom and there is uncontrollability in the form of ambiguity of continued movements or the rigidity of the hexapod mechanism increases dramatically. The singularity of the direct dynamics arises under the condition that the two rods are located along one line and all the actuators except these two are blocked. In this case, the power locking mechanism occurs and the mechanism can remain in equilibrium with any significant forces in the drives (the mechanism loses two degrees of freedom). Singularity of the reverse dynamics arises under the condition that the drives are blocked, and the mechanism still has one degree of freedom. In this case, the mechanism acquires the so-called quasi-zero and negative rigidity for the resemblance of the elastic Mises systems. As a result of Paretooptimization criterial indicators, the range of optimal values of the ratio of the radii of orientation of the hinges of the hexagon platform in the range 0.75...0.95 is determined. It is established that the design dimensions of the airplane simulator on model AN 124-100-D ANTK "Antonov" are located in the optimal area. The recommended range of angular pitch values (from 20° to 50°) allows efficient use of the working area of the simulator while reducing the risk of singular configurations.

Keywords: Full Flight Simulator, Steward platform, orientation, Jacobi matrix, rigidity.

Введение. В 90-х годах XX-го столетия, благодаря бурному развитию компьютерной техники, возникли благоприятные условия для углубленного исследования и широкого практического применения разнообразного оборудования на основе платформы Гауфа-Стюарда [1]. Поиск принципиально новых концепций механизмов, в которых исходное звено – подвижная платформа (ПП) связано с основной кинематическими цепями, обусловил разработку механизмов параллельной структуры и кинематики (МПСК), которые содержат несколько приводов движения и налагают определенные связи на движение исходного звена. Такие механизмы, в отличие от ПР с манипуляторами последо-

вательной структуры, имеют замкнутые кинематические цепи и воспринимают нагрузку как пространственные фермы, что предопределяет повышение показателей их жесткости и грузоподъемности, точности позиционирования и надежности, однако может иметь место негативное уменьшение рабочей зоны [2, 3].

Связанность между собой конфигураций замкнутых кинематических цепей, существенно усложняет решение задачи реализации заданных траекторий движения ПП. Так, самое простое прямолинейное перемещение ПП требует согласованной работы всех приводов, усложняет управление, ограничивает функциональные возможности и может привести к заклини-

ванию пространственного МПСК – к возникновению так называемых "сингулярных" конфигураций [1, 4, 5].

Для принятия быстрых решений по удержанию курса и мгновенных реакций по изменению движения мобильных транспортных объектов (МТО) необходима тщательная подготовка экипажа. Наибольшее распространение тренажерные технологии получили там, где ошибки при обучении на реальных объектах приводят к чрезвычайным последствиям, а их устранение – к большим финансовым затратам [6, 7].

Постановка проблемы и цель исследования. В предложенном комбинированном аэрокосмическом тренажере типа "гексапод" возможно обеспечение полного спектра акселерационных восприятий экипажу при трогании с места, разгоне, торможении и остановке ММ, преодолении таких препятствий как спуски, подъемы, косогоры, обходы препятствий (осуществления поворотов) [6, 7]. Для выполнения поставленных экипажу задач тренажер должен быть обеспечен необходимыми функциональными свойствами маневренности и быстродействия.

Цель исследования – предложить критерии оценки функционального свойства "маневренность" тренажера-гексапода и по предложенным критериям выполнить оптимизацию конструктивных параметров с учетом размеров рабочей зоны и исключения возможности появления сингулярных конфигураций.

Анализ известных исследований функциональных свойств тренажера-гексапода. В результате модернизации международных гражданских и военных устройств обучения экипажей транспортных средств решено поместить кабину точной копии и визуальную систему на платформе движения и получить – "Полноуправляемый" тренажер (рис. 1) [1, 7].



Рис. 1 – "Полноуправляемый" современный авиасимулятор компании MERSEDES-BENZ, 2015 г.

"Полноуправляемый" тренажер дублирует соответствующие аспекты МТО и его среды, включая движение и поэтому требует улучшения технических требований и для движения, и для визуальных систем.

Во всем мире существует приблизительно 2500 "Полноуправляемых тренажеров полета" (FFS – Full Flight Simulator). Из них для экспериментального обучения в Коммерческом Воздушном транспорте (CAT)

приблизительно 850 находятся в США, 275 в Великобритании, 160 в Китае, по 150 в Германии и Японии, 140 во Франции [8].

Тренажеры-роботы значительно различаются по геометрическим размерам, кинематическим схемам и грузоподъемности, по типами используемых приводов и систем управления.

В то же время все тренажерные системы имеют важные общие черты. С точки зрения механики, они являются собой управляемые механические системы со многими степенями свободы, способными выполнять сложные движения в пространстве [6, 8]. Целью этих движений является осуществление заданных перемещений объекта тренировок (рабочего органа) с достаточной точностью и за определенный промежуток времени.

Интенсификация исследований ПП на основе МПСК связана также с испытаниями военной и радиационной техники [9]. Одним из наиболее известных исследователей ПП на основе МПСК Дж. Мерлет (J.P. Merlet) значительно расширил спектр их практического приложения [1]. Среди разнообразных конструкций, разработанных Дж. Мерлетом, есть МПСК типа гексапод в составе тренажеров для пилотов-космонавтов [1, 8].

Более 20 % всех МПСК составляют гексаподы. Несмотря на разнообразие назначения основных типов МПСК, известных структур и конструкций существует общность по принципам построения и проектирования. По предложению Ю. М. Кузнецова усовершенствована классификация конструктивных и функциональных особенностей современного технологического оборудования из МПСК в зависимости от количества ведущих звеньев, наличия звеньев переменной длины и системы привод [9].

Известны методы оптимизации конструктивных параметров гексапода [10] путем варьирования геометрических размеров на основе сравнения занимаемой площади по критерию

$$k_{\text{ЭФС}} = \frac{S_{\text{PT}}}{S_{\text{ГТ}}} \cdot \frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{min}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ГТ}}$ – горизонтальная площадь основы гексапода, соответствующая габаритам;

S_{PT} – площадь горизонтальной проекции рабочей зоны гексапода;

$L_{\text{max}}, L_{\text{min}}$ – максимальная и минимальная длины штанг гексапода.

Проведенное сравнение ряда конструкций гексаподов по критерию эффективности занимаемой площади приведено в табл. 1. Наиболее эффективным по критерию занимаемой площади является гексапод модели *Mikromat 6X* производства фирмы *Fraunhofer* (Германия). Следует заметить, что критерий занимаемой площади не полностью характеризует рабочую зону тренажера-гексапода. Критерий (1) не учитывает объем рабочей зоны и не полностью характеризует свойство маневренность гексапода.

Для расширения области функционирования тренажера с более сложными режимами эксплуатации предложена модель многокоординатной тренажерной системы на основе гексапода с увеличенной рабочей зоной (рис. 2) [11].

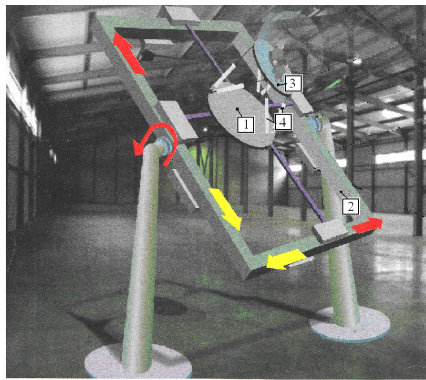


Рис. 2 – Модель многокоординатной аэрокосмической тренажерной системы (патент Украины, 104273) [11]

Таблица 1 – Сравнение конструкций гексаподов по критерию эффективности занимаемой площади

Производитель	Модель	Год вып.	Площадь горизонтальной проекции рабочей зоны $S_{рт}$, м ²	$k_{эф}$
НЭТИ	–	2007	6,35	1,44
Ingersoll, США	VOH 1000	2012	36,0	1,65
Hexel, США	Tornado 200	2014	16,6	2,67
Fraunhofer, Германия	Mikromat 6X	2005	28,5	3,17
АТ"Лапик", Россия	ТМ 500	2005	6,5	2,8
Ingersoll, США	HOH 600	2016	20,6	2,02
Geodetic, Швейцария	GPM 1000	2014	9,65	2,2
Geodetic, Швейцария	GPM 4000	2010	18,0	3,00

Различают несколько видов сингулярности конфигураций гексапода, в которых теряется жесткость конструкции, имеются неконтролируемые степени свободы, что приводит к потере управляемости [1, 2, 4, 12]. В известных источниках влияние сингулярности, зависящей от размеров звеньев (штанг) и ориентации их шарниров относительно подвижной и неподвижной платформ, на маневренность гексапода не рассмотрена.

Критерии маневренности тренажера-гексапода.

Учитывая возможности современных конструкций комбинированных тренажеров-гексаподов, предложены два новые научно обоснованные критериальные показателя свойства "маневренность" (2) и (3), которые способствуют усовершенствованию их квалитметрической модели.

Критерий эффективности рабочей зоны имеет вид

$$\gamma_{RZ} = \frac{V_T}{V_0} \cdot \frac{R_B}{R_A}, \tag{2}$$

где V_0 и V_T – полный объем рабочей зоны и при изменении угла тангажа платформы тренажера;

R_A, R_B – радиусы расположения шарниров неподвижной базы и подвижной платформы гексапода (рис. 3).

В качестве прототипа выбран тренажер модели Ан 124-100-D АНТК "Антонов", у которого: $R_B = 2,456$ м, $R_A = 2,7$ м, $A_1A_2 = A_3A_4 = A_5A_6 = 0,76$ м,

$$\gamma_1 = 16,2^\circ, \gamma_2 = 103,8^\circ, L_{\min} = 2,3 \text{ м и } L_{\max} = 4,1 \text{ м.}$$

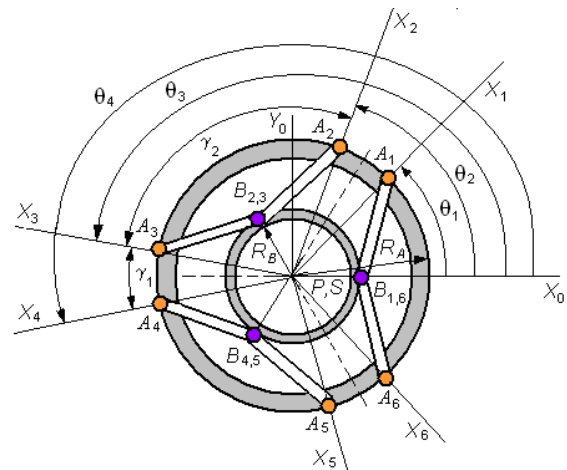


Рис. 3 – Схема расположения шарниров карданных A_i на базе и сферических B_i на платформе тренажера: θ_i и X_i – угловая и осевая ориентации шарнира A_i

Критериальный показатель эффективности рабочей зоны зависит не только от размеров рабочей зоны, но и от вида маневра. С увеличением угла тангажа необходимая для этого маневра рабочая зона и критериальный показатель эффективности рабочей зоны уменьшаются (рис. 4).

Установлено, что при выполнении тангажа с углом 42° объем рабочей зоны тренажера модели Ан 124-100-D АНТК "Антонов" уменьшается на 75 %, а с углом 30° соответственно в 2,2 раза до 37 м^3 .

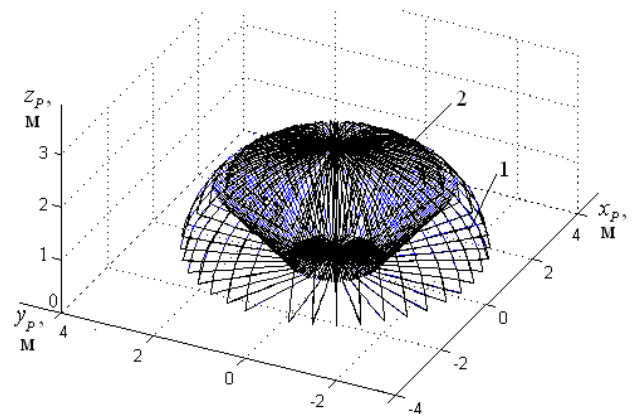


Рис. 4 – Изменение рабочей зоны авиатренажера модели Ан 124-100D АНТК "Антонов" при маневре типа "тангаж":
1 – полная рабочая зона объемом $V_0 = 82,5 \text{ м}^3$;
2 – при маневре с углом тангажа 42° объемом $V_T = 20,6 \text{ м}^3$

Критерий сингулярности конфигурации механизма тренажера предложен в виде:

$$\gamma_t = \frac{C_t}{\max C_t} \cdot \frac{L_{\min}}{L_{\max}}, \tag{3}$$

где $C_t, \max C_t$ – коэффициент жесткости механизма гексапода в сингулярной конфигурации (по направлению касательной к траектории тангажа) и его максимальное значение.

Коэффициенты жесткости механизма гексапода зависят от пространственной ориентации звеньев и

исследуемого направления в пространстве и достаточно исследованы в работах [5, 12, 13]. При исследовании сингулярных конфигураций особый интерес имеет жесткость механизма тренажера в направлении касательной к траектории полюса платформы.

Матрица жесткости механизма гексапода имеет вид [13, 14]

$$C = J^T \cdot C_D \cdot J, \quad (4)$$

где J – якобиан механизма гексапода;

C_D – диагональная матрица коэффициентов продольной жесткости c_i штанг гексапода;

T – символ транспонирования матриц.

Коэффициент жесткости C_t механизма гексапода в направлении тангажа (возможной сингулярности по касательной к траектории полюса платформы) определен в виде

$$C_t = \sum_{i=1}^6 c_i J_{ix}^2 \cos^2 \theta_i + \sum_{i=1}^6 c_i J_{iz}^2 \sin^2 \theta_i - \sum_{i=1}^6 2c_i J_{ix} J_{iz} \cos \theta_i \sin \theta_i, \quad (5)$$

где θ_i – угол тангажа платформы;

J_{ix}, J_{iy}, J_{iz} – компоненты матрицы Якоби.

Паретооптимизация критериев маневренности тренажера. Установлено, что с увеличением угла тангажа объем рабочей зоны уменьшается, значит, чем больше угол тангажа, тем ниже кривая эффективности рабочей зоны и выше кривая показателя сингулярности конфигурации. На Парето-диаграмме определена область оптимальных значений критериальных показателей эффективности рабочей зоны γ_R и критерия сингулярности γ_t при различных значениях конструктивных параметров R_A, R_B и разных углах тангажа θ_T (рис. 5).

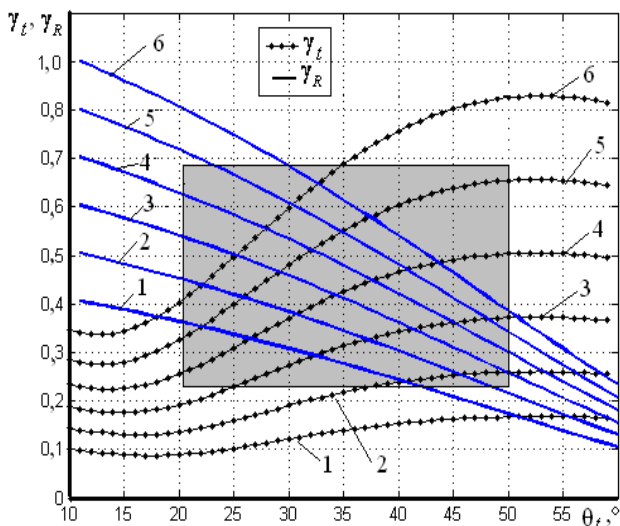


Рис. 5 – Парето-диаграмма оптимальных критериальных показателей маневренности (эффективности рабочей зоны и сингулярности) при разных значениях конструктивных параметров и углах тангажа: цифры указывают отношение конструктивных параметров R_B/R_A :

1 – 0,41; 2 – 0,51; 3 – 0,61; 4 – 0,71; 5 – 0,81; 6 – 0,91

Оптимальные значения отношения радиусов ориентации шарниров R_B/R_A расположены в интервале 0,75...0,95.

Из Парето-диаграммы следует, что при углах тангажа 16° и 54° критерий сингулярности имеет экстремум, поэтому выполнение маневра типа "тангаж" в интервалах углов ($10^\circ \dots 20^\circ$) и ($50^\circ \dots 60^\circ$) не рекомендуется.

В результате анализа известных исследований сингулярности установлено, что сингулярность – это особый вид конфигурации, в которой теряется присущая жесткость механизма гексапода, либо имеются неконтролируемые степени свободы, что приводит к потере управляемости гексапода.

Известны 4 вида сингулярности МПСК: прямая и обратная для динамики; прямая и обратная для кинематики (конструктивная сингулярность).

Сингулярность прямой кинематики возникает при условии, что матрица Якоби имеет ранг меньше 6 (не полный ранг). Физически этот вид сингулярности возникает, если две или три штанги параллельны друг другу, или три штанги расположены в общей плоскости. В таких случаях платформа получает дополнительно одну или больше степеней свободы, даже если все приводы заблокированы. В целях ухода от сингулярности в этом случае рекомендуется повысить жесткость механизма путем наклона двух или трех штанг (установить их не параллельными друг другу) [1, 13].

Сингулярность обратной кинематики МПСК возникает, если направление одной или нескольких штанг перпендикулярны осевым направлениям приводных шарниров (для гексаглайдов). В этой ситуации, платформа теряет одну или несколько степеней свободы и возникает неуправляемость в виде неоднозначности продолжаемых движений или же жесткость механизма гексапода резко возрастает.

Сингулярность прямой динамики возникает при условии, что две штанги расположены по одной линии и все приводы, кроме этих двух, заблокированы. В этом случае возникает силовое запирание механизма и МПСК может оставаться в равновесии при любых значительных силах в приводах (механизм теряет две степени свободы).

Сингулярность обратной динамики возникает при условии, что приводы заблокированы, а механизм все-таки имеет одну степень свободы. В этом случае механизм приобретает так называемую квазиулеву и отрицательную жесткость на подобие упругих систем Мизеса.

Выводы:

1. Предложены новые методы оценки свойства "маневренность" МПСК тренажера-гексапода в виде критериев эффективности рабочей зоны и сингулярности конфигураций.

2. В результате Паретооптимизации критериальных показателей определена область оптимальных значений отношения радиусов ориентации шарниров R_B/R_A в интервале 0,75...0,95.

3. Установлено, что конструктивные размеры авиатренажера модели Ан 124-100-D АНТК "Антонов" расположены в оптимальной области.

4. Рекомендуемый диапазон значений углов тангажа ($20^\circ \dots 50^\circ$) позволяет эффективно использовать рабочую зону тренажера при одновременном снижении риска возникновения сингулярных конфигураций.

Список литературы

- Merlet J. P. *Parallel Robots*. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.
- Gogu G. *Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 5: Basic Overconstrained Topologies with Schönflies Motions*. Ed. Springer: Dordrecht, 2014. DOI 10.1007/978-94-007-7401-8.
- Xin-Jun Liu, Wang Jinsong. *Parallel Kinematics. Type, Kinematics, and Optimal Design*. Ed. Springer: Heidelberg, 2014. DOI 10.1007/978-3-642-36929-2.
- Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. 2th ed. Springer: Dordrecht, 2010. DOI 10.1007/978-1-4419-1750-8.
- Кириченко А. М. Моделивання жорсткості верстата-гексапода. *Зб. наук. праць Кіровоградського НТУ. Техніка в сільгоспвиробництві, галузеve машинобудування, автоматизація*. Вип. 20. Кіровоград: КНТУ, 2008. С. 122–126.
- Бачинський В. В., Ярмолюк В. М. Оцінка системи рухомості тренажерів бойових машин. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2010. № 1(23). С. 137–141.
- Яглинський В. П., Обайди А. С., Фелько Н. В. Повышение подвижности кабин динамических тренажеров мобильных машин. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. 3/4 (17). С. 44–48.
- Lenarces J., Bajd T., Stanisic M. *Robot Mechanisms*. Springer. Dordrecht, 2013. DOI 10.1007/978-94-007-4522-3.
- Kuznesov Yu., Shinkarenko V. The genetic approach is the key to innovative synthesis of complicate technical systems. *Plovdiv: Fundamental sciences and applications*. 2011, no. 16(b,2), pp. 211–219.
- Бушуев В. В., Хольшев И. Г. *Механизмы параллельной структуры в машиностроении*. СТИН, 2001. № 1. С. 3–8.
- Яглинський В. П., Васильев В. В., Ковалішин С. С., Фелько М. В., Беліков В. Т. Патент України № 104273. *Багатокоординатний двосторонній модульний електропривод аерокосмічних тренажерних систем*. 10.01.2014.
- Yaglinsky V., Al-Obaydi A., Kozeratsky G., Moskvichov N. Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technolog*, no. 16(3), 2016, pp. 1–7. DOI: 10.9734/BJAST/2016/26274
- Яглинський В. П., Козерацький Г. В., Обайди А. С., Москвичов М. М. Дослідження спектру головних частот тренажера-гексапода. *Вісник НТУ "ХПИ", Серія: Проблеми механічного приводу*. 2015. № 34/1(1143). С. 153–158.
- Струтинський В. Б., Кириченко А. М. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури. *Вісник націон. техн. ун-та України "КПІ". Машинобудування*. Т. 57. К.: НТУУ "КПІ", 2009. С. 198–207.
- Xin-Jun Liu, Wang Jinsong. *Parallel Kinematics. Type, Kinematics, and Optimal Design*. Ed. Springer: Heidelberg, 2014. DOI 10.1007/978-3-642-36929-2.
- Reza N. Jazar. *Theory of Applied Robotics. Kinematics, Dynamics, and Control*. 2th ed. Springer: Dordrecht, 2010. DOI 10.1007/978-1-4419-1750-8.
- Kyrychenko, A. M. Modelyuvannya zhorstkosti verstata-heksapoda [Modeling of the stiffness of the hexapod machine]. *Zb. nauk. prats' Kirovohrads'koho NTU. Tekhnika v sil'hospyrobnystvii, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya* [Bulletin of the National Technical University air forces KNTU. Engineering in agricultural production, branch engineering]. Kirovohrad, 2008, no. 20, pp. 122–126.
- Bachynskyy V. V., Yarmolyuk V. M. Otsinka systemy rukhomosti trenazheriv boyovykh mashyn [Assessment of the mobility system of combat vehicle simulators]. *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl* [Bulletin of the National Technical University air forces]. Kharkov, 2010, no. 1(23), pp. 137–141.
- Yahlyns'kyi V. P., Obaydy A. S., Fel'ko N. V. Povyshenye podvyzhnosti kabyn dynamicheskyykh trenazherov moybyl'nykh mashyn [Increasing mobility of dynamic mobile machines simulators]. *Tekhnologicheskyy audit y rezervy proizvodstva* [Technological audit and production reserves], 2014, no. 3/4 (17), pp. 44–48.
- Lenarces J., Bajd T., Stanisic M. *Robot Mechanisms*. Springer. Dordrecht, 2013. DOI 10.1007/978-94-007-4522-3.
- Kuznesov Yu., Shinkarenko V. The genetic approach is the key to innovative synthesis of complicate technical systems. *Plovdiv: Fundamental sciences and applications*. 2011, no. 16(b,2), pp. 211–219.
- Bushuev V. V., Holshev I. G. *Mehanizmy parallelnoy struktury v mashinostroenii* [Mechanisms of parallel structure in mechanical engineering]. STIN, 2001, no. 1, pp. 3–8.
- Yahlyns'kyi V. P., Vasyl'yev V. V., Kovalishyn S. S., Fel'ko M. V., Belikov V. T. Patent Ukrayiny, no. 104273. *Bahatokoordynatnyy dvostoronniy modul'nyy elektropryvod aerokosmichnykh trenazhernykh system* [Multi-coordinate two-way modular electric actuator for aerospace training systems]. 10.01.2014.
- Yaglinsky V., Al-Obaydi A., Kozeratsky G., Moskvichov N. Kinematics Rods of Simulator-Hexapod. *British Journal of Applied Science & Technolog*, no. 16(3), 2016, pp. 1–7. DOI: 10.9734/BJAST/2016/26274
- Yaglinsky V., Al-Obaydi A., Kozeratsky G., Moskvichov N. *Doslidjenia spektru holovnykh chastot trenajera-hexapoda* [Investigation of the spectrum of the main frequencies of the simulator-hexapod]. *Visnyk NTU "KhPI", Seria: Problemy mehanichnoho pryvodu*. [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Problems of mechanical drive]. 2015, no. 34/1(1143), pp. 153–158.
- Strutyn's'kyi V. B., Kyrychenko A. M. *Teoretychnyy analiz zhorstkosti shestykoordynatnoho mekhanizmu paralel'noyi struktury* [Theoretical analysis of the stiffness of a six-coordinate mechanism of a parallel structure]. *Visnyk natsion. tekhn. un-ta Ukrayiny "KPU". Mashynobuduvannya* [Bulletin of the Kyiv National Technical University of Ukraine "KPI"]. Kyiv, NTUU "KPI" Publ., 2009, no. 57, pp. 198–207.

References (transliterated)

- Merlet J. P. *Parallel Robots*. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.
- Gogu G. *Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 5: Basic Overconstrained Topologies with Schönflies Motions*. Ed. Springer: Dordrecht, 2014. DOI 10.1007/978-94-007-7401-8.

Поступила (received) 15.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яглинський Віктор Петрович (Яглинский Виктор Петрович, Yaglinskij Viktor Petrovich) – доктор технічних наук (Dr. habil. of Eng. S.), професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри підйомно-транспортного і робототехнічного обладнання; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9466-6927>; e-mail: v.p.yaglinskiy@onu.ua

Козерацький Геннадій Володимирович (Козерацкий Геннадий Владимирович, Kozeratsky Genadij Volodymyrovych) – Одеський національний політехнічний університет, старший викладач кафедри управління системами безпеки життєдіяльності; м. Одеса, Україна; e-mail: gena.kozeratskiy@mail.ru

Хіхловський Анатолій Броніславович (Хихловский Анатолий Брониславович, Khikhlovsky Anatolij Bronislavovych) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри теоретичної механіки; м. Одеса, Україна.

Озернюк Олег Тимофійович (Озернюк Олег Тимофеевич, Ozeraniuk Oleg Tymofijovych) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, Одеський національний політехнічний університет, доцент кафедри управління системами безпеки життєдіяльності; м. Одеса, Україна.