

Экспериментально-математическое моделирование двигателей для перспективных планетоходов

© В.Ю. Ермаков, С.В. Левашкин-Леонов, А. Туфан

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

Рассмотрена возможность использования двигателей частотного, радиального и радиально-частотного типов для перспективных конструкций отечественных планетоходов, а также выполнена оценка их эффективности при различных конфигурациях: на колесиках с одной рамкой; на колесиках с двумя рамками; на колесиках со смешанными рамками; на подвесе с одной «рамкой-траекторией»; на ножках с одной рамкой. Разработана математическая модель перемещения центра масс двигателей с эллиптически вытянутой и эллиптически сжатой траекториями. Экспериментально проведено математическое моделирование двигателей с помощью специального программно-алгоритмического обеспечения, а также изучено поведение их конструкций при различных физических условиях.

Ключевые слова: *планетоход, двигатель частотного типа, двигатель радиального типа, двигатель радиально-частотного типа, подвижные внутренние массы, динамические выступающие механизмы*

Введение. Одна из основных проблем, возникающих при проектировании планетоходов, — сложность создания технических средств для обеспечения передвижения по поверхности других планет или небесных тел [1]. При этом подвижные элементы их конструкций, такие как колеса, гусеницы и другие выступающие механизмы, должны сохранять свою первоначальную форму на этапе эксплуатации.

Одно из возможных решений представленной проблемы — применение двигателей, для которых не требуется создавать внешние упругие элементы в целях обеспечения их передвижения по поверхности при неблагоприятных условиях, отличных от земных [2, 3].

Цель данной работы — экспериментально-математическое моделирование конструкций двигателей, которые можно использовать в перспективных отечественных планетоходах для реализации надежного движения по поверхности небесных тел.

Под двигателем понимается устройство, преобразующее работу двигателя или источника энергии в работу по перемещению планетохода [4]. Функционирование большей части двигателей основано на вращении внутренних масс. Принцип работы предлагаемых устройств заключается в создании их перемещения по поверхности за счет инерциальных сил и сил Кориолиса с учетом разницы по величине, которая приводит к появлению асимметрии колебаний и направленному движению планетохода [5]. Изменение этих сил может происходить путем

изменения либо угловой скорости, либо радиуса вращения движителей. В связи с этим их можно классифицировать следующим образом: движители постоянного радиуса вращения с переменной угловой скоростью — как движители частотного типа (ДЧТ), движители переменного радиуса с постоянной угловой скоростью — радиального типа (ДРТ), движители переменного радиуса и переменной угловой скорости — радиально-частотного типа (ДРЧТ).

Впервые к разработке ДЧТ приступили в 1930-х годах [4–7]. Принцип их работы основан на изменении значений нормальных и тангенциальных сил инерции за счет варьирования частоты вращения внутренних масс на определенных участках траектории [8]. В случае использования ДРТ и ДРЧТ возникает сила Кориолиса, которая в совокупности с силами инерции также воздействует на функционирование планетохода, т. е. на его перемещение по поверхности [9, 10]. Для известных ДРТ можно выделить эллиптически вытянутую траекторию (ЭВТ) и эллиптически сжатую траекторию (ЭСТ), представленные на рис. 1.

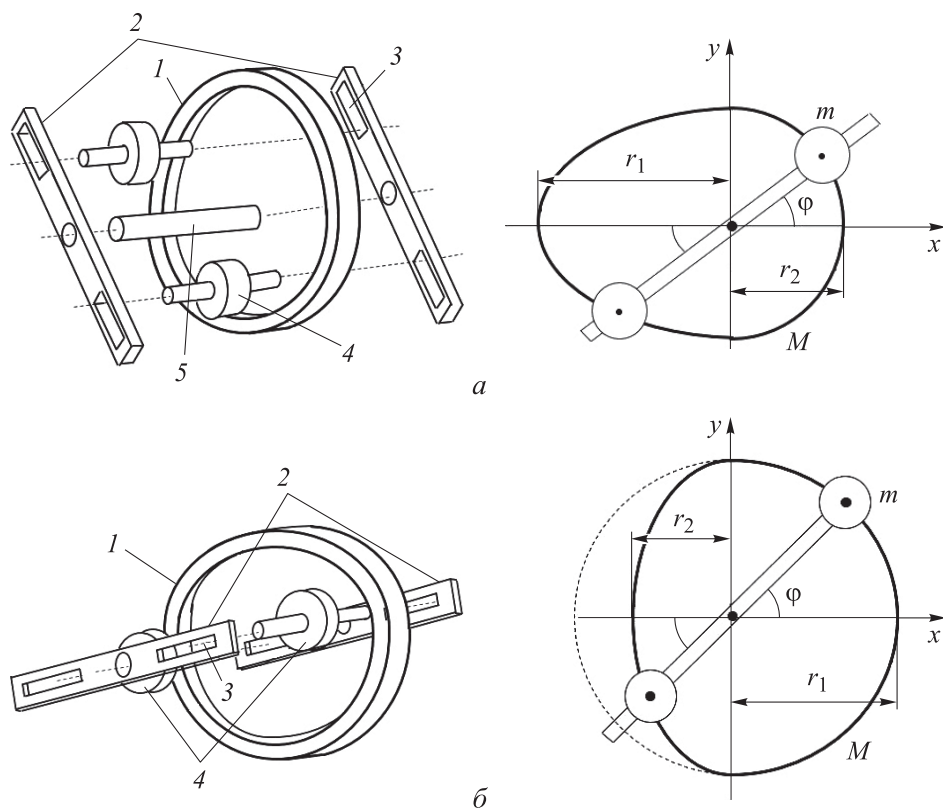


Рис. 1. Движители радиального типа с эллиптически вытянутой (а) и эллиптически сжатой (б) траекторией:

1 — обод; 2 — направляющие; 3 — пазы; 4 — грузы; 5 — ось вращения

Математическое моделирование движителей. Конструкция ДРТ с ЭВТ выполнена в виде половины окружности с радиусом r_2 и половины эллипса с большой полуосью r_1 , а также с малой полуосью r_2 (см. рис. 1). При вращении направляющих происходит перемещение по ободу грузов, которые прижимаются к нему посредством центробежной силы [11]. Изменение радиуса вращения происходит по пазам во время перемещения центра масс (ЦМ) вдоль оси Ox , которое можно представить выражением

$$x = \frac{-mr_{\text{в}} \cos \varphi + mr_2 \cos \varphi}{2m + M}, \quad (1)$$

где m и M — масса движителя и груза соответственно, кг; φ — угол поворота направляющей, рад; $r_{\text{в}}$ — текущий радиус движения груза

$$\text{на ЭВТ, м, } r_{\text{в}} = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{(r_2 \cos \varphi)^2 + (r_1 \sin \varphi)^2}}.$$

При этом уравнение движения ЦМ на ЭВТ будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} (M + 2m)\ddot{x} = & -mr_2 (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \cdot \ddot{\varphi}) - \frac{mr_1 r_2 (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \cdot \ddot{\varphi})}{\sqrt{(r_2 \cos \varphi)^2 + (r_1 \sin \varphi)^2}} - \\ & - \frac{2mr_1 r_2 (r_1 - r_2) (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2) (\sin^2 \varphi)}{\sqrt{[(r_2 \cos \varphi)^2 + (r_1 \sin \varphi)^2]^3}} + \\ & + \frac{3mr_1 r_2 (r_1 - r_2)^2 (\cos^3 \varphi \cdot \dot{\varphi}^3) (\sin^2 \varphi \cdot \ddot{\varphi})}{\sqrt{[(r_2 \cos \varphi)^2 + (r_1 \sin \varphi)^2]^5}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим движение ЦМ для ЭСТ, траектория которой, как и у ЭВТ, состоит из половины окружности и половины эллипса, но в этом случае окружность имеет радиус, равный r_1 , а эллипс — большую и малую полуоси, равные r_1 и r_2 соответственно, где перемещение ЦМ вдоль оси Ox на ЭСТ рассчитывается по формуле

$$x = \frac{-mr_{\text{с}} \cos \varphi + mr_1 \cos \varphi}{2m + M}. \quad (3)$$

Здесь $r_{\text{с}}$ — текущий радиус движения груза на ЭСТ, м,

$$r_{\text{с}} = \frac{r_1 r_2}{\sqrt{(r_1 \cos \varphi)^2 + (r_2 \sin \varphi)^2}}.$$

Уравнение движения ЦМ на ЭСТ будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 (M + 2m)\ddot{x} = mr_2 (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \cdot \ddot{\varphi}) + \frac{mr_1 r_2 (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \cdot \ddot{\varphi})}{\sqrt{(r_1 \cos \varphi)^2 + (r_2 \sin \varphi)^2}} - \\
 - \frac{2mr_1 r_2 (r_1 - r_2) (\cos \varphi \cdot \dot{\varphi}^2) (\sin^2 \varphi)}{\sqrt{[(r_1 \cos \varphi)^2 + (r_2 \sin \varphi)^2]^3}} + \\
 + \frac{3mr_1 r_2 (r_1 - r_2)^2 (\cos^3 \varphi \cdot \dot{\varphi}^3) (\sin^2 \varphi \cdot \ddot{\varphi})}{\sqrt{[(r_1 \cos \varphi)^2 + (r_2 \sin \varphi)^2]^5}}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

Проведем экспериментально-математическое моделирование перемещения ЦМ для ДРТ и ДЧТ с помощью специально разработанного программно-алгоритмического обеспечения, где представленный

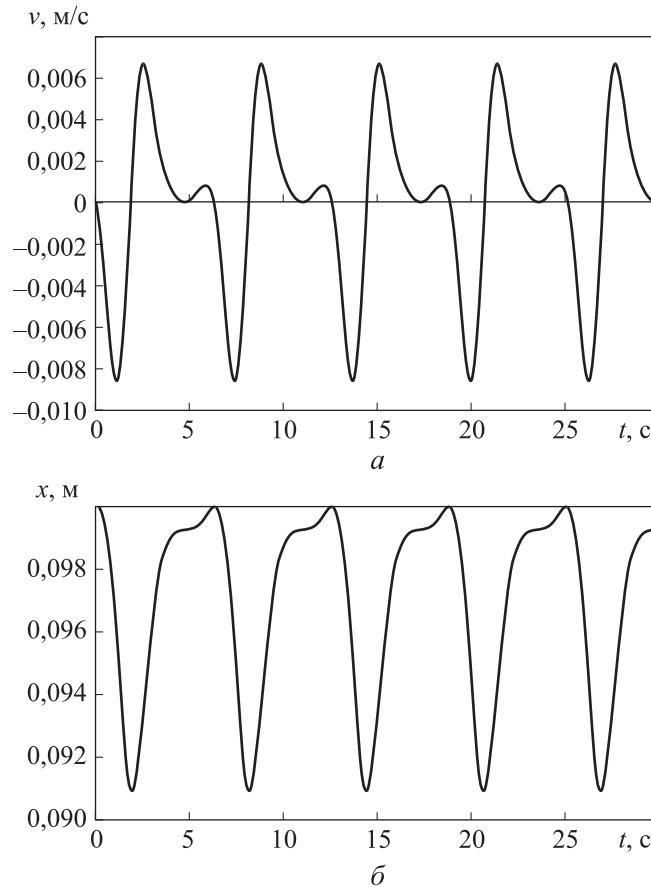


Рис. 2. Зависимости от времени скорости (а) и перемещения (б) центра масс движителя частотного типа

образец ДЧТ имеет следующие физические характеристики [12]: $M = 1,0$ кг; $m = 0,05$ кг; $r_1 = r_2 = 0,1$ м; $x_0 = 0,1$ м; $\varphi_0 = 0$; скорость $v_0 = 0$, угловая скорость изменяется согласно уравнению

$$\omega = 1 + \sin(t). \quad (5)$$

Зависимости скорости v и перемещения x центра масс ДЧТ от времени представлены на рис. 2.

При постоянном радиусе вращения перемещение ЦМ представляет собой гармонические колебания (см. рис. 2), и при таком техническом исполнении движение ДЧТ не наблюдается.

Для ДРТ с ЭВТ и с ЭСТ принято использовать те же физические характеристики, что и для ДЧТ, но с учетом следующих изменений: $r_2 = 0,05$ м; $\omega = 1,0$ рад/с (рис. 3).

Согласно экспериментально-математическому моделированию, при постоянной угловой скорости независимо от траектории движения

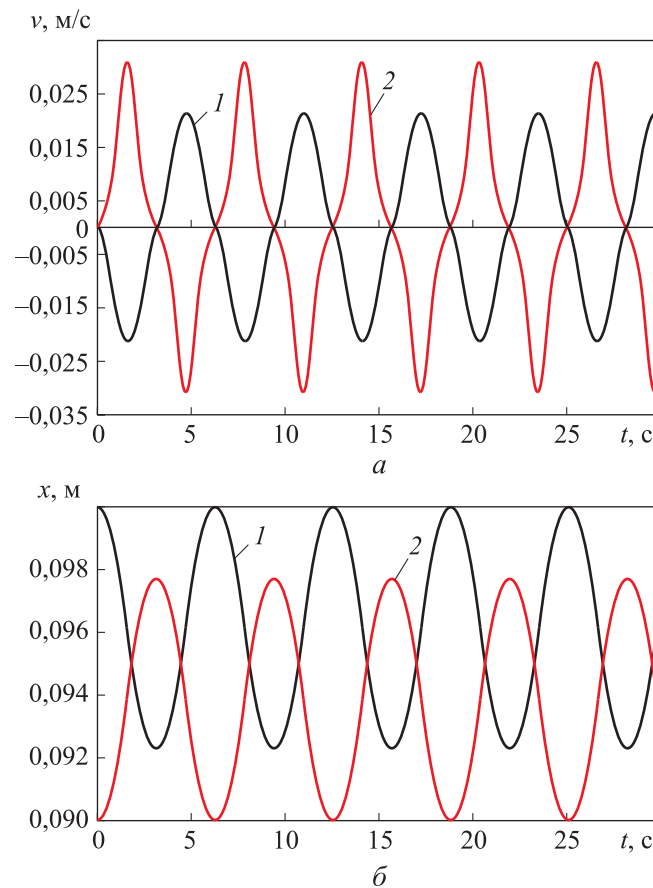


Рис. 3. Влияние времени на скорость (а) и перемещения (б) центра масс движителей радиального типа с эллиптически вытянутой (1) и эллиптически сжатой (2) траекторией

внутренних масс не будет происходить движения движителей [13]. Выявлено, что величина угловой скорости не влияет на характер изменения перемещений ЦМ: они остаются в виде гармонических колебаний.

Анализ экспериментально-математического моделирования устройств радиального и радиально-частотного типов. На основе этого моделирования были разработаны устройства ДРТ с ЭВТ и с ЭСТ (рис. 4, 5), которые представляют собой конструкции со сменными «рамками-траекториями», изготовленными из полиэтилентерефталата-гликоля (PET-G) — $C_{10}H_8O_4$. Радиусы ЭВТ и ЭСТ r_1 и r_2 равны 0,08 м и 0,04 м соответственно. Масса каждого груза составляет 0,018 кг, масса направляющих — 0,009 кг, а масса общей конструкции — 0,894 кг.

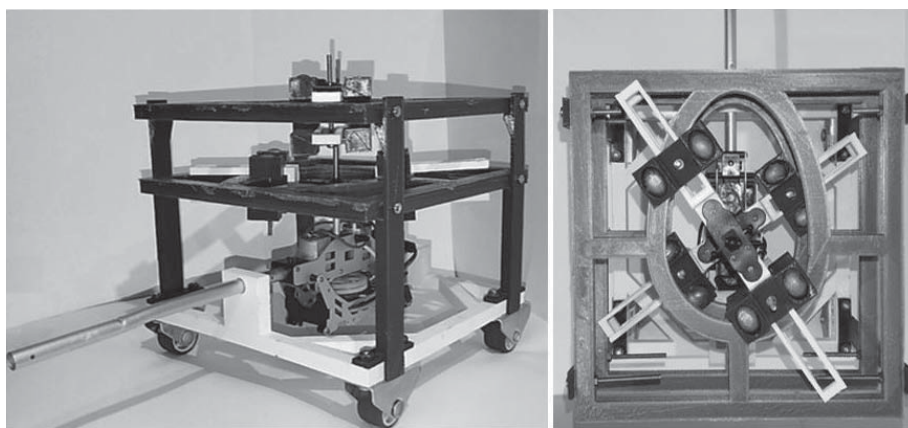


Рис. 4. Движитель радиального типа с эллиптически вытянутой траекторией

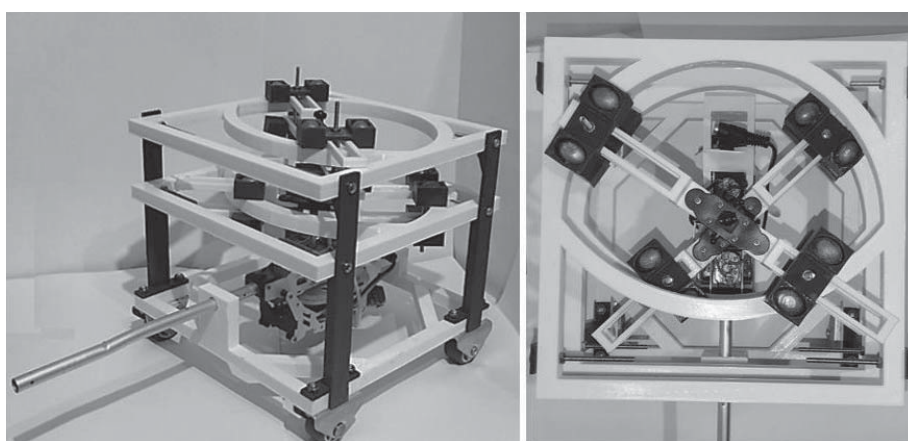


Рис. 5. Движитель радиального типа с эллиптически сжатой траекторией

Результаты экспериментально-математического моделирования ДРТ с ЭВТ, проведенного при различных условиях (например, при максимальной угловой скорости 27,4 рад/с) и конфигурациях конструкции ДРТ, таких как на колесиках с двумя рамками; на колесиках с одной рамкой каждого типа; на колесиках со смешанными рамками; на подвесе с одной «рамкой-траекторией»; на ножках с одной рамкой (и с направляющим тросом, компенсирующим вращательный момент) [14], показали, что явного движения ДРТ не происходило, и это было подтверждено разработанной математической моделью при тех же условиях. Перемещение было зафиксировано в конструкции ДРТ на ножках с одной «рамкой-траекторией», которое можно интерпретировать как наличие больших сил трения, чем в случае с колесиками, так и возможность конструкции скакать, отталкиваясь от поверхности [15, 16].

Экспериментальное моделирование проводилось на трех стендах: на колесной базе (а), на подвесе (б) и на «ножках» (в), схемы которых представлены на рис. 6. Колесная база являлась конструкцией на четырех свободно вращающихся резиновых колесах 1, которые обеспечивали движение только вперед и назад. В конфигурации с подвесом была использована та же конструкция, но без колес и в перевернутом виде, с тремя продетыми через специальные отверстия 2 в основании тросами 3, что обеспечивало движение вперед и назад с минимальной силой трения. Конфигурация на ножках представляла собой конструкцию на двух лыжах 5, прикрепленных под движителем 6. Для компенсации нежелательных моментов, создаваемых вращением движителя, в конфигурации на ножках был применен дополнительный направляющий трос 4.

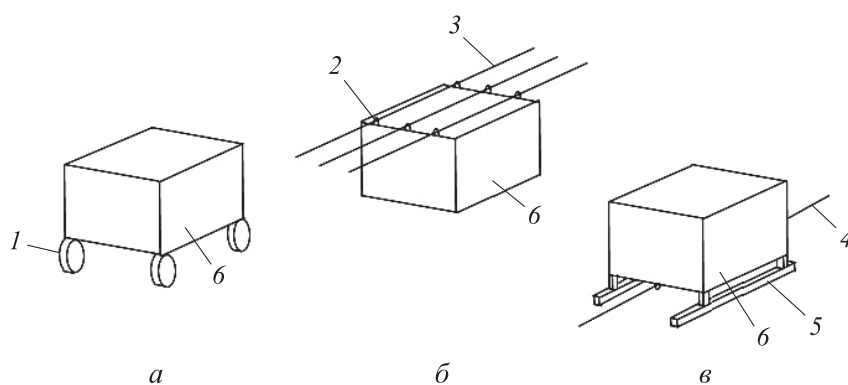


Рис. 6. Схемы экспериментальных установок на колесной базе (а), на подвесе (б), на «ножках» (в):

1 — резиновые колеса; 2 — специальные отверстия; 3 — трос; 4 — направляющий трос;
5 — лыжа; 6 — движитель

На всех стендах были протестированы каждый из типов рамок-траекторий при разной частоте вращения, а также с разным числом этих рамок. Эксперименты на колесной базе и на ножках проводили на различных поверхностях и со сменой направления движителя, чтобы предотвратить влияние на результаты эксперимента наклона поверхности, измерявшегося тарированным уровнем. Для фиксации перемещения движителя использовался ультразвуковой дальномер типа HC-SR04. В движителе применялись моторы типа Suma S37, источником питания которых служил регулируемый блок питания типа Sila DPS3-12L.

Анализ экспериментально-математического моделирования ДРТ показал, что при постоянной угловой скорости вращения внутренних масс и отсутствии внешних сил трения происходит полная компенсация центробежных сил силами Кориолиса, из-за чего движения ДРТ не происходит [17]. При переменной частоте вращения грузов может измениться соотношение центробежной силы и силы Кориолиса, а также не возникнет их взаимной компенсации. Результаты исследования с ДРЧТ с ЭВТ и с ЭСТ при тех же начальных условиях, что и для ДРТ, но с переменной угловой скоростью, согласно уравнению (5), представлены на рис. 7. На рисунке видно, что при переменной угловой скорости движение ДРЧТ будет происходить с ускорением, равным $0,08 \text{ м/с}^2$ для ЭВТ и $0,04 \text{ м/с}^2$ — для ЭСТ.

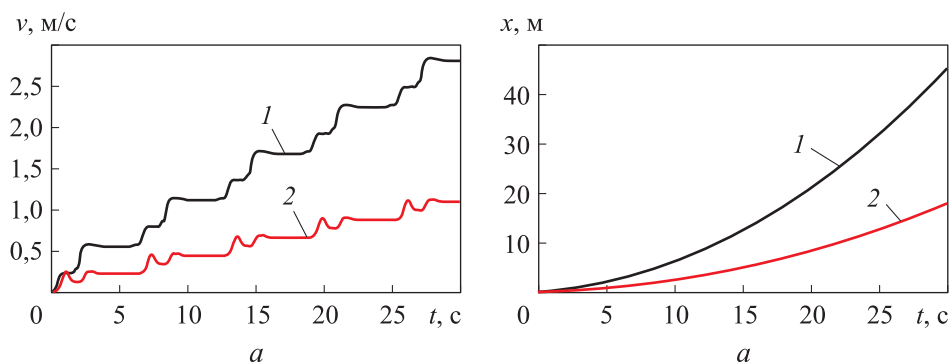


Рис. 7. Влияние времени на скорость (а) и перемещение (б) центра масс движителей радиально-частотного типа с эллиптически вытянутой (1) и эллиптически сжатой (2) траекторией

Заключение. В результате проведенного экспериментально математического моделирования движителей переменного радиуса вращения было выявлено, что при постоянной угловой скорости вращения внутренних масс и отсутствии внешних сил трения происходит полная компенсация центробежных сил силами Кориолиса, из-за чего тяга радиальных движителей стремиться к нулю. Аналогичный результат был получен при экспериментально-математическом моделировании

движителей постоянного радиуса вращения с переменной угловой скоростью. Анализ результатов экспериментально-теоретических исследований показал, что движение планетоходов с движителями радиально-частотного типа наблюдается только при условии, что будут соблюдаться переменный радиус вращения и переменная угловая скорость.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кемурджиан А.Л., Громов В.В., Кажукало И.Ф. и др. *Планетоходы*. Москва, Машиностроение, 1993, 400 с.
- [2] Устьянцев Л.С. *Центробежно-силовой движитель*. Пат. № 2095625 С1 Российская Федерация, 1997, 4 с.
- [3] Порсева С.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Исследование возможности создания мобильного робота для изучения поверхности Венеры. *XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства: Сб. тез. В 4-х томах*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, т. 3, с. 320–322.
- [4] Толчин В.Н. *Инерциоид. Силы инерции как источник поступательного движения*. Пермь, Кн. изд-во, 1977, 99 с.
- [5] Шипов Г.И., Сидоров А.Н. Теоретические и экспериментальные исследования реактивного движения без отбрасывания массы. *Академия Тринитаризма*, Эл № 77-6567. Москва, 2003, публ. 10724, 29 с.
- [6] Шипов Г.И. 4D-гироскоп в механике Декарта. *Академия Тринитаризма*, Эл № 77-6567. Москва, 2006, публ. 13938, 70 с.
- [7] Савелькаев С.В. Эффект независимости величины смещения центра масс механической системы от диссипативности внешней среды (Эффект Савелькаева). *Механика машин, механизмов и материалов*, 2011, № 4 (17), с. 42–48.
- [8] Гайдук А.Р., Жебрун Е.А. Моделирование движений инерциоида. *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2009, № 5 (94), с. 246–250.
- [9] Пронота В.П. Углубить познание мира. *Интернетнаука: научный журнал*, 2016, № 8, с. 1–10.
- [10] Сейдаханов И.У., Сейдаханов С.У. *Устройство, создающее Кориолиса и центробежные силы в одном направлении, превышающие их в противоположном направлении, для создания двигателей транспортных средств*. Пат. № ЕА200301181 А1, 2005.
- [11] Хорошавин А.В., Буяков С.Н., Михайленко А.В. О компенсации асимметрии импульса центробежных сил в инерциоидах импульсом сил Кориолиса. *Результаты современных научных исследований и разработок. Сб ст. XVIII Всероссийской научно-практической конференции*. Пенза, МЦНС «Наука и просвещение», 2022, с. 28–34. ISBN 978-5-00173-510-6
- [12] Власов В.Н. Моделирование инерциоида Толчина 2. *Академия Тринитаризма*, Эл № 77-6567. Москва, 2019, публ. 25241, 04.03.2019.
- [13] Баврин Г.И. *Центробежный инерционный движитель*. Пат. № 2263819 С2 Российская Федерация, 2005, бюл. № 31, 7 с.
- [14] Руденко Т.В., Холостова О.В. *Исследование движений голономных механических систем*. Москва, Изд-во МАИ, 2005, 96 с.
- [15] Савелькаев С.В. Влияние сил инерции взаимодействующих тел механической системы на ее движение в диссипативной среде и особенности движения. *Вестник СГУГиТ*, 2022, т. 27, № 5, с. 185–202.

- [16] Илалетдинов Л.Ф., Ветчанин Е.В. Расчет параметров движения инерционного робота в вязкой жидкости для построения модели управления. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2014, № 1 (23), с.13–16.
- [17] Черепанов А.А. *Инерционный движитель для транспортного средства*. Пат. № 2066398 С1 Российская Федерация, 1996, 10 с.

Статья поступила в редакцию 18.03.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ермаков В.Ю., Левашкин-Леонов С.В., Туфан А. Экспериментально-математическое моделирование движителей для перспективных планетоходов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 5.

Ермаков Владимир Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Левашкин-Леонов Сергей Владимирович — техник кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: levashkin.leo.ser@gmail.com

Туфан Ант — ассистент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», МАИ (НИУ). e-mail: anttufan@gmail.com

Experimental and mathematical simulation of movers for the prospective planetary rovers

© V.Yu. Ermakov, S.V. Levashkin-Leonov, A. Tufan

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

The paper considers a possibility of using the frequency, radial and radial-frequency type movers in promising designs of the domestic planetary rovers. Their effectiveness is assessed for various configurations: wheels with a single frame; wheels with two frames; wheels with mixed frames; suspension with one trajectory frame; legs with one frame. Mathematical model of the mover center of mass motion with the elliptically elongated and elliptically compressed trajectories is developed. The mover mathematical simulation was experimentally carried out using special software and algorithms; their structures behavior was analyzed under various physical conditions.

Keywords: *planetary rover, frequency and radial type movers, radial-frequency type mover, moving internal masses, dynamic protruding mechanisms*

REFERENCES

- [1] Kemurdzhian A.L., Gromov V.V., Kazhukalo I.F. et al. *Planetokhody* [Planetary rovers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 400 p.
- [2] Ustyantsev L.S. *Tsentrobezhno-silovoy dvizhitel* [Centrifugal actuating mover]. Patent no. 2095625 C1 Russian Federation, 1997, 4 p.
- [3] Porseva S.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. Issledovanie vozmozhnosti sozdaniya mobilnogo robota dlya izucheniya poverkhnosti Venery [Feasibility study of mobile robot for the Venus surface exploration]. In: *XLVI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: Sb. tez.* [XLVI Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration: Coll. abstr.]. In 4 volumes. Moscow, BMSTU Publ., 2022, vol. 3, pp. 320–322.
- [4] Tolchin V.N. *Inertsiod. Sily inertsii kak istochnik postupatel'nogo dvizheniya* [Inertsiod. Inertia forces as a source of translational motion]. Perm, Book Publ., 1977, 99 p.
- [5] Shipov G.I., Sidorov A.N. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya reaktivnogo dvizheniya bez otbrasyvaniya massy [Theoretical and experimental studies of jet propulsion without mass rejection]. *Akademiya Trinitarizma*, El. no. 77-6567. Moscow, 2003, publ. 10724, 29 p.
- [6] Shipov G.I. 4D giroskop v mekhanike Dekarta [4D gyroscope in the Descartes mechanics]. *Akademiya Trinitarizma*, El. no. 77-6567. Moscow, 2006, publ. 13938, 70 p.
- [7] Savelkaev S.V. Effekt nezavisimosti velichiny smeshcheniya tsentra mass mekhanicheskoy sistemy ot dissipativnosti vneshney sredy (Effekt Savelkaeva) [Effect on independence for the quantity on displacement of the center of mass of a mechanical system from environmental dissipativity (Savelkaev effect)]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov — Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2011, no. 4 (17), pp. 42–48.
- [8] Gayduk A.R., Zhebrun E.A. Modelirovanie dvizheniy inertsioda [Simulation of inertoids motions]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2009, no. 5 (94), pp. 246–250.

- [9] Pronota V.P. Uglubit poznanie mira [Deepen the knowledge of the world]. *Internetnauka: nauchnyi zhurnal* (Scientific journal), 2016, no. 8, pp. 1–10.
- [10] Seydakhanov I.U., Seydakhanov S.U. *Ustroystvo, sozdayuschee Koriolisa i tsentrobeznyye sily v odnom napravlenii, prevyshayushchie ikh v protivopolozhnom napravlenii, dlya sozdaniya dvigateley transportnykh sredstv* [A device that creates Coriolis and centrifugal forces in one direction, exceeding them in the opposite direction, to create the transportation engines]. Patent no. EA200301181 A1, 2005.
- [11] Khoroshavin A.V., Buyakov S.N., Mikhaylenko A.V. O kompensatsii asimmetrii impulsa tsentrobeznykh sil v inertsionnykh impulsom sil Koriolisa [Compensation of asymmetry of the momentum of centrifugal forces in inertoids by the momentum of Coriolis forces]. In: *Rezultaty sovremennykh nauchnykh issledovaniy i razrabotok. Sb. st. XVIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Results of modern scientific research and development. Coll. art. of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Penza, 2022, MTsNS “Nauka i Prosveshchenie” Publ., pp. 28–34. ISBN 978-5-00173-510-6.
- [12] Vlasov V.N. Modelirovanie inertsoida Tolchina [Modeling the Tolchin inertoid]. *Akademiya Trinitarizma*, El. no. 77-6567. Moscow, 2019, publ. 25232, March 4.
- [13] Bavrin G.I. *Tsentrobeznyi inertsionnyi dvizhitel* [Centrifugal inertial mover]. Patent no. 2263819 C2 Russian Federation, 2005, bull. no. 31, 7 p.
- [14] Rudenko T.V., Holostova O.V. *Issledovanie dvizheniy golonomnykh mekhanicheskikh sistem* [Study of motions of the holonomic mechanical systems]. Moscow, MAI Publ., 2005, 96 p.
- [15] Savelkaev S.V. Vliyaniye sil inertsii vzaimodeystvuyushchikh tel mekhanicheskoy sistemy na ee dvizheniye v dissipativnoy srede i osobennosti dvizheniya [Influence of inertia forces of interacting bodies of mechanical system on its motion in a dissipative medium and features of motion]. *Vestnik SGUGiT — Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 185–202.
- [16] Ilaletdinov L.F., Vetchanin E.V. Raschet parametrov dvizheniya inertsionnogo robota v vyazkoy zhidkosti dlya postroeniya modeli upravleniya [Computation parameters of inertia robots body motion through viscous fluid for control model development]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve — Intellectual Systems in Manufacturing*, 2014, no. 1 (23), pp. 13–16.
- [17] Cherepanov A.A. *Inertsionnyi dvizhitel dlya transportnogo sredstva* [Inertia mover for a transport vehicle]. Patent no. 2066398 C1 Russian Federation, 1996, 10 p.

Ermakov V.Yu., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: v_ermakov2003@mail.ru

Levashkin-Leonov S.V., Technician, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: levashkin.leo.ser@gmail.com

Tufan Ant, Assistant, Department 601 “Space Systems and Rocket Science”, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: anttufan@gmail.com