

УДК 621.01

doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-38-44

О некоторых динамических свойствах механизма параллельной структуры типа «трипод» вблизи особых положений

А.А. Романов, С.М. Демидов, Л.В. Гаврилина,
Р.А. Чернецов, А.Б. Ласточкин

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Certain dynamic features of the “tripod” type parallel structure mechanisms at the singular positions

A.A. Romanov, S.M. Demidov, L.V. Gavrilina,
R.A. Chernetsov, A.B. Lastochkin

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрен механизм с тремя степенями свободы, выходное звено которого совершает колебательные движения вблизи особых положений. В зависимости от начальных условий, массы выходного звена и коэффициентов обратных связей приводов имеют место различные виды движений механизма. В частности, может происходить переход через особое положение (сингулярность). Поступательные приводы такого механизма расположены по ребрам пирамиды, формируемой кинематическими цепями трипода. Оси приводов сходятся в одной точке — центре выходного звена. Вся масса сосредоточена в выходном звене (рабочем органе). В свою очередь, вся упругость такого механизма определяется линейными приводами. Интерес вызывает зависимость между частотой колебаний и начальными условиями. Устанавливая начальное положение выходного звена ближе или дальше от точки равновесия, можно получить различные законы движения выходного звена. В частности, указанное звено может перейти через особое положение. Меняя высоту начального положения выходного звена, можно получить различную частоту колебательного процесса. Таким образом, имеет место зависимость частоты колебаний от амплитуды.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, особое положение, сингулярность, начальные условия, закон движения

The paper considers a three degrees of freedom mechanism, which output link is oscillating in vicinity of the singular positions. Various types of the mechanism motion are observed depending on initial conditions, mass of the output link and feedback coefficients of the drives. In particular, transition through a specific position (singularity) could take place. Translational drives of such a mechanism are positioned along the edges of a pyramid formed by the tripod kinematic chains. Axes of the drives converge at one point, i.e. at the output link center. The entire mass is concentrated in the output link (working body). In turn, entire elasticity of this mechanism is determined by the linear actuators. Dependence between the oscillation frequency and the initial conditions could be of interest. By setting the output link initial position closer or farther from the equilibrium point, different laws of the output link motion could be obtained. In particular, the specified link is able to pass through singularity. By changing the output link initial position height, different frequency

of the oscillatory process could be received. Thus, there appears a dependence of the oscillation frequency on the amplitude.

Keywords: parallel structure mechanism, singular position, singularity, initial conditions, law of motion

Для эффективного выполнения различных технических задач [1, 2] применяют механизмы параллельной структуры (МПС) [3–5]. Исследованию МПС посвящено большое количество публикаций, в частности [7–15]. Рассмотрены важные вопросы, связанные с особыми положениями [5, 7, 15], рабочими зонами [6], кинематической и динамической развязками [8], оптимизацией параметров [9], снижением энергетических затрат [13], уравниванием [14] и постоянством передаточных отношений [16].

Наличие особых положений (сингулярностей) существенно влияет на функциональные возможности МПС. Проведены исследования [17, 18] сингулярных зон (зон особых положений), размерность которых на единицу меньше, чем число степеней свободы.

Однако динамическим свойствам МПС и, в частности движениям вблизи особых положений, посвящено относительно мало публикаций.

Цель работы — исследование динамических свойств МПС типа «трипод» вблизи особых положений либо при их пересечении. Такая динамическая система должна обладать свойствами нелинейности, которые надлежит выявить.

Рассматриваемый МПС типа «трипод» имеет три степени свободы и три кинематические цепи (рис. 1). Каждая кинематическая цепь содержит по две сферические кинематические пары соответственно A_1 и B_1 , A_2 и B_2 , A_3 и B_3 . Центры кинематических пар A_1, A_2, A_3 совпадают. Кроме того, каждая кинематическая цепь

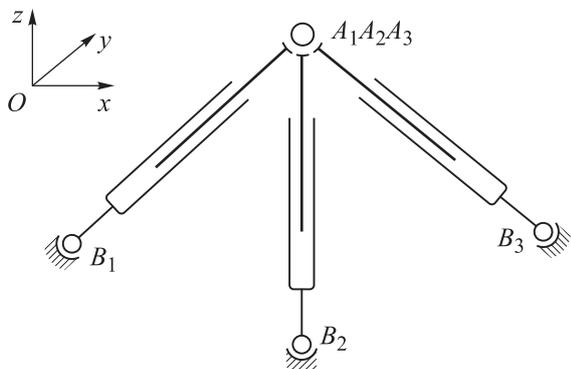


Рис. 1. Схема МПС типа «трипод»

содержит линейный двигатель. Таким образом, при заторможенных приводах имеет место пирамида.

В рассматриваемом случае все точки B_1, B_2, B_3 расположены в горизонтальной плоскости xOy .

Расположение этих точек соответствует равнобедренному треугольнику, поэтому их координаты равны, м: точка $B_1 (\sqrt{3}/2, -1/2, 0)$, точка $B_2 (-\sqrt{3}/2, -1/2, 0)$, точка $B_3 (0, 1, 0)$. Координаты точек A_1, A_2, A_3 в системе координат выходного звена (ВЗ) равны нулю.

Колебательный процесс определяют следующие параметры: масса ВЗ $m = 100$ кг (принимается, что масса кинематических цепей пренебрежимо мала); коэффициенты упругости приводов $c_1 = c_2 = c_3 = 40$ Н/м (считаем, что приводы имеют лишь обратную связь по положениям, выражаемую коэффициентом упругости); обобщенные координаты (расстояния между точками A_i и $B_i, i = 1, 2, 3$), при которых силы упругости равны нулю, $L_1 = L_2 = L_3 = 2,2$ м.

Будем рассматривать движения, вызванные силами упругости в приводах и силой тяжести, действующей на ВЗ. Уравнения движения ВЗ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} = & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2} - l_1 \right] \times \right. \\ & \left. \times \frac{(x-x_{B_1})}{\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2}} \right\} c_1 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2} - l_2 \right] \times \right. \\ & \left. \times \frac{(x-x_{B_2})}{\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2}} \right\} c_2 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2} - l_3 \right] \times \right. \\ & \left. \times \frac{(x-x_{B_3})}{\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2}} \right\} c_3 / -m; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_y}{dt} = & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2} - l_1 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(y-y_{B_1})}{\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2}} \left. \right\} c_1 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2} - l_2 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(y-y_{B_2})}{\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2}} \left. \right\} c_2 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2} - l_3 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(y-y_{B_3})}{\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2}} \left. \right\} c_3 / -m; \\ \frac{dv_z}{dt} = & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2} - l_1 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(z-z_{B_1})}{\sqrt{(x-x_{B_1})^2 + (y-y_{B_1})^2 + (z-z_{B_1})^2}} \left. \right\} c_1 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2} - l_2 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(z-z_{B_2})}{\sqrt{(x-x_{B_2})^2 + (y-y_{B_2})^2 + (z-z_{B_2})^2}} \left. \right\} c_2 / -m - \\ & - \left\{ \left[\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2} - l_3 \right] \times \right. \\ & \times \frac{(z-z_{B_3})}{\sqrt{(x-x_{B_3})^2 + (y-y_{B_3})^2 + (z-z_{B_3})^2}} \left. \right\} c_3 / -m, \end{aligned}$$

где v_x , v_y , v_z — скорости движения ВЗ по соответствующим координатам; t — время; x , y , z — координаты центра ВЗ; x_{B_1} , x_{B_2} , x_{B_3} , y_{B_1} , y_{B_2} , y_{B_3} , z_{B_1} , z_{B_2} , z_{B_3} — точки крепления центров сферических шарниров на основании; l_1 , l_2 , l_3 — длины выдвигания штоков приводов.

Несмотря на линейный характер силы упругости в каждом из приводов, на ВЗ действует

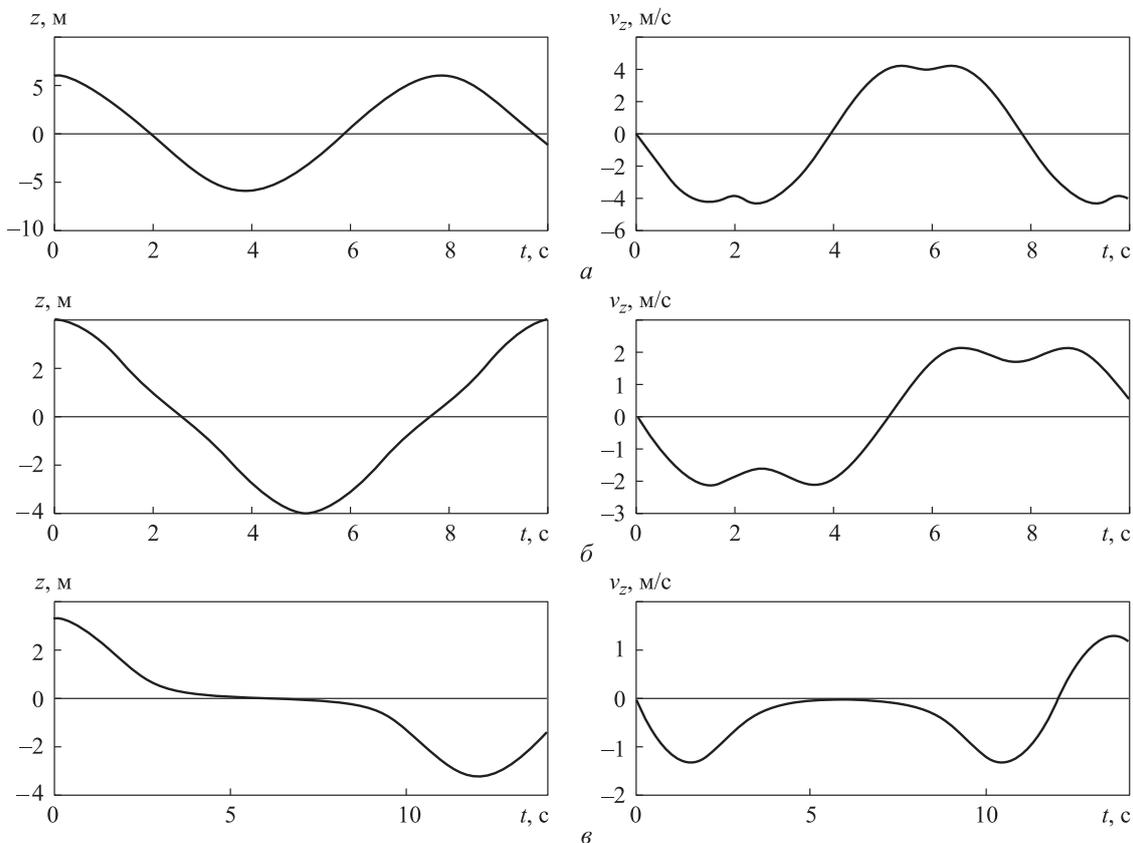


Рис. 2. Изменение во времени t координаты z (слева) и скорости движения v_z (справа) ВЗ при различных начальных положениях:
 a — $z = 6$ м; b — $z = 4$ м; v — $z = 3,25$ м

совокупность сил, не линейно зависящих от положений. В связи с этим важно знать, зависит ли частота колебаний от начальных условий.

В частности, в особом положении, когда все кинематические цепи расположены в одной плоскости и пересекают ось z , все силы упругости будут взаимно уравновешены. При этом, как и в положении, когда все силы упругости равны нулю, на ВЗ будет действовать только сила тяжести.

Будем менять начальные условия — начальную точку, из которой начинается движение ВЗ, — и получать различные законы движения ВЗ. В частности, можно получить такой процесс, когда будет пересечена горизонтальная плоскость, на которой расположены центры неподвижных сферических пар кинематических цепей, т. е. будет пройдено особое положение.

Рассмотрим различные начальные условия и соответствующие законы движения ВЗ. Пусть начальные условия таковы, что скорость движения ВЗ равна нулю, а его координата $z = 6$ м. Графики изменения во времени координаты z и скорости движения ВЗ показаны на рис. 2, а.

Если начальная скорость движения ВЗ равна нулю, а его начальная координата $z = 4$ м, то ВЗ вновь переходит через особое положение (рис. 2, б).

Если начальная скорость движения ВЗ равна нулю, а его начальная координата $z = 3,25$ м, то закон движения ВЗ наименее близок к гармоническим колебаниям (рис. 2, в).

Как видно из рис. 2, динамическая система обладает свойствами нелинейности, определяемыми параллельной структурой механизма типа «трипод». В особом положении, которое пересекает ВЗ, сила приводов взаимно уравновешена. Кроме того, при приближении начального положения к особому частота колебаний уменьшается, что можно наблюдать на соответствующих графиках.

Выводы

1. Исследованы динамические свойства МПС типа «трипод» вблизи особых положений либо при их пересечении. Показано, что такая динамическая система обладает свойствами нелинейности.

2. Дальнейшие исследования подобных механических систем, имеющих параллельную структуру, будут направлены на то, чтобы привлечь во внимание другие схемы механизмов, в частности, совершающих поступательные движения, а также исследовать динамические процессы при различных требуемых законах движения ВЗ.

Литература

- [1] Ганиев Р.Ф. О современном состоянии и перспективах развития ИМАШ РАН. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2014, № 3, с. 11–36.
- [2] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Разработка и исследование механизмов с постоянной точкой ввода инструмента в рабочую область, предназначенных для хирургических операций и исследования свойств плазмы. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2020, № 6, с. 3–15.
- [3] Russo M., Ceccarelli M. Dynamics of a humanoid robot with parallel architectures. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 1799–1808, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_178
- [4] Brinker J., Corves B. A survey on parallel robots with delta-like architecture. *14th IFToMM World Congress*, 2015, pp. 407–414, doi: <https://doi.org/10.6567/IFToMM.14TH.WC.PS13.003>
- [5] Laryushkin P., Glazunov V., Erastova K. On the maximization of joint velocities and generalized reactions in the workspace and singularity analysis of parallel mechanisms. *Robotica*, 2019, vol. 37, no. 4, pp. 675–690, doi: <https://doi.org/10.1017/S026357471800125X>
- [6] Antonov A., Glazunov V. Position, velocity, and workspace analysis of a novel 6-DOF parallel manipulator with “piercing” rods. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 161, art. 104300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104300>
- [7] Balchanowski J., Szrek J., Wudarczyk S. Analysis of constraint equations of the parallel mechanisms with 3 DoF in singular configurations. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 607–616, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_61

- [8] Lu Ya., Aoustin Ya., Arakelian V. Control performance improvement in dynamically decoupled manipulators. In: ROMANSY 2022. *Springer*, 2022, pp. 199–209, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_21
- [9] Guagliumi L., Berti A., Monti E. et al. Design optimization of a 6-DOF cable-driven parallel robot for complex pick-and-place tasks. In: ROMANSY 2022. *Springer*, pp. 283–291, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_30
- [10] Fomin A., Antonov A., Glazunov V. Forward kinematic analysis of a rotary hexapod. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2021, pp. 486–494, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_58
- [11] Laryushkin P., Antonov A., Fomin A. et al. Inverse and forward kinematics of a reconfigurable spherical parallel mechanism with a circular rail. In: ROMANSY 2022. *Springer*, 2022, pp. 246–254, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_26
- [12] Li R., Fan X., Li X. et al. Kinematic Design of a 2-SPS/PU&R 4-DOF hybrid robot for ankle rehabilitation. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 1849–1858, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_183
- [13] Balderas Hill R., Briot S., Chiette A. et al. Minimizing the energy consumption of a delta robot by exploiting the natural dynamics. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 213–224, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_26
- [14] Geng J., Arakelian V. Balancing of planar 5R symmetrical parallel manipulators taking into account the varying payload. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 372–379, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_45
- [15] Harada T., Kunishige Y. Singularity free mode changes of a redundantly driven two limbs six-dof parallel robot. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 405–413, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_49
- [16] Гебель Е.С., Гаврилина Л.В., Глазунов В.А. и др. Построение зоны сингулярности для одного вида механизмов параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2020, № 3, с. 4–10.
- [17] Гебель Е., Гаврилина Л., Глазунов В. и др. К анализу сингулярных зон механизмов параллельной структуры с линейными двигателями. *Станкоинструмент*, 2021, № 3, с. 92–98, doi: <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2021.24.3.92.98>
- [18] Едакина Т.В., Ласточкин А.Б., Гаврилина Л.В. и др. Структурный анализ и построение рабочей зоны изоморфного поступательно-направляющего механизма параллельной структуры. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2022, № 4, с. 6–13.

References

- [1] Ganiev R.F. On the current state and the future prospects of the Institute of Machine Science, Russian Academy of Sciences, and problems of the mechanics of machines and breakthrough technologies. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2014, no. 3, pp. 11–36. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2014, vol. 43, no. 3, pp. 188–210, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618814030029>)
- [2] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A. et al. Development and investigation of mechanisms with a constant point of entry of a tool into the working area, intended for surgery and study of the properties of plasma. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2020, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2020, vol. 49, no. 6, pp. 463–473, <https://doi.org/10.3103/S1052618820060096>)
- [3] Russo M., Ceccarelli M. Dynamics of a humanoid robot with parallel architectures. In: IFToMM WS 2019. *Springer*, 2019, pp. 1799–1808, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_178
- [4] Brinker J., Corves B. A survey on parallel robots with delta-like architecture. *14th IFToMM World Congress*, 2015, pp. 407–414, doi: <https://doi.org/10.6567/IFToMM.14TH.WC.PS13.003>
- [5] Laryushkin P., Glazunov V., Erastova K. On the maximization of joint velocities and generalized reactions in the workspace and singularity analysis of parallel mechanisms. *Robotica*, 2019, vol. 37, no. 4, pp. 675–690, doi: <https://doi.org/10.1017/S026357471800125X>

- [6] Antonov A., Glazunov V. Position, velocity, and workspace analysis of a novel 6-DOF parallel manipulator with “piercing” rods. *Mech. Mach. Theory*, 2021, vol. 161, art. 104300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104300>
- [7] Balchanowski J., Szrek J., Wudarczyk S. Analysis of constraint equations of the parallel mechanisms with 3 DoF in singular configurations. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 607–616, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_61
- [8] Lu Ya., Aoustin Ya., Arakelian V. Control performance improvement in dynamically decoupled manipulators. In: ROMANSY 2022. *Springer*, 2022, pp. 199–209, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_21
- [9] Guagliumi L., Berti A., Monti E. et al. Design optimization of a 6-DOF cable-driven parallel robot for complex pick-and-place tasks. In: ROMANSY 2022. *Springer*, pp. 283–291, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_30
- [10] Fomin A., Antonov A., Glazunov V. Forward kinematic analysis of a rotary hexapod. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2021, pp. 486–494, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_58
- [11] Laryushkin P., Antonov A., Fomin A. et al. Inverse and forward kinematics of a reconfigurable spherical parallel mechanism with a circular rail. In: ROMANSY 2022. *Springer*, 2022, pp. 246–254, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06409-8_26
- [12] Li R., Fan X., Li X. et al. Kinematic Design of a 2-SPS/PU&R 4-DOF hybrid robot for ankle rehabilitation. In: IFToMM WC 2019. *Springer*, 2019, pp. 1849–1858, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_183
- [13] Balderas Hill R., Briot S., Chriette A. et al. Minimizing the energy consumption of a delta robot by exploiting the natural dynamics. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 213–224, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_26
- [14] Geng J., Arakelian V. Balancing of planar 5R symmetrical parallel manipulators taking into account the varying payload. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 372–379, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_45
- [15] Harada T., Kunishige Y. Singularity free mode changes of a redundantly driven two limbs six-dof parallel robot. In: ROMANSY 2020. *Springer*, 2020, pp. 405–413, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_49
- [16] Gebel E.S., Gavrulina L.V., Glazunov V.A. et al. Forming a singularity zone for a one view mechanisms of parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems], 2020, no. 3, pp. 4–10. (In Russ.).
- [17] Gebel E., Gavrulina L., Glazunov V. et al. To the analysis of singular zones mechanisms of parallel structure with linear motors. *Stankoinstrument*, 2021, no. 3, pp. 92–98, doi: <https://doi.org/10.22184/2499-9407.2021.24.3.92.98> (in Russ.).
- [18] Edakina T.V., Lastochkin A.B., Gavrulina L.V. et al. Structural analysis and construction of the operating area of an isomorphous translational–directional mechanism with a parallel structure. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2022, no. 4, pp. 6–13. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2022, vol. 51, no. 4, pp. 287–293, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618822040057>)

Статья поступила в редакцию 27.06.2023

Информация об авторах

РОМАНОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

ДЕМИДОВ Сергей Михайлович — кандидат технических наук, научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: chipd@rambler.ru).

ГАВРИЛИНА Любовь Васильевна — научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: griboedova04@mail.ru).

ЧЕРНЕЦОВ Роберт Александрович — кандидат технических наук, научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: chernetsovrobert@gmail.com).

ЛАСТОЧКИН Алексей Борисович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: lastochkin_aleks@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Романов А.А., Демидов С.М., Гаврилина Л.В., Чернецов Р.А., Ласточкин А.Б. О некоторых динамических свойствах механизма параллельной структуры типа «трипод» вблизи особых положений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 9, с. 38–44, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-38-44

Please cite this article in English as:

Romanov A.A., Demidov S.M., Gavrilina L.V., Chernetsov R.A., Lastochkin A.B. Certain dynamic features of the “tripod” type parallel structure mechanisms at the singular positions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 9, pp. 38–44, doi: 10.18698/0536-1044-2023-9-38-44

Information about the authors

ROMANOV Andrey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: dru.ny@mail.ru).

DEMIDOV Sergey Mikhailovich — Candidate of Science (Eng.), Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: chipd@rambler.ru).

GAVRILINA Lyubov Vasilievna — Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: griboedova04@mail.ru).

CHERNETSOV Robert Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.). Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: chernetsovrobert@gmail.com).

LASTOCHKIN Aleksey Borisovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Maliy Kharitonievskiy Lane, Bldg. 4, e-mail: lastochkin_aleks@mail.ru).