

Научная статья  
УДК 004.94:519.876.5  
DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАХВАТА АНТРОПОМОРФНОЙ КИСТИ РУКИ

**Олег Валерьевич Гусев**

*Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева,  
Рыбинск, Россия*  
gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы гибридного моделирования антропоморфной кисти руки человека на основе интеграции CAD/CAE-систем и среды физического моделирования, многозвенных пространственных механизмов SimMechanics системы Simulink, применяемых для симуляции динамики захвата и анализа усилий, развиваемых кистью. В качестве объекта исследования используется твердотельная модель кисти руки, разработанная в среде SolidWorks.

**Ключевые слова:** антропоморфная кисть, SimScape, SimMechanics, динамический расчет, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Гусев О. В. Имитационное моделирование захвата антропоморфной кисти руки // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 4. С. 18–25. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3.

Original article

## SIMULATION OF ANTHROPOMORPHIC WRIST GRIPPING

**Oleg V. Gusev**

*Rybinsk State Technical University, Rybinsk, Russia*  
gusevov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7380-5470>

**Abstract.** The article examines the issues of hybrid simulation of anthropomorphic human wrist based on the integration of CAD/CAE systems and environment of physical simulation, as well as the SimMechanics multijointed special mechanisms of the Simulink system, which are used for grip dynamics simulation and wrist effort analysis. The object of the study is a solid model of a wrist designed in SolidWorks.

**Keywords:** anthropomorphic wrist, SimScape, SimMechanics, dynamic calculation, simulation

**For citation:** Gusev O. V. Simulation of anthropomorphic wrist gripping. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(4):18–25. DOI 10.35266/1999-7604-2023-4-3.

### ВВЕДЕНИЕ

Рука человека является сложным органом, универсальность которого достигается за счет ее комплексной анатомической структуры. Современной тенденцией является разработка антропоморфных роботизированных рук с манипуляциями, близкими к производимым человеком. В последние годы был разработан ряд антропоморфных роботизированных рук [1, 2], которые имитируют анатомическую структуру руки человека. Во всех случаях предварительно разрабатывается модель, с примене-

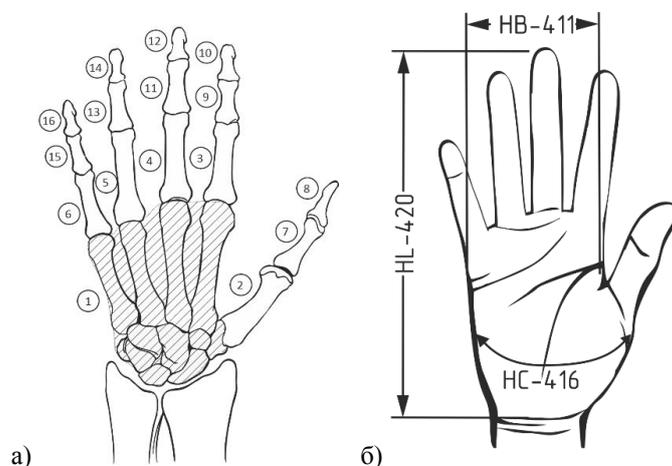
нием которой возможно произвести анализ динамических характеристик хвата человеческой руки, расчет усилий, развиваемых в процессе хвата, а также проанализировать алгоритмы прямой и инверсной кинематики.

Движения активных частей роботизированных рук обеспечивают, как правило, два основных действия: «захват» и «щуп». «Захват» позволяет выполнять действия с крупными объектами вроде поднятия или перемещения стула. Действие «щуп» позволяет выполнять работы, связанные с мелкой моторикой, напри-

мер, завязывание шнурков [3]. Естественно, что такие действия, как поднятие тяжелого предмета и захвата пластикового стакана, требуют развития разных усилий. Поэтому при реализации разных типов действий необходим предварительный расчет усилий, развиваемых рукой и ее активными частями. Целью статьи является разработка антропоморфной твердотельной модели кисти руки человека, которая позволит проанализировать усилия, развиваемые кистью при ее движении, а также измерить динамические характеристики хвата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с тем, что геометрические размеры антропоморфной твердотельной модели должны соответствовать параметрам кисти взрослого человека [4], при разработке модели использовалась техника масштабирования. За основу взяты три линейных размера кисти человека: длина (Hand Length – HL), ширина (Hand Breadth – HB) и значение окружности кисти (Hand Circumference – HC) (рис. 1).



**Рис. 1. Антропоморфные размеры руки человека:**

- а) маркировка фаланг кисти человека в соответствии с данными;  
б) измерение параметров HL, HB и HC руки в соответствии с данными исследования

*Примечание:* составлено автором по [5, 6].

Перечисленные значения можно измерить при натуральных испытаниях в рамках эксперимента либо получить их из литературных источников [5, 6]. В качестве предельных зна-

чений параметров HL, HB и HC при проектировании модели кисти использовались данные измерений, проведенных в [5] для мужчин в возрасте 40 лет (табл. 1).

*Таблица 1*

### Значение HL, HB и HC для 3-х перцентилей выборки данных исследований

№ параметра, мм	5-я перцентиль	50-я перцентиль	95-я перцентиль
420 – HL	179	193	206
411 – HB	82	89	96
416 – HC	203	218	234

*Примечание:* составлено автором на основании источника [5].

Основываясь на данных табл. 1, параметры проектируемой антропоморфной кисти должны находиться в пределах  $193 \times 89 \times 42$  мм (использовалась 50-я перцентиль). Следующим этапом является расчет размеров фаланг пальцев. При этом параметры HL, HB и HC

выступают в качестве масштабирующих коэффициентов. Нормированные значения размеров фаланг пальцев даны в табл. 2 и получены из работы [6]. Номера строк в табл. 2 соответствуют номерам фаланг пальцев на рис. 1а.

Таблица 2

**Размеры и масса фаланг пальцев руки**

№	Линейные размеры		Масса, кг
	a = 0,451; b = 1,400; c = 1,200		
1	<i>l</i>	<i>r/l</i>	<i>m</i>
2	0,26	0,155	0,121
3	0,237	0,146	0,03
4	0,254	0,136	0,033
5	0,243	0,119	0,022
6	0,196	0,147	0,018
7	0,173	0,2	0,022
8	0,15	0,192	0,014
9	0,15	0,192	0,014
10	0,121	0,19	0,007
11	0,173	0,167	0,016
12	0,121	0,19	0,007
13	0,168	0,172	0,015
14	0,121	0,19	0,007
15	0,121	0,19	0,007
16	0,116	0,15	0,004

Примечание: составлено автором на основании источника [6].

Длина фаланг пальцев (l) дана в табл. 1 в нормализованной форме. В качестве нормирующего параметра выступает значение длины кисти (параметр HL, рис. 1). Параметры b и c (ширина и толщина фаланг соответственно) приведены к значениям параметров HB и HC соответственно. Значение массы фаланг (m) приведено к общей массе кисти. В связи с тем,

что для каждого пальца рассчитывается три значения радиуса (r), за основное при разработке твердотельной модели брали максимальное значение радиуса из трех. В табл. 3 даны значения размеров пальцев кисти с использованием масштабирующих коэффициентов HL, HB и HC и данных табл. 2.

Таблица 3

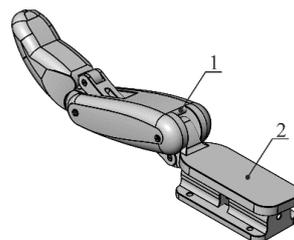
**Размеры пальцев кисти, вычисленные с применением масштабирующих коэффициентов**

Наименование	Длина, мм	Радиус, мм
Большой (thumb finger)	112,5	7,8
Указательный (index finger)	98	6,8
Средний (middle finger)	105,8	5,8
Безымянный (ring finger)	102,7	5,6
Мизинец (little finger)	83,6	4,5

Примечание: составлено автором.

Палец проектируемой кисти должен обеспечить изменение угла при сгибании от 0 до 180°, где 0° – выпрямленный палец, а 180° –

согнутый (рис. 2). Набор комбинаций пальцев позволяет реализовывать основные виды хватов, необходимых в повседневной жизни.



**Рис. 2. Конструкция твердотельной модели пальца:**

1 – элемент крепления подвижного механизма привода; 2 – площадка размещения линейного привода

Примечание: составлено автором.

При проектировании твердотельной модели пальца количество его элементов было сведено к минимуму. Для реализации движения пальца, его сгибания и разгибания в биопротезировании применяются линейные приводы [7, 8]. С использованием линейных приводов возможно добиться плавности движения подвижных частей кисти руки. При этом линейный привод реализует такой же тип движения, что и человеческие мышцы. В проектируемой

модели привод размещается в пространстве элемента 2 (рис. 2), крепление его движущего механизма осуществляется к элементу 1 пальца. Аналогичную конструкцию имеют все остальные пальцы модели кроме большого, который имеет дополнительную ось вращения. На рис. 3 показана разработанная твердотельная модель кисти, спроектированная с учетом масштабирующих коэффициентов НL, НВ и НС.

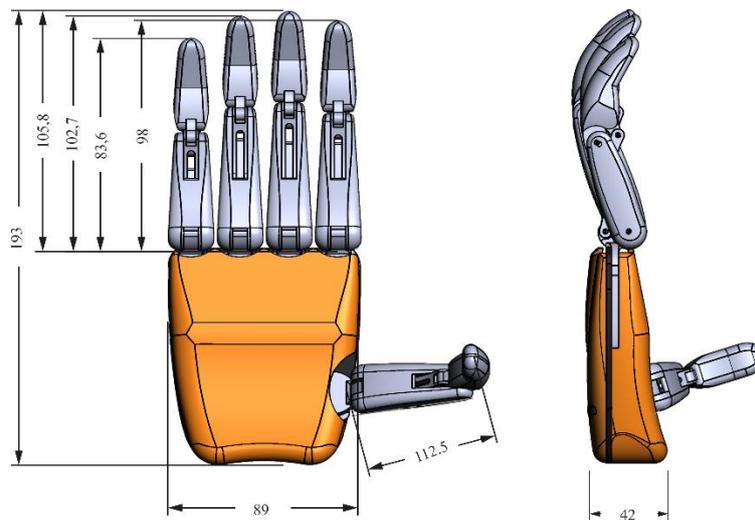


Рис. 3. Размеры антропоморфной твердотельной модели кисти руки

Примечание: составлено автором.

Разработка твердотельной модели осуществлялась с использованием CAD/CAE информационных технологий. При этом в ряде CAD/CAE-систем существуют встроенные средства моделирования движения и анализа динамики механизмов (например, SolidWorks Simulation). Однако подобные инструменты поддерживают анализ только простейших разомкнутых систем. В разработке при анализе динамики схвата применялся гибридный метод моделирования. Метод основан на использовании для разработки твердотельной модели кисти одной из CAD-систем (SolidWorks, Autodesk Inventor, PTC ProEngineer) с последующим импортом модели в среду имитационного моделирования Simulink, которая в своем составе содержит специализированный пакет расширения SimMechanics [9]. Пакет SimMechanics служит для моделирования и расчета многодельных пространственных механизмов. SimMechanics содержит встроен-

ный редактор, который позволяет с использованием примитивов разрабатывать модели простейших систем, т. е. сама твердотельная модель для анализа может быть построена с использованием только внутреннего редактора пакета. Однако данный подход довольно трудоемок, при этом погрешности при моделировании часто приводят к отказам в процессе расчета.

Таким образом, гибридная модель включает в себя твердотельную CAD-модель кисти, которая транслируется в систему MATLAB/Simulink. Разработчики MATLAB/Simulink позволяют использовать трансляторы [10] сборок для таких CAD-систем, как SolidWorks, Autodesk Inventor и PTC ProEngineer. Механизм импорта твердотельной модели детально описан в [9, 11] и в сокращенном виде представлен на рис. 4. Для импортирования твердотельной модели антропоморфной кисти в систему MATLAB использовалась свободно-распро-

страняемая утилита SimScape Multibody Link, которая преобразует данные механической системы из CAD-системы в приложение физического моделирования SimScape Multibody. Утилита SimScape Multibody Link генерирует два файла, содержащих информацию о геометрии твердотельной модели (файл \*.stl), а также файл данных, содержащий информацию

о сопряжении деталей между собой и их физических характеристиках (файл данных .xml).

В среде Simulink/SimScape твердотельная модель (файл \*.stl) визуализируется в редакторе программы, и на основе полученных данных генерируется Simulink-модель (файл \*.slx/\*.mdl) со связями и сопряжениями в системе SimMechanics.



Рис. 4. Пользовательский импорт CAD-модели в систему MATLAB/Simulink  
 Примечание: составлено автором.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационная модель антропоморфной кисти, импортированная в систему Simulink/SimScape Multibody, представлена на рис. 5.

К блокам, которые содержат данные о геометрии фаланг пальцев, добавлены датчики, анализирующие положения угла и скорости при анализе динамики схвата.

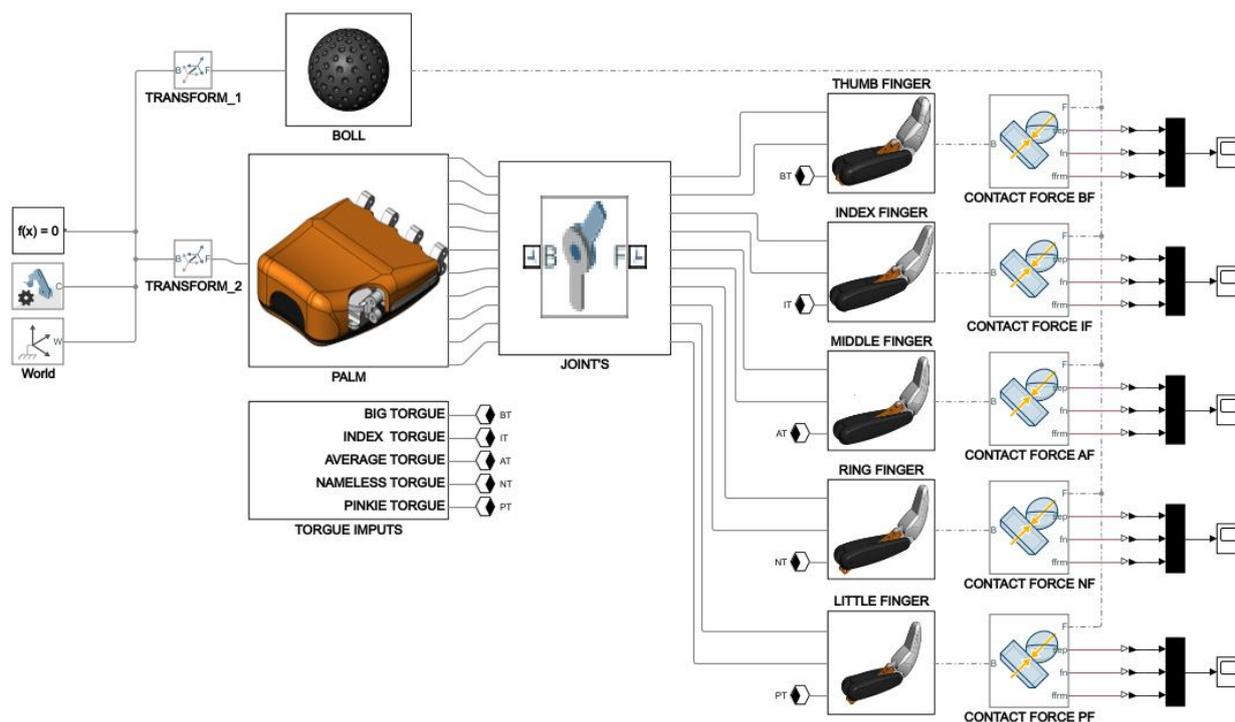


Рис. 5. Имитационная блочная модель Simulink/SimScape антропоморфной кисти руки  
 Примечание: составлено автором.

Твердотельные элементы сборки (блоки Solid) в блочной модели соединяются между собой через фреймы (Frames). Каждый палец

состоит из набора твердотельных сегментов (блоков Solid), блоки соединяются между собой и с ладонью (блок PALM) при помощи

сочленений (блок JOINTS на рис. 5). Сегменты кисти руки объединяются в кинематические пары, которые в свою очередь объединяются в кинематические цепи и образуют иерархические цепочки. При реализации как прямой, так и инверсной кинематики фаланги пальцев руки должны двигаться в разумных антропоморфических пределах. Пределы, которые ограничивают движение суставов руки, задаются внутри блоков JOINTS (параметр constraints блока).

На рис. 5 показана блок-схема имитационной модели кисти руки с фалангами, блоком контактной поверхности (блок BOLL) и блоками моделирования контакта (блоки CONTACT FORCE). При моделировании захвата тела сферической формы необходимо описать 5 точек контакта сферы с фалангами пальцев [12]. Сама сфера (блок BOLL) жестко закреплена, т. е. имеет кинематическое огра-

ничение по перемещению. В связи с тем, что в качестве двигателей в модели используются линейные приводы, то усилия, создаваемые ими, задаются блоком TORQUE INPUTS. Блок генерирует усилия, подаваемые на фаланги пальцев (значения усилий задаются в Ньютонах).

На рис. 6 показана модель кисти руки при симуляции схвата мяча в системе Mechanics Explorer. Mechanics Explorer является инструментом SimScape Multibody на основе OpenGL Silicon Graphics API, который позволяет визуализировать и исследовать модели в динамике взаимодействия их со средой либо с отдельными предметами. Точки приложения усилий от линейных приводов показаны в среде Mechanics Explorer в виде маркеров (на рис. 6 в системе Mechanics Explorer маркеры изображены в виде сфер).

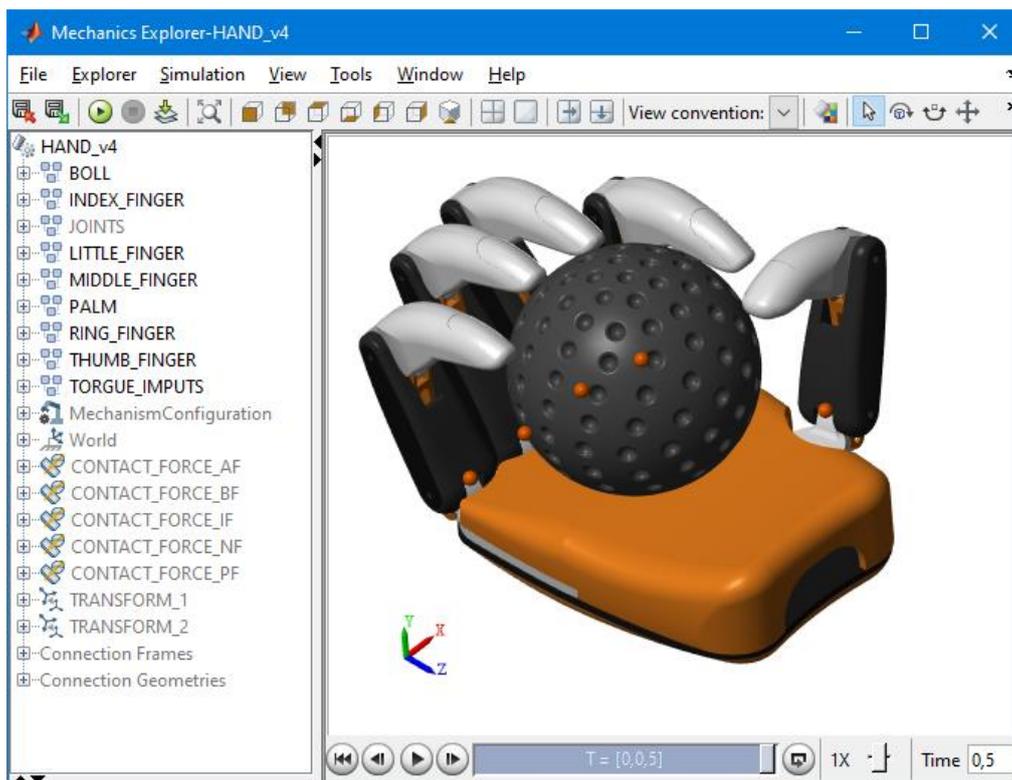


Рис. 6. Моделирование хвата в среде в Mechanics Explorer

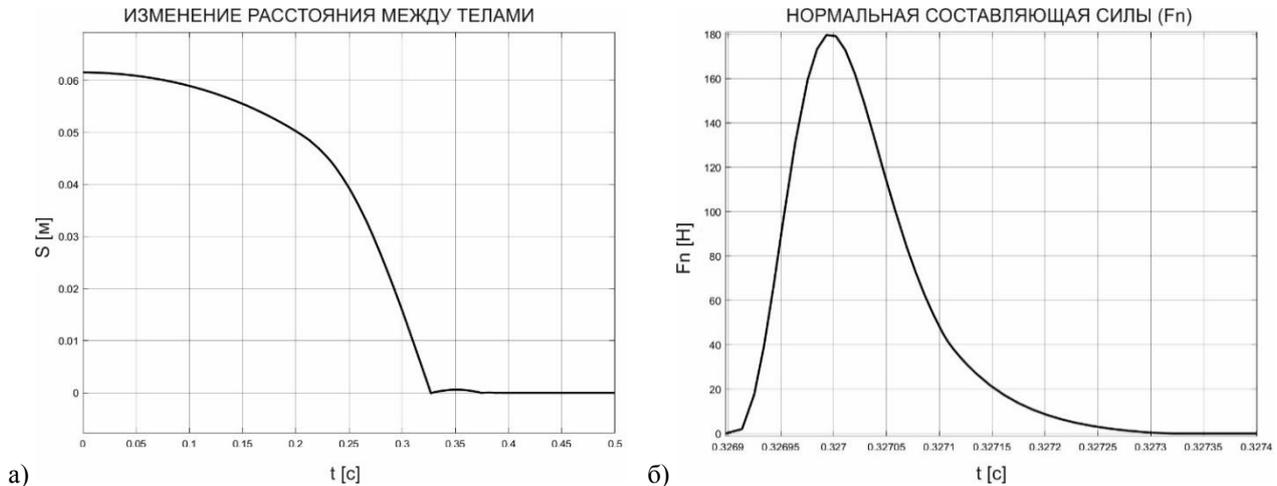
Примечание: составлено автором.

Для моделирования динамического контактного взаимодействия фаланг пальцев с предметом (блок BOLL на рис. 5) и анализа усилий нажатия использовался блок CONTACT

FORCE (см. рис. 5). Данный блок позволяет получить такие характеристики контактного взаимодействия, как значение нормальной составляющей контактного взаимодействия

(Normal forces), значение силы трения (Friction forces) в точке контакта и изменение расстояния между контактируемыми телами (Separation Distance).

На рис. 7 изображены результаты имитационного моделирования процессов при захвате объекта.



**Рис. 7. Результаты имитационного моделирования хвата:**

- а) изменение расстояния между кончиком указательного пальца и поверхностью шара;  
б) изменение нормальной составляющей силы в точке касания поверхностей

*Примечание:* составлено автором.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выбора линейного привода для антропоморфных протезов необходимо знать две его характеристики. К первой относят силу, которую привод должен приложить для перемещения или удержания объекта. Ко второй характеристике относят требуемую скорость движения линейного привода, которая связана со скоростью хвата антропоморфной кисти.

Приведены графики изменения положения указательного пальца (блок INDEX FINGER на рис. 5) и силы контактного взаимодействия

при выполнении обхватывающего захвата сферы. Аналогичные графики изменения силы и расстояния до поверхности тела имеют остальные пальцы кисти. Движение механизма кисти полностью детерминировано. Исходя из результатов моделирования, возможно подобрать такой линейный привод, который будет удовлетворять требованиям для реализации необходимой скорости хвата, а также усилий, развиваемых при захвате предметов.

## Список источников

1. Мирошина Ю. Д. Бионические протезы в современной ортопедии // Молодой ученый. 2021. № 14. С. 47–49.
2. Wang D., Xiong Y., Zi B. et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms. *Mechanisms and Machine Theory*. 2021;155:104094.
3. Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*. 1982;12(3):289–299.
4. Neil A., Andris F. A graphic model of the human hand using CATIA. *International Journal of industrial Ergonomics*. 1993;12(4):255–264.
5. *National Aeronautics and Space Administration*. Anthropometry and biomechanics. In: NASA-STD-3000,

## References

1. Miroshina Yu. D. Bionicheskie protezy v sovremennoi ortopedii. *Molodoi uchenyi*. 2021;(14):47–49. (In Russian).
2. Wang D., Xiong Y., Zi B. et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms. *Mechanisms and Machine Theory*. 2021;155:104094.
3. Okada T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*. 1982;12(3):289–299.
4. Neil A., Andris F. A graphic model of the human hand using CATIA. *International Journal of industrial Ergonomics*. 1993;12(4):255–264.

- Man-System Integration Standards. Vol. I, Section 3. 1995. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm> (дата обращения: 17.10.2023).
6. Biryukova E. V., Yourovskaia V. Z. A model of human hand dynamics. In: Schuind F., An K. N., Cooney W. P., Garcia-Elia M., editors. *Advances in the biomechanics of the hand and wrist*. NATO ASI Series. Vol. 256. Boston, MA: Springer; 1994. p. 107–122.
  7. Zolnoun D., Gandomi Y. A. Biomechanical model of human index finger during examination. *Journal of Science and Medicine*. 2021;3(1):1–14.
  8. Li L., Godaba H., Ren H. et al. Bioinspired soft actuators for eyeball motions in humanoid robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019;24(1):100–108.
  9. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013;1(7):251–255.
  10. Singla A., Singh G., Virk G. S. et al. Matlab/Sim Mechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. *Perspectives in Sciences*. 2016;8:351–354.
  11. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works. In: Quaglia G., Gasparetto A., Petuya V., Carbone G., editors. *Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 108. Cham: Springer; 2021. p. 264–272.
  12. Corral E., Gismeros Moreno R., Meneses J. et al. Spatial algorithms for geometric contact detection in multibody system dynamics. *Mathematics*. 2021;9(12):1359.
  5. *National Aeronautics and Space Administration. Anthropometry and biomechanics*. In: NASA-STD-3000, Man-System Integration Standards. Vol. I, Section 3. 1995. URL: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm> (accessed: 17.10.2023).
  6. Biryukova E. V., Yourovskaia V. Z. A model of human hand dynamics. In: Schuind F., An K. N., Cooney W. P., Garcia-Elia M., editors. *Advances in the biomechanics of the hand and wrist*. NATO ASI Series. Vol. 256. Boston, MA: Springer; 1994. p. 107–122.
  7. Zolnoun D., Gandomi Y. A. Biomechanical model of human index finger during examination. *Journal of Science and Medicine*. 2021;3(1):1–14.
  8. Li L., Godaba H., Ren H. et al. Bioinspired soft actuators for eyeball motions in humanoid robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019;24(1):100–108.
  9. Hroncova D., Pastor M. Mechanical system and SimMechanics simulation. *American Journal of Mechanical Engineering*. 2013;1(7):251–255.
  10. Singla A., Singh G., Virk G. S. et al. Matlab/Sim Mechanics based control of four-bar passive lower-body mechanism for rehabilitation. *Perspectives in Sciences*. 2016;8:351–354.
  11. Achilli G. M., Logozzo S., Valigi M. C. et al. Under-actuated soft gripper for helping humans in harmful works. In: Quaglia G., Gasparetto A., Petuya V., Carbone G., editors. *Proceedings of I4SDG Workshop 2021. I4SDG 2021. Mechanisms and Machine Science*. Vol. 108. Cham: Springer; 2021. p. 264–272.
  12. Corral E., Gismeros Moreno R., Meneses J. et al. Spatial algorithms for geometric contact detection in multibody system dynamics. *Mathematics*. 2021;9(12):1359.

#### Информация об авторе

**О. В. Гусев** – кандидат физико-математических наук, доцент.

#### Information about the author

**O. V. Gusev** – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.