

УДК 621.865.8

Расчетная и экспериментальная оценка динамических свойств исполнительной системы робототехнического комплекса космического назначения

Е.А. Дудоров^{1,2}, В.П. Горшенин², Б.Г. Колбасин²,
П.А. Тараненко³, В.А. Романов³, Д.В. Телегин³

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

² АО «НПО «Андроида техника»

³ ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Computational and experimental assessment of the executive system dynamic properties in a space-based robotic complex

E.A. Dudorov^{1,2}, V.P. Gorshenin², B.G. Kolbasin²,
P.A. Taranenko³, V.A. Romanov³, D.V. Telegin³

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University

² JSC Scientific and Production Association Android Technics

³ Federal State Budgetary Educational Institution South Ural State University (National Research University)

Проведены вибрационные испытания целевого универсального шарнира системы привода при гармоническом и случайном возбуждении. С помощью конечно-элементной модели получена расчетная оценка момента, при котором происходит страгивание универсального шарнира исполнительной системы при вибрационных испытаниях. Построена конечно-элементная модель исполнительной системы, выполнен ее расчет при гармоническом возбуждении основания и уровне демпфирования, определенном в эксперименте при вибрационных испытаниях универсального шарнира. Получены расчетные оценки момента универсального шарнира головного модуля при гармоническом возбуждении основания исполнительной системы.

EDN: REXKBX, <https://elibrary/rekxbx>

Ключевые слова: антропоморфный робот, конечно-элементная модель, универсальный шарнир, вибрационные испытания, гармоническое возбуждение

The paper presents results of vibration testing of the drive system target universal joint under the harmonic and random excitations. The finite element model was applied to obtain the torque computed assessment. At this torque, the executive system universal joint was breaking free during the vibration testing. The executive system finite element model was constructed and computed under the base harmonic excitation and damping level determined experimentally during vibration testing of the universal joint. Computational assessments of the universal joint torque of the head module under the executive system harmonic excitation were obtained.

EDN: REXKBX, <https://elibrary/rekxbx>

Keywords: android, finite element model, universal joint, vibration testing, harmonic excitation

Передовые технологии искусственного интеллекта и робототехники являются драйвером технологического и экономического развития корпораций и государств [1]. В последнее время наблюдается активный рост инвестиций в робототехнические компании и исследования в области искусственного интеллекта и робототехники. Особое внимание инвесторов направлено на робототехнические разработки в космической сфере [2]. Среди них можно выделить такие роботы, как GIGAI R1 (Япония) [3, 4], Robonaut 2 (США) [5, 6], Justin (Германия) [7, 8], AILA (Германия) [9], Федор (Россия) [10, 11] и др. [12–14].

С 2022 г. российское предприятие НПО «Андроидная техника» по заказу Ракетно-космической корпорации «Энергия» выполняет составную часть опытно-конструкторской работы «Система антропоморфная робототехническая», проект «Теледроид» [15]. В рамках реализации проекта должен быть создан ряд робототехнических средств, способных работать под действием вакуума, солнечной радиации и низких температур в условиях открытого космоса на поверхности Международной космической станции (МКС).

Главным элементом робототехнического комплекса космического назначения является исполнительная система (ИС), представляющая собой антропоморфного робота в торсовом исполнении. В целях обеспечения параметров надежности и безопасности ИС для оборудования МКС при нахождении на ее поверхности разработан стенд и проведены вибрационные испытания (далее виброиспытания) целевого универсального шарнира (УШ) ИС при гармоническом и случайном возбуждении.

Виброиспытания УС ИС при синусоидальном возбуждении. Выполнены эксперименты по оценке момента страгивания целевого УШ ИС при динамическом нагружении. Внешний вид и схема экспериментальной установки приведены на рис. 1, а и б, где ξ — виброускорение. Целевой УШ закрепляли на вибростоле вибростенда LDS V850 путем прижатия к вибростолу шпильками. К выходному валу УШ с помощью двух винтов присоединяли промежуточный стержень, на котором закрепляли еще один стержень с грузом на свободном краю.

Управляющий (первый) акселерометр 1 устанавливали на вибростол, второй акселерометр 3 — на корпусе УШ 2, третий 4 — на

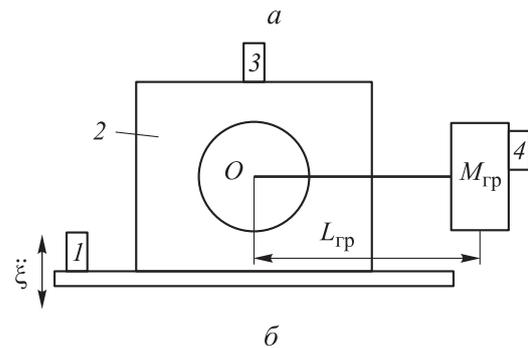
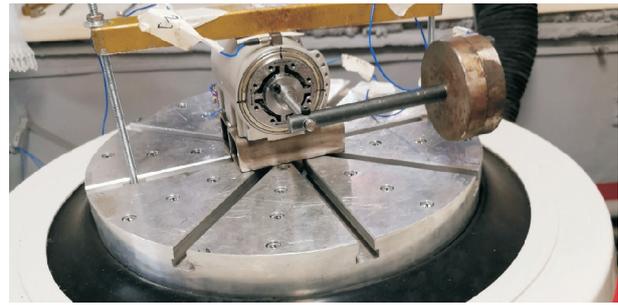


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментальной установки

грузе. Оси однокомпонентных акселерометров ориентировали так, чтобы они измеряли виброускорения в вертикальном направлении.

Испытания проводили при синусоидальном и случайном нагружении. Возбуждение колебаний происходило в вертикальном направлении (см. рис. 1, б).

Цель работы — моделирование условий гармонических возбуждений, подобных условиям, возникающим на внешней поверхности МКС при орбитальном полете для определения параметров самопроизвольного перемещения в УШ ИС.

В качестве внешнего возбуждения задавали вертикальные виброускорения, которые контролировали с помощью системы управления с обратной связью Brüel and Kjær VC-LAN 7542. Испытания проводили в частотном диапазоне 5...25 Гц. Уровень виброускорений на вибростол задавали равным 0,2g. Выполняли испытания с разверткой по частоте с линейным изменением частоты со скоростью 0,25 Гц/с и фиксировали амплитуды виброускорений всех трех акселерометров в зависимости от частоты возбуждения.

На УШ наносили вертикальную риску. По завершении виброиспытаний фиксировали положение вала УШ относительно корпуса. Если страгивание не происходило, то уровень виброускорений на вибростол повышали на 0,05g и

испытания повторяли. Экспериментальным путем установлено, что при виброускорении на вибростоле около $0,9g$ происходит страгивание в УШ. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) всех трех акселерометров при виброускорении на вибростоле $0,9g$ приведены на рис. 2.

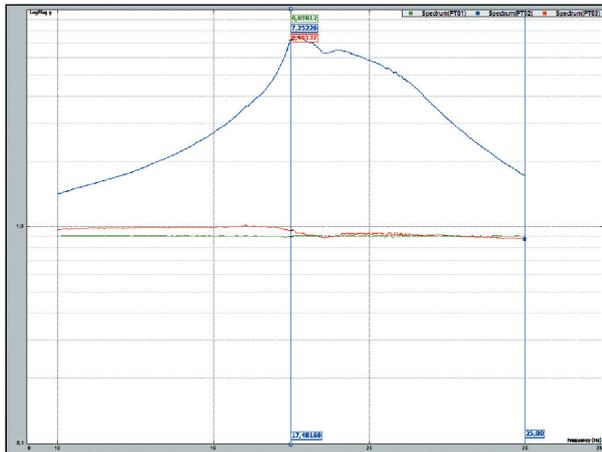
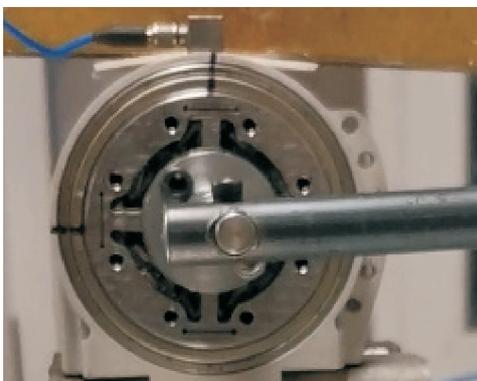
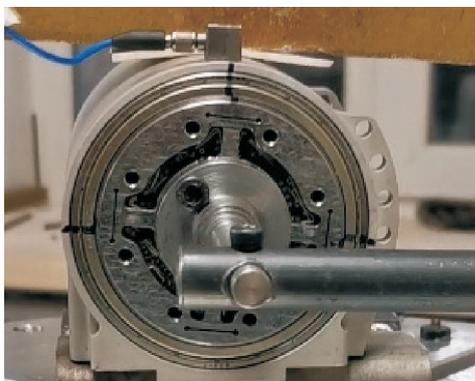


Рис. 2. АЧХ виброускорений первого (—), второго (—) и третьего (—) акселерометров при синусоидальном возбуждении с амплитудой виброускорения на вибростоле $0,9g$



а



б

Рис. 3. Внешний вид УШ до (а) и после (б) виброиспытаний

Внешний вид УШ до и после виброиспытаний показан на рис. 3, а и б.

В процессе виброиспытаний целевого УШ ИС при гармоническом возбуждении наблюдались резонансные явления. Резонанс обусловлен массово-геометрическими свойствами вспомогательных элементов (дополнительной массы и двух стержней), необходимых для нагружения УШ. В случае прохода через резонанс амплитуды углов поворота целевого УШ ИС при страгивании оказывались кратковременными и не превышали $3...4^\circ$ (см. рис. 3, б).

Смещение происходило в одну сторону (по ходу часовой стрелки). Неконтролируемых колебаний не наблюдалось. Это обусловлено тем, что после страгивания резонансная частота исследуемой системы *целевой УШ — два стержня — дополнительная масса* изменялась, и при страгивании происходил уход с резонанса, что приводило к снижению нагрузок и прекращению страгивания. Ввиду достаточно узкой резонансной области после прекращения страгивание не возобновлялось, так как испытания проводились с разверткой по частоте, и текущая частота возбуждения после остановки УШ уже не совпадала с резонансной.

Расчетная оценка момента страгивания. Для оценки момента, при котором происходит страгивание в УШ, создана расчетная модель вспомогательных элементов, необходимых для нагружения УШ при его виброиспытаниях (двух стержней и груза). Конечно-элементная модель вспомогательных элементов приведена на рис. 4.

Выполнен расчет установившихся вынужденных колебаний при вертикальном виброускорении основания (заделки) $0,9g$. Уровень демпфирования в расчетной модели задан из условия равенства расчетного и экспериментального коэффициентов динамичности. Ко-

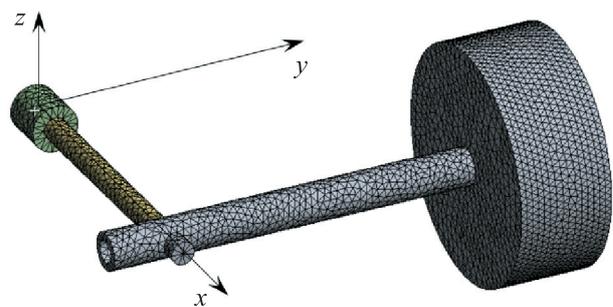


Рис. 4. Конечно-элементная модель вспомогательных элементов

эффицент динамичности представляет собой отношение виброускорения груза на резонансе $a_z^{\text{эксп}}$ к виброускорению основания $a_z^{\text{эксп}}$. Экспериментальный коэффициент динамичности (см. рис. 2)

$$\mu_{\text{эксп}} = \frac{\max a_z^{\text{эксп}}}{a_z^{\text{эксп}}} = \frac{7,252g}{0,898g} = 8,075.$$

Расчетная и экспериментальная АЧХ виброускорения на грузе при виброускорении основания 0,9g приведены на рис. 5.

При заданном уровне относительного демпфирования $\xi = \delta/2\pi = 0,069$ (где δ — декремент колебаний) и виброускорении основания 0,9g максимальное расчетное виброускорение груза (на резонансе)

$$\mu_{\text{расч}} = \frac{\max a_z^{\text{расч}}}{a_z^{\text{расч}}} = \frac{7,2574g}{0,9g} = 8,06.$$

Таким образом, при относительном демпфировании $\xi = 0,069$ расчетный коэффициент динамичности практически совпал с экспериментальным.

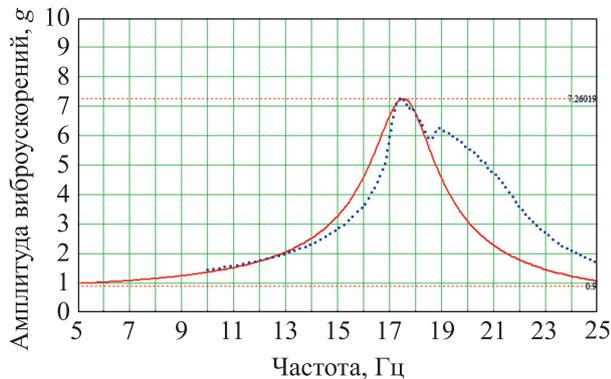


Рис. 5. Расчетная (—) и экспериментальная (.....) АЧХ виброускорений груза при виброускорении основания 0,9g

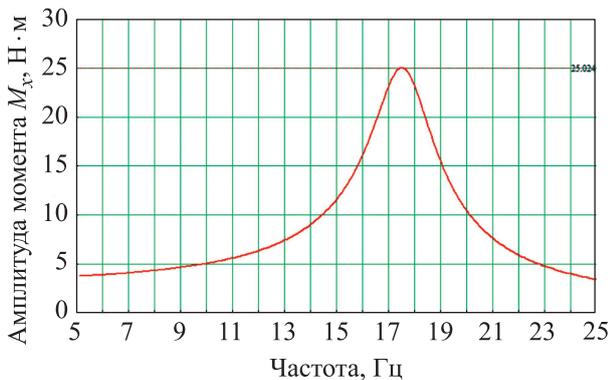


Рис. 6. Расчетная АЧХ момента M_x в заделке

Расчетная АЧХ моментов M_x (моментов в заделке вокруг оси x (см. рис. 4) приведена на рис. 6.

Максимальное значение момента $\max M_x^{\text{расч}} = 25,024 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Таким образом, установлено, что при синусоидальном возбуждении основания и одинаковых расчетных и экспериментальных виброускорениях дополнительной массы на резонансе максимальный момент на резонансе (на расчетной модели) составляет около 25 Н·м. Так как в эксперименте наблюдается страгивание в УШ, считаем, что оно происходит, когда момент страгивания достигает 25 Н·м.

Оценим момент в заделке по выражению

$$\max M_x^{\text{эксп}} = F_{\text{ин}}^{\text{рез}} L_{\text{гр}} = M_{\text{гр}} \max a_z^{\text{эксп}} L_{\text{гр}} = 26,2 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где $F_{\text{ин}}^{\text{рез}}$ — сила инерции груза на резонансе; $L_{\text{гр}}$ — плечо (расстояние от центра масс груза до заделки); $M_{\text{гр}}$ — момент силы тяжести груза.

Упрощенная оценка момента в заделке близка к значению, полученному на конечно-элементной модели.

Расчет ИС при гармоническом возбуждении.

Для оценки моментов, возникающих в УШ ИС при кинематическом возбуждении основания, в конечно-элементную модель ИС введены два упругих элемента — угловые пружины, работающие на скручивание вокруг оси X (рис. 7).

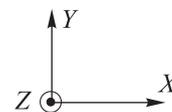
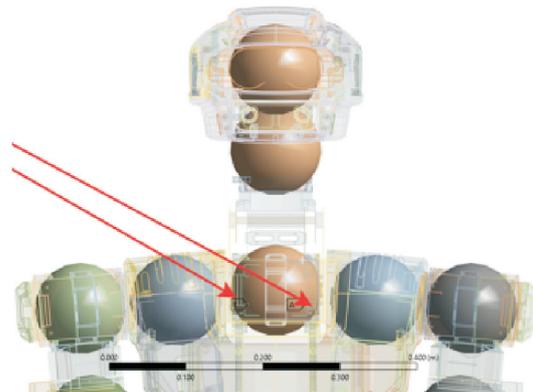


Рис. 7. Схема установки угловых пружин

H: Harmonic Response

Acceleration
Frequency: 5. Hz
10.03.2024 22:50

Acceleration: (Real) 1.277, (Imag) 0. m/s²
Components: (Real) 0., 0., 1.277 m/s²
Components: (Imag) 0., 0., 0. m/s²

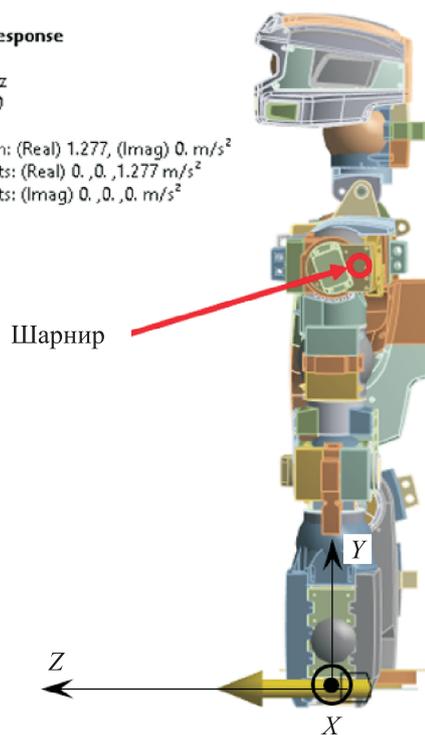


Рис. 8. Схема кинематического возбуждения ИС

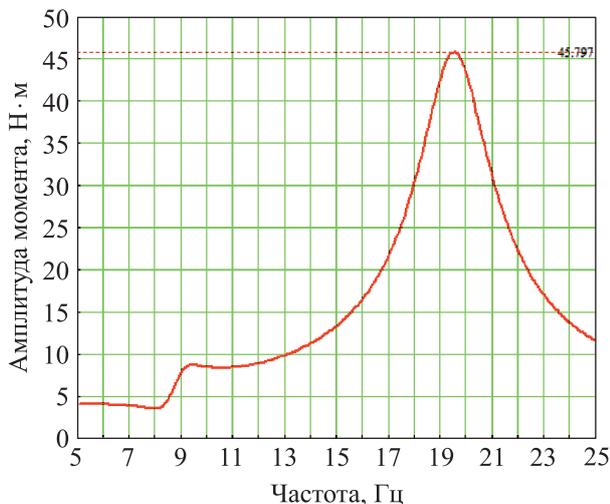


Рис. 9. АЧХ суммарного момента в двух угловых пружинах при гармоническом возбуждении основания ИС с амплитудой виброускорения 1,277 м/с²

Жесткости угловых пружин приняты равными $1 \cdot 10^{10}$ Н·м/рад. Их значения выбраны из условия совпадения собственных частот системы с угловыми пружинами с собственными частотами ИС, в которой головной модуль связан с корпусом абсолютно жестко.

Схема кинематического возбуждения ИС приведена на рис. 8. Рассмотрено кинематическое возбуждение основания ИС в диапазоне

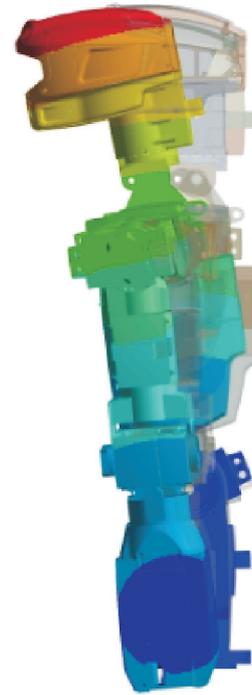


Рис. 10. Модель собственной формы ИС на частоте $f = 19,5$ Гц

5...25 Гц с амплитудой виброускорения 1,277 м/с² во фронтальном направлении (вдоль оси Z).

АЧХ суммарного момента в двух угловых пружинах приведена на рис. 9. Максимум моментов достигается при частоте 19,5 Гц. Максимальный момент $\max M_X^{\text{расч}} = 45,8$ Н·м.

Согласно результатам расчета, на частоте 19,5 Гц наблюдается резонансный пик на АЧХ моментов (см. рис. 9). Выполнен модальный анализ, и получены собственные частоты и формы ИС.

По результатам модального анализа установлено, что частота 19,5 Гц является одной из собственных частот ИС. Соответствующая этой резонансной частоте собственная форма приведена на рис. 10. На этой форме ИС совершает изгибные колебания как консольно-закрепленная балка. Максимальные амплитуды колебаний на этой форме достигаются на головном модуле.

Виброиспытания ИС при случайном возбуждении (расчет). Виброиспытания при случайном возбуждении проведены для значений спектральной плотности, в 10 раз превышающих уровень, заданный в техническом задании (ТЗ) на проект (относительно заданных в ТЗ нагрузок, умноженных на коэффициент безопасности, равный 2). Результаты виброиспы-

Спектральная плотность мощности ускорения, $g^2/Гц$

Номинальная по ТЗ	0,00020	0,00020	0,00025	0,00025	0,00030	0,00020	0,00010
Максимальная по ТЗ	0,0004	0,0004	0,0005	0,0005	0,0006	0,0004	0,0002
Реализованная в эксперименте	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,004	0,002

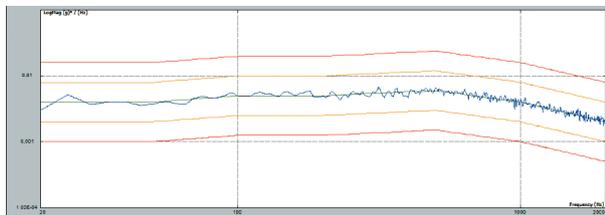


Рис. 11. Спектральная плотность входного воздействия, реализованная в эксперименте (—)

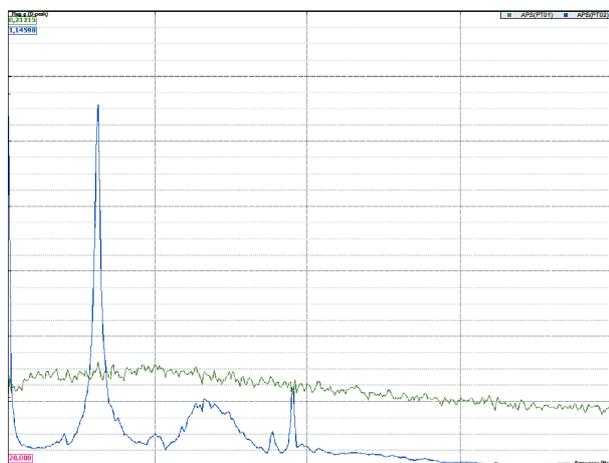


Рис. 12. Спектральная плотность отклика на входное воздействие, измеренная вторым (—) и третьим (—) акселерометрами

таний — характеристики случайного возбуждения — приведены в таблице.

Реализованная в эксперименте спектральная плотность входного воздействия приведена на рис. 11, а спектральная плотность отклика на него — на рис. 12. По результатам виброиспытаний при случайном возбуждении страгивание в УШ не зафиксировано.

Выводы

1. Проведены виброиспытания целевого УШ ИС при гармоническом возбуждении с разверткой по частоте в диапазоне 5...25 Гц. В эксперименте наблюдалось страгивание в УШ. Расчетным путем получена оценка момента, при котором происходило страгивание. Согласно расчетным данным, момент страгивания в УШ

при гармоническом возбуждении основания составил около 25 Н·м.

2. По результатам конечно-элементных расчета установлено, что ИС имеет резонансную частоту, составляющую 19,5 Гц (при консольном закреплении ИС за основание). На этой форме ИС совершает изгибные колебания как консольно-закрепленная балка. Максимальные амплитуды колебаний на этой форме достигаются на головном модуле. Суммарный максимальный момент в связях между головным модулем и корпусом составил 45,8 Н·м.

3. Момент страгивания в УШ в 1,8 раза меньше, чем момент, обусловленный силами инерции головного модуля, возникающими при кинематическом возбуждении основания ИС (для заданного уровня демпфирования, соответствующего страгиванию в УШ при виброиспытаниях). Это означает, что при гармоническом возбуждении основания с нагрузками, определенными ТЗ, в УШ может произойти страгивание.

4. По результатам виброиспытаний установлено, что в случае прохода через резонанс амплитуды углов поворота целевого УШ при страгивании оказывались кратковременными и не превышали 3...4°. Неконтролируемых колебаний не наблюдалось. Это обусловлено тем, что после страгивания резонансная частота исследованной системы (целевой УШ — два стержня — дополнительная масса) изменялась, и при страгивании происходил уход с резонанса, что приводило к снижению нагрузок и прекращению страгивания. Ввиду достаточно узкой резонансной области после прекращения страгивания оно не возобновлялось, так как испытания проводились с разверткой по частоте, и текущая частота возбуждения после остановки УШ уже не совпадала с резонансной.

5. Проведены виброиспытания УШ при случайном возбуждении для спектральной плотности в 10 раз, превышающей уровень по ТЗ (относительно заданных в ТЗ нагрузок, умноженных на коэффициент безопасности, равный 2). По результатам виброиспытаний страгивание в УШ не зафиксировано.

Литература

- [1] Уведомление Министерства промышленности и информационных технологий КНР о выпуске «Руководящих заключений по инновациям и разработке человекоподобных роботов». URL: https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html (дата обращения: 01.01.2025).
- [2] Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 3, с. 66–81.
- [3] Ackerman E. GITAI's autonomous robot arm finds success on ISS. *IEEE Spectrum*, 2021. URL: <https://spectrum.ieee.org/gitai-space-robot/> (дата обращения: 01.01.2025).
- [4] GITAI develops Lunar Robotic Rover R1 and conducts successful demonstration at JAXA's Mock Lunar Surface Environment. gitai.tech: веб-сайт. URL: <https://gitai.tech/2022/02/10/gitai-develops-lunar-robotic-rover-r1/> (дата обращения: 01.01.2025).
- [5] Baker W., Kingston Z.K., Moll M. et al. Robonaut 2 and you: specifying and executing complex operations. *IEEE ARSO*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ARSO.2017.8025204>
- [6] Badger J., Hulse A., Taylor R. et al. Model-based robotic dynamic motion control for the Robonaut 2 humanoid robot. *13th IEEE-RAS Humanoids*, 2013, pp. 62–67, doi: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7029956>
- [7] Berthold B., Hammer T., Wagner R. et al. Agile Justin: an upgraded member of DLR's family of lightweight and torque controlled humanoids, 2014, https://www.researchgate.net/publication/267024836_Agile_Justin_An_Upgraded_Member_of_DLR's_Family_of_Lightweight_and_Torque_Controlled_Humanoids
- [8] Schmaus P., Leidner D., Krüger T. et al. Preliminary insights from the METERON SUPVIS Justin space-robotics experiment. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 3836–3843, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2856906>
- [9] Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M. et al. AILA — design of an autonomous mobile dual-arm robot. *IEEE ICRA*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979775>
- [10] Пермяков А.Ф., Дудоров Е.А., Сохин И.Г. и др. Подготовка и проведение космического эксперимента с применением антропоморфного робота «Федор». *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2020, № 3, с. 64–72, doi: <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-3-64-72>
- [11] Курицын А.А., Дмитриев В.Н., Довженко В.А. и др. Основные результаты подготовки и деятельности экипажа при выполнении КЭ «Испытатель» на борту РС МКС. *Плотируемые полеты в космос. Мат. XIII Межд. науч.-практ. конф. Звездный городок, НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина*, 2019, с. 45–47.
- [12] Melrose K. *China's new space robot looks suspiciously like Iron Man*. cbr.com: веб-сайт. URL: <https://www.cbr.com/chinas-new-space-robot-looks-suspiciously-like-iron-man/> (дата обращения: 1.11.2023).
- [13] *Japan's ISS Kirobo robot is lonely in space*. cnet.com: веб-сайт. URL: <https://www.cnet.com/culture/japans-iss-kirobo-robot-is-lonely-in-space/> (дата обращения: 01.11.2023).
- [14] *Антропоморфный робот Valkyrie (R5)*. URL: <https://www.nasa.gov/technology/r5/> (дата обращения: 01.11.2023).
- [15] *Решение № 1 КНТС Роскосмоса от 13.03.2015 г. о включении космического эксперимента «Теледроид» в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС».*

References

- [1] *Uvedomlenie Ministerstva promyshlennosti i informatsionnykh tekhnologiy KNR o vyuske «Rukovodyashchikh zaklyucheniy po innovatsiyam i razrabotke chelovekopodobnykh robotov»* [Notice from the ministry of industry and information technology of the PRC on the release of “Guiding Opinions on Innovation and Development of Humanoid Robots”]. URL: https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2023/art_48fe01d562644aedb7ea3f4256df8190.html (accessed: 01.01.2025). (In Russ.).
- [2] Dudorov E.A. Robotic systems for space purposes. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii* [Space Technique and Technologies], 2022, no. 3, pp. 66–81. (In Russ.).

- [3] Ackerman E. GITAI's autonomous robot arm finds success on ISS. *IEEE Spectrum*, 2021. URL: <https://spectrum.ieee.org/gitai-space-robot/> (accessed: 01.01.2025).
- [4] *GITAI develops Lunar Robotic Rover R1 and conducts successful demonstration at JAXA's Mock Lunar Surface Environment*. gitai.tech: website. URL: <https://gitai.tech/2022/02/10/gitai-develops-lunar-robotic-rover-r1/> (accessed: 01.01.2025).
- [5] Baker W., Kingston Z.K., Moll M. et al. Robonaut 2 and you: specifying and executing complex operations. *IEEE ARSO*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ARSO.2017.8025204>
- [6] Badger J., Hulse A., Taylor R. et al. Model-based robotic dynamic motion control for the Robonaut 2 humanoid robot. *13th IEEE-RAS Humanoids*, 2013, pp. 62–67, doi: <https://doi.org/10.1109/HUMANOIDS.2013.7029956>
- [7] Berthold B., Hammer T., Wagner R. et al. *Agile Justin: an upgraded member of DLR's family of lightweight and torque controlled humanoids*, 2014, https://www.researchgate.net/publication/267024836_Agile_Justin_An_Upgraded_Member_of_DLR's_Family_of_Lightweight_and_Torque_Controlled_Humanoids
- [8] Schmaus P., Leidner D., Krüger T. et al. Preliminary insights from the METERON SUPVIS Justin space-robotics experiment. *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 3836–3843, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2856906>
- [9] Lemburg J., Gea Fernandez J., Eich M. et al. AILA — design of an autonomous mobile dual-arm robot. *IEEE ICRA*, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979775>
- [10] Permyakov A.F., Dudorov E.A., Sokhin I.G. et al. Preparing and performing a space experiment with use of the anthropomorphic robot “Fedor”. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences], 2020, no. 3, pp. 64–72, doi: <https://doi.org/10.17213/1560-3644-2020-3-64-72> (in Russ.).
- [11] Kuritsyn A.A., Dmitriev V.N., Dovzhenko V.A. et al. [Main results of the crew training and activities during the performance of the Testator KE onboard the ISS RS]. *Pilotiruemye poley v kosmos. Mat. XIII Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Manned Space Flights. Proc. XIII Int. Sci.-Pract. Conf.]. Zvezdnyy gorodok, NII TsPK im. Yu.A. Gagarina Publ., 2019, pp. 45–47. (In Russ.).
- [12] Melrose K. *China's new space robot looks suspiciously like Iron Man*. cbr.com: website. URL: <https://www.cbr.com/chinas-new-space-robot-looks-suspiciously-like-iron-man/> (accessed: 1.11.2023).
- [13] *Japan's ISS Kirobo robot is lonely in space*. cnet.com: website. URL: <https://www.cnet.com/culture/japans-iss-kirobo-robot-is-lonely-in-space/> (accessed: 01.11.2023).
- [14] *Antropomorfnyy robot Valkyrie (R5)*. URL: <https://www.nasa.gov/technology/r5/> (accessed: 01.11.2023).
- [15] *Reshenie no. 1 KNTS Roskosmosa ot 13.03.2015 g. o vklyuchenii kosmicheskogo eksperimenta «Teledroid» v «Dolgosrochnuyu programmu nauchno-prikladnykh issledovaniy i eksperimentov, planiruemyykh na Rossiyskom segmente MKS»* [Decision no. 1 of Roscosmos CSTS of 13.03.2015 on inclusion of the Teledroid space experiment into the “Long-term program of scientific and applied research and experiments planned on the ISS Russian Segment”]. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 20.02.2025

Информация об авторах

ДУДОРОВ Евгений Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры МиТОДиМ. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; лауреат премии РФ в области науки и техники; исполнительный директор АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: dudorov@npo-at.ru).

Information about the authors

DUDOROV Evgeniy Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Metal Forming Machines and Technologies. Nosov Magnitogorsk State Technical University; recipient of the Award of the Russian Federation in the field of science and technology, Executive Director. JSC Scientific and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: dudorov@npo-at.ru).

ГОРШЕНИН Владимир Петрович — доктор экономических наук, профессор, главный научный сотрудник. АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: gorvp.58@mail.ru).

КОЛБАСИН Борис Геннадьевич — руководитель научно-технического отдела № 2 по направлению «Космическая робототехника». АО «Научно-производственное объединение «Андроидная техника» (109518, Москва, Российская Федерация, ул. Грайвороновская, д. 23, e-mail: boris.kolbasin@npo-at.com).

ТАРАНЕНКО Павел Александрович — кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Техническая механика», директор центра виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: taranenkopa@susu.ru).

РОМАНОВ Вячеслав Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика». ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: romanovva@susu.ru).

ТЕЛЕГИН Дмитрий Владимирович — инженер центра виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (454080, Челябинск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 76, e-mail: telegindv@susu.ru).

GORSHENIN Vladimir Petrovich — Doctor of Science (Economics), Professor, Chief Researcher. JSC Scientific and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: gorvp.58@mail.ru).

KOLBASIN Boris Gennadyevich — Head of the Scientific and Technical Department No. 2 in the field of Space Robotics. JSC Scientific and Production Association Android Technics (109518, Moscow, Russian Federation, Grayvoronovskaya St., Bldg. 23, e-mail: boris.kolbasin@npo-at.com).

TARANENKO Pavel Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Department of Technical Mechanics, Director of the Center for Vibration Testing and Structural Condition Monitoring. Federal State Budgetary Educational Institution South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: taranenkopa@susu.ru).

ROMANOV Vyacheslav Alexandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Department of Technical Mechanics. Federal State Budgetary Educational Institution South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: romanovva@susu.ru).

TELEGIN Dmitriy Vladimirovich — Engineer, Center for Vibration Testing and Structural Condition Monitoring. Federal State Budgetary Educational Institution South Ural State University (National Research University) (454080, Chelyabinsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 76, e-mail: telegindv@susu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дудоров Е.А., Горшенин В.П., Колбасин Б.Г., Тараненко П.А., Романов В.А., Телегин Д.В. Расчетная и экспериментальная оценка динамических свойств исполнительной системы робототехнического комплекса космического назначения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 20–28.

Please cite this article in English as:

Dudorov E.A., Gorshenin V.P., Kolbasin B.G., Taranenko P.A., Romanov V.A., Telegin D.V. Computational and experimental assessment of the executive system dynamic properties in a space-based robotic complex. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 20–28.