

Научная статья

УДК

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180665>

## **МОДЕЛЬ ЗВЕНА ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ И ПОДВИЖНЫМ ПОЛЮСОМ ДЛЯ ЭКЗОКОСТЮМА АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Александр Олегович Блинов<sup>1</sup>, Андрей Валерьевич Борисов<sup>2</sup>✉,  
Роберт Гарабшевич Мухарлямов<sup>3</sup>, Инна Александровна Гончарова<sup>4</sup>,  
Вероника Леонидовна Борисова<sup>5</sup>**

<sup>1,2,4</sup> филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске,  
Смоленск, Россия

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,  
Москва, Россия

<sup>5</sup> Смоленская государственная сельскохозяйственная академия,  
Смоленск, Россия

<sup>1</sup> [alex-blinov67@yandex.ru](mailto:alex-blinov67@yandex.ru)

<sup>2</sup> [BorisowAndrej@yandex.ru](mailto:BorisowAndrej@yandex.ru) ✉

<sup>3</sup> [robgar@mail.ru](mailto:robgar@mail.ru)

<sup>4</sup> [goncharovainnaa@yandex.ru](mailto:goncharovainnaa@yandex.ru)

<sup>5</sup> [borisowaveronika@yandex.ru](mailto:borisowaveronika@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрена достаточно приближенная к реальности модель звена переменной длины, содержащая магнитно-реологическую жидкость для активного управления ее жесткостью под действием изменяющегося внешнего магнитного поля. Новизна модели заключается в наличии подвижного полюса в

нижней точке звена с заданным законом движения. Таким образом, модель звена имеет семь степеней свободы: три поступательных движения полюса, три вращения вокруг полюса и переменная длина звена при движении верхней части относительно полюса. Динамика звена описывается уравнениями Лагранжа, составляющими систему семи обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. В качестве модели управления выбран программный метод задания движения и на его основе определены моменты и силы, которые необходимо приложить для реализации заданных движений звена. Созданная модель звена при соединении в многозвенную конструкцию может найти применение при разработке экзоскостюмов в виде скафандров, защитных экзоскелетов, усиливающих и поддерживающих физические возможности пилотов и космонавтов в авиакосмической отрасли.

**Ключевые слова:** скафандр, экзоскостюм, экзоскелет, изменяемая длина, магнитно-реологическая жидкость, управляемая жесткость

**Финансирование:** исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда и г. Москвы, № 23–21–10065 (<https://rscf.ru/project/23-21-10065/>)

**Для цитирования:** Блинов А.О., Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г., Гончарова И.А., Борисова В.Л. Модель звена переменной длины с управляемой жесткостью и подвижным полюсом для экзоскостюма аэрокосмического назначения // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180665>

Original article

## VARIABLE-LENGTH LINK MODEL WITH CONTROLLABLE STIFFNESS AND MOVABLE POLE FOR AEROSPACE EXOSUIT

Aleksandr O. Blinov<sup>1</sup>, Andrey V. Borisov<sup>2</sup>✉, Robert G. Mukharlyamov<sup>3</sup>,  
Inna A. Goncharova<sup>4</sup>, Veronika L. Borisova<sup>5</sup>

<sup>1,2,4</sup>The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk, Smolensk, Russia

<sup>3</sup>Institute of Physical Research and Technology, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University), Moscow, Russia

<sup>5</sup>Smolensk State Academy of Agriculture, Smolensk, Russia

<sup>1</sup>[alex-blinov67@yandex.ru](mailto:alex-blinov67@yandex.ru)

<sup>2</sup>[BorisowAndrej@yandex.ru](mailto:BorisowAndrej@yandex.ru) ✉

<sup>3</sup>[robgar@mail.ru](mailto:robgar@mail.ru)

<sup>4</sup>[goncharovainnaa@yandex.ru](mailto:goncharovainnaa@yandex.ru)

<sup>5</sup>[borisowaveronika@yandex.ru](mailto:borisowaveronika@yandex.ru)

**Abstract.** The article considers a model of a variable-length link containing a magnetorheological fluid for actively controlling its stiffness under the influence of a changing external magnetic field. The distinguishing feature of the proposed model, compared to those created previously, is the presence of a movable pole at the lower point of the link with a specified law of motion, for example, due to the movement of a link positioned below. Thus, the link model has seven degrees of freedom: three translational movements of the pole, three rotations around the pole, and variable link length when the upper part moves relative to the pole. In the proposed link construction, all elements are modeled as cylinders or disks of finite radius. Moments of inertia are defined for them

relative to axes passing through the link's origin for the three coordinate axes. It is taken into account that the amount of magnetorheological fluid below and above the piston changes as it moves inside the cylinder, with changes in the link's length. This changes the moment of inertia of the link. This determines the novelty of the research. The dynamics of the link are described by Lagrange's equations, constituting a system of seven ordinary second-order differential equations. A software-based motion control method is selected, and based on it, the inverse dynamics problem is solved - determining the control moments and forces that need to be applied to realize the specified link movements. The created link model, when combined into a multi-link structure, can find application in the development of exoskeletons in the form of spacesuits, protective exoskeletons enhancing and supporting the physical capabilities of pilots and astronauts in the aerospace industry.

**Keywords:** spacesuit, exosuit, exoskeleton, variable length, magnetorheological fluid, controllable stiffness

**Funding:** This work was supported by the Russian Science Foundation and Moscow city № 23-21-10065, (<https://rscf.ru/en/project/23-21-10065/>)

**For citation:** Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G., Goncharova I.A., Borisova V.L. Variable-length link model with controllable stiffness and movable pole for aerospace exosuit. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180665>

## Введение

При создании внешних мехатронных экзоскостюмов важным является вопрос комфортабельности их использования. При вращательных движениях в суставах с различной формой соприкасающихся поверхностей опорно-двигательного аппарата

человека оси вращения изменяют свое положение [1-4]. Это обстоятельство, вызванное сложной, криволинейной формой костей, приводит к изменению расстояния между осями суставов при вращательных движениях, что снижает комфортабельность их использования, а в отдельных случаях травмирует пользователей [5]. В работах [1,3,6-9] предложены различные конструкции звеньев переменной длины: использование звена с невесомым участком переменной длины, с пружинными элементами, с винтовыми или реечными передачами и электроприводами. В работах [10-13] предложены приближенные модели звеньев с изменяющейся длиной и управляемой жесткостью, модели устройств управления внешним магнитным полем с использованием свойств магнитно-реологической жидкости. Однако, эти модели были приближенными, элементы звеньев моделировались тонкими стержнями и одна точка первого звена всегда была жестко связана с неподвижной опорной поверхностью. В работах [14,15] рассмотрены модели с абсолютно твердыми звеньями, имеющие подвижные основания.

Предлагаемая конструкция отличается от известных моделей тем, что в ней все элементы звена переменной длины моделируются цилиндрами с конечным радиусом. Для управления изменением длины звена используется внешнее магнитное поле, приложенное к магнитно-реологической жидкости. Проблемы управления динамикой механических систем рассмотрены в работе [16], результаты которой могут быть использованы для управления антропоморфными структурами с большим числом степеней свободы. Описание моделей управления и моделирования ходьбы человека содержится в работах [17-20]. Модели экзоскелетов для двуногой ходьбы предложены в работах [21-25]. В статье [26] предложена

конструкция космического назначения шестиногого робота для исследования Луны. Из приведенных выше работ в обобщенном виде получены сведения об управлении, кинематике и динамике при движениях антропоидов.

Практическое применение звено переменной длины с управляемой жесткостью и демпфирующими свойствами может найти при создании экзоскостюмов аэрокосмического назначения, а также амортизирующих устройств для посадки космических аппаратов на поверхность [27,28], что определяет актуальность и практическую значимость исследования.

### **Описание имеющихся моделей магнитно-реологических сред**

В будущем важную роль в области авиакосмической робототехники и мехатроники будут иметь комфортабельные мягкие экзоскостюмы, экзоскелеты, скафандры с использованием магнитно-реологических сред. Магнитно-реологическая среда изменяет свои реологические свойства вследствие действия магнитных полей. Содержащиеся в составе среды намагничиваемые и поляризуемые частицы выстраиваются в линию при наложении магнитного поля. Это позволяет изменять жесткость звена в течение миллисекунд. Физико-химический состав магнитно-реологической среды позволяет варьировать предел текучести от 0 до 100 кПа [29]. Дисперсность частиц и структура магнетика позволяет классифицировать магнитно-реологические жидкости на ферромагнитные жидкости, магнитно-реологические суспензии и магнитно-управляемые микроносители [30].

Магнитно-реологическая жидкость может передавать значительные тангенциальные напряжения, в магнитном поле имеет хорошую агрегативную устойчивость. В отличие от «феррожидкостей», вязкость магнитно-реологических

суспензий способна увеличиваться до 100 раз [31]. Следовательно, магнитно-реологические жидкости имеют значительные перспективы применения в авиации и космонавтике при создании экзоскостюмов, экзоскелетов, скафандров.

Проведенный анализ публикаций по данной тематике не выявил моделей экзоскостюмов и скафандров со звеньями переменной длины и управляемой жесткостью. Достаточно хорошо представлены исследования, посвященные динамике магнитно-реологических сред и их применению в различных технических устройствах. Актуатор с управляемой жесткостью описан в работе [32]. Применение магнитно-реологических сред в приводах экзоскелетов рассмотрено в [10-13, 33-37]. Определение магнитно-реологической среды, как категории интеллектуальных жидкостей, изменяющих свою вязкость при приложении внешнего магнитного поля, вводится в [13, 38-43]. Создан привод в коленном суставе экзоскелета с использованием магнитно-реологической жидкости [29, 34, 37], так как крутящий момент в суставе оказывает демпфирующее действие на значительную часть цикла шага [44]. Магнитно-реологические приводы исследованы в работах [31, 45-47]. Перспективы использования магнитно-реологических жидкостей при создании экзоскелетов рассмотрены в [10-13]. Полноценный экзоскостюм, экзоскелет или скафандр с мягкими звеньями переменной длины и управляемой жесткости пока не создан, что определяет новизну данной работы.

### **Описание модели звена переменной длины с управляемой жесткостью с**

#### **подвижным полюсом и постановка задачи**

На рисунке 1 представлена модель звена переменной длины с управляемой жесткостью с подвижным полюсом и введены необходимые обозначения. В

многочленном экзоскелете или скафандре движение полюса является свободным движением звена в фазе полета, либо движением, зависящим от предыдущего звена.

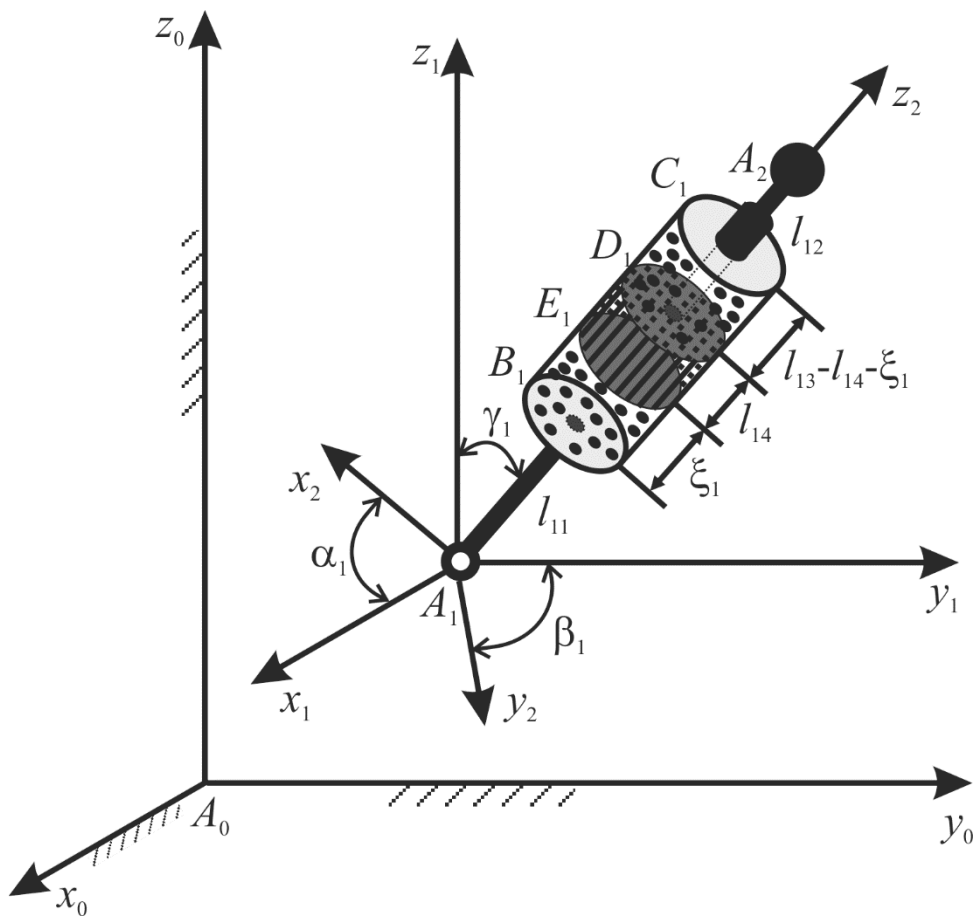


Рис. 1. Модель звена переменной длины с управляемой жесткостью и подвижным ПОЛЮСОМ

Движение звена переменной длины с управляемой жесткостью состоит из поступательного движения точки  $A_1$  в первой подвижной локальной системе координат  $A_1x_1y_1z_1$  связанной с предыдущим звеном и из вращательного движения в сферическом шарнире  $A_1$ , определяемым движением системы координат  $A_1x_2y_2z_2$  (рис. 1). Поступательное движение определяется координатами точки  $A_1$ :  $x_1, y_1, z_1$ . Ось  $A_1z_2$  второй подвижной локальной системы координат  $A_1x_2y_2z_2$ , направлена вдоль продольной оси звена, а оси  $A_1x_2, A_1y_2$  вводятся исходя из условия правого



базиса. Углы между осями координат первой и второй локальных систем координат  $\alpha_1(t)$ ,  $\beta_1(t)$ ,  $\gamma_1(t)$  определяют положение звена в пространстве. В точке  $A_2$  расположен центр шара конечного радиуса, моделирующего полезную нагрузку, создаваемую другими звеньями.

Участок звена  $B_1C_1$  является цилиндром с магнитно-реологической жидкостью. На цилиндр намотана катушка с целью формирования магнитного поля, управляющего жесткостью жидкости (рис. 1).

В конструкции звена предусмотрены три основных участка. Нижняя, весомая часть  $A_1B_1$  моделируется сплошным однородным цилиндром длины  $l_{11}$  и радиусом  $r_{11}$ . Верхняя часть  $D_1A_2$ , представляет собой сплошной однородный цилиндр длины  $l_{12}$  и радиусом  $r_{12}$  (шток). На основаниях цилиндра закреплены: снизу, в точке  $D_1$  поршень  $D_1E_1$ , с отверстиями для перетекания магнитно-реологической жидкости длины  $l_{14}$  и радиусом  $r_{14}$ . Сверху, с центром в точке  $A_2$  однородный шар радиуса  $r_{15}$ , моделирующий нагрузку от других звеньев. Средняя часть является цилиндром с магнитно-реологической жидкостью  $B_1C_1$ . Цилиндр длиной  $l_{13}$  является толстостенным, внешний радиус с учетом толщины намотки катушек  $r_{13}$ , внутренний радиус  $r_{14}$ . Внутри цилиндра перемещается плотно прижатый к его стенкам поршень  $D_1$ . В цилиндре содержится магнитно-реологическая жидкость, заполняющая его полностью, без полостей. Снизу в позиции  $B_1$  цилиндр плотно закрыт тонким однородным диском радиуса  $r_{13}$ . Сверху, в положении  $C_1$  цилиндр герметично закрыт тонким диском радиуса  $r_{13}$  с круглым вырезом в центре, радиуса  $r_{12}$  для относительного перемещения звена  $D_1A_2$ . Для предотвращения протекания жидкости и относительных поворотов штока относительно диска в положении  $C_1$

используется крышка в виде фланца, на внутреннем отверстии которого нарезаны шлицы для относительного перемещения штока. Расстояние  $B_1E_1 = \xi_1(t)$  между диском в позиции  $B_1$  внутри цилиндра и нижней поверхностью поршня  $E_1$  изменяется в результате действия сил от верхней части звена и сопротивления в поршне перетеканию магнитно-реологической жидкости. Изменение длины участка  $\xi_1$  является функцией времени и седьмой обобщенной координатой, описывающей положение звена  $A_1A_2$  в пространстве. Все моменты инерции в модели определяются относительно точки  $A_1$ .

Масса элемента звена  $A_1B_1$  в соответствии с введенными ранее индексами равна  $m_{11}$ . Моменты инерции части звена  $A_1B_1$  относительно соответствующих осей локальной системы координат  $A_1x_2y_2z_2$ , равны:

$$I_{z_{11}} = \frac{m_{11}r_{11}^2}{2}, \quad (1)$$

$$I_{x_{11}} = I_{y_{11}} = \frac{m_{11}(3r_{11}^2 + 4l_{11}^2)}{12}. \quad (2)$$

Масса верхней части  $D_1A_2$  равна  $m_{12}$ . Момент инерции элемента звена  $D_1A_2$  относительно оси  $z_2$  является постоянным. Моменты инерции относительно осей  $x_2$  и  $y_2$ , проведенных из точки  $A_1$ , являются переменными:

$$I_{z_{12}} = \frac{m_{12}r_{12}^2}{2}, \quad (3)$$

$$I_{x_{12}} = I_{y_{12}} = \frac{m_{12}(3r_{12}^2 + 4l_{12}^2)}{12} + m_{12}(l_{11} + \xi_1 + l_{14})^2. \quad (4)$$

Масса цилиндра  $B_1C_1$  равна  $m_{13}$ . Моменты инерции относительно координатных осей, проведенных из точки  $A_0$  определяются величинами:

$$I_{z_{13}} = \frac{m_{13}(r_{13}^2 + r_{14}^2)}{2}, \quad (5)$$

$$I_{x_{13}} = I_{y_{13}} = \frac{m_{13}(3(r_{13}^2 + r_{14}^2) + 4l_{13}^2)}{12} + m_{13}l_{11}^2. \quad (6)$$

Масса поршня  $D_1E_1$  равна  $m_{14}$ , момент инерции относительно оси  $z_2$  является постоянным. Моменты инерции относительно осей  $x_2$  и  $y_2$ , проведенных из точки  $A_1$ , являются переменными:

$$I_{z_{14}} = \frac{m_{14}r_{14}^2}{2}, \quad (7)$$

$$I_{x_{14}} = I_{y_{14}} = \frac{m_{14}(3r_{14}^2 + 4l_{14}^2)}{12} + m_{14}(l_{11} + \xi_1)^2. \quad (8)$$

Масса полезной нагрузки в форме шара, расположенной в точке  $A_2$ , равна  $m_{15}$ . Момент инерции относительно оси  $z_2$  является постоянным. Моменты инерции относительно осей  $x_2$  и  $y_2$ , проведенных из точки  $A_1$ , являются переменными и определяются следующим образом:

$$I_{z_{15}} = \frac{2m_{15}r_{15}^2}{5}, \quad (9)$$

$$I_{x_{15}} = I_{y_{15}} = \frac{2m_{15}r_{15}^2}{5} + m_{15}(l_{11} + \xi_1 + l_{12} + l_{14})^2. \quad (10)$$

Масса тонкой однородной круглой пластинки, закрывающей цилиндр равна  $m_{16}$ . Моменты инерции относительно осей координат, проведенных из точки  $A_1$ , являются постоянными:

$$I_{z_{16}} = \frac{m_{16}r_{13}^2}{2}, \quad (11)$$

$$I_{x_{16}} = I_{y_{16}} = \frac{m_{16}(r_{13}^2 + 4l_{11}^2)}{4}. \quad (12)$$

Масса тонкой однородной круглой пластинки с вырезом в центре, закрывающей сверху, в точке  $C_1$  цилиндр равна  $m_{17}$ . Моменты инерции относительно осей координат, проведенных из точки  $A_1$  являются постоянными:

$$I_{z_{17}} = \frac{m_{17}(r_{12}^2 + r_{13}^2)}{2}, \quad (13)$$

$$I_{x_{17}} = I_{y_{17}} = \frac{m_{17}((r_{12}^2 + r_{13}^2) + 4(l_{11} + l_{13})^2)}{4}. \quad (14)$$

Масса магнитно-реологической жидкости  $m_R = m_8 + m_9$ . Масса, заключенная в нижней части  $B_1E_1$  цилиндра равна  $m_8$ . Она является величиной переменной и зависит от расстояния между дном цилиндра и поршнем  $\xi_1$ :  $m_8 = \rho_1 V_1 = \rho_1 \pi r_{14}^2 \xi_1$ . Масса, заключенная в верхней части  $D_1C_1$  цилиндра  $m_9$ , является величиной переменной, зависящей от расстояния между поршнем и крышкой цилиндра  $l_{13} - l_{14} - \xi_1$ , следующим образом  $m_9 = \rho_1 V_2 = \rho_1 \pi (r_{14}^2 - r_{12}^2)(l_{13} - l_{14} - \xi_1)$ . Пустоты в цилиндре  $B_1C_1$  отсутствуют. Моменты инерции относительно осей координат, проведенных из точки  $A_1$ , являются переменными:

$$I_{z_{18}} = \frac{m_{18} r_{14}^2}{2}, \quad (15)$$

$$I_{x_{18}} = I_{y_{18}} = \frac{m_{18}(3r_{14}^2 + 4\xi_1^2)}{12} + m_{18} l_{11}^2. \quad (16)$$

Моменты инерции относительно осей координат, проведенных из точки  $A_1$ , являются переменными:

$$I_{z_{19}} = \frac{m_{19}r_{14}^2}{2}, \quad (17)$$

$$I_{x_{19}} = I_{y_{19}} = \frac{m_{19}(3r_{14}^2 + 4(l_{13} - l_{14} - \xi_1)^2)}{12} + m_{19}(l_{11} + \xi_1 + l_{14})^2. \quad (18)$$

Для рассматриваемой уточненной пространственной модели звена экзоскелета переменной длины с управляемой жесткостью с использованием пакета Wolfram Mathematica 11.3 составлены уравнения Лагранжа второго рода, являющиеся ее математической моделью.

### Результаты решения обратной задачи динамики

Для решения обратной задачи динамики использован метод управления программным движением. Обобщенные координаты представляют функции, синтезирующие антропоморфное движение звена. Траектория движения полюса  $A_1$  в абсолютной системе координат  $A_0x_0y_0z_0$  представлена на рисунке 2 (слева), а траектория движения точки  $A_2$  на рисунке 2 (справа).

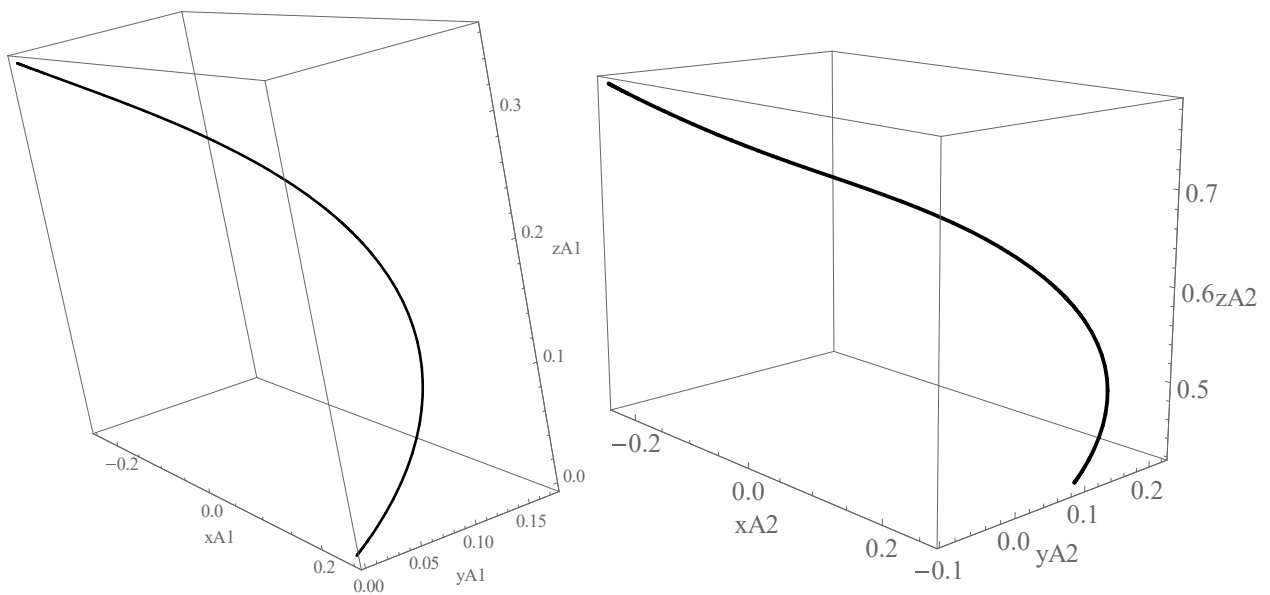


Рис. 2. Траектории движения полюса  $A_1$  и точки  $A_2$  в абсолютной системе координат  $A_0x_0y_0z_0$

Зависимости скорости и ускорения полюса при его движении относительно абсолютной системы координат представлены на рисунке 3.

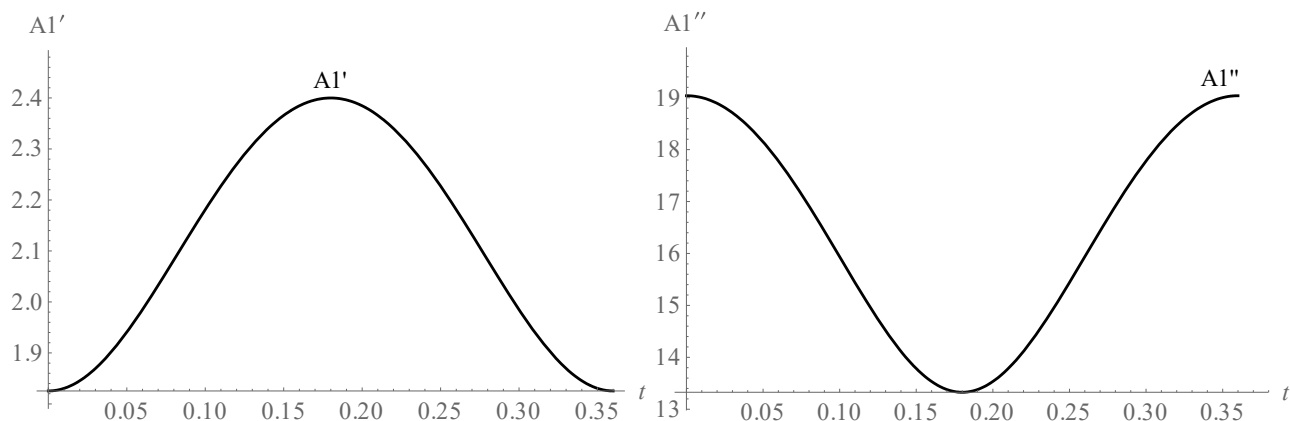


Рис. 3. Скорость и ускорение полюса при его движении относительно абсолютной системы координат

Результаты решения обратной задачи динамики: силы реакции, моменты и продольная сила представлены в графическом виде (рис. 4).

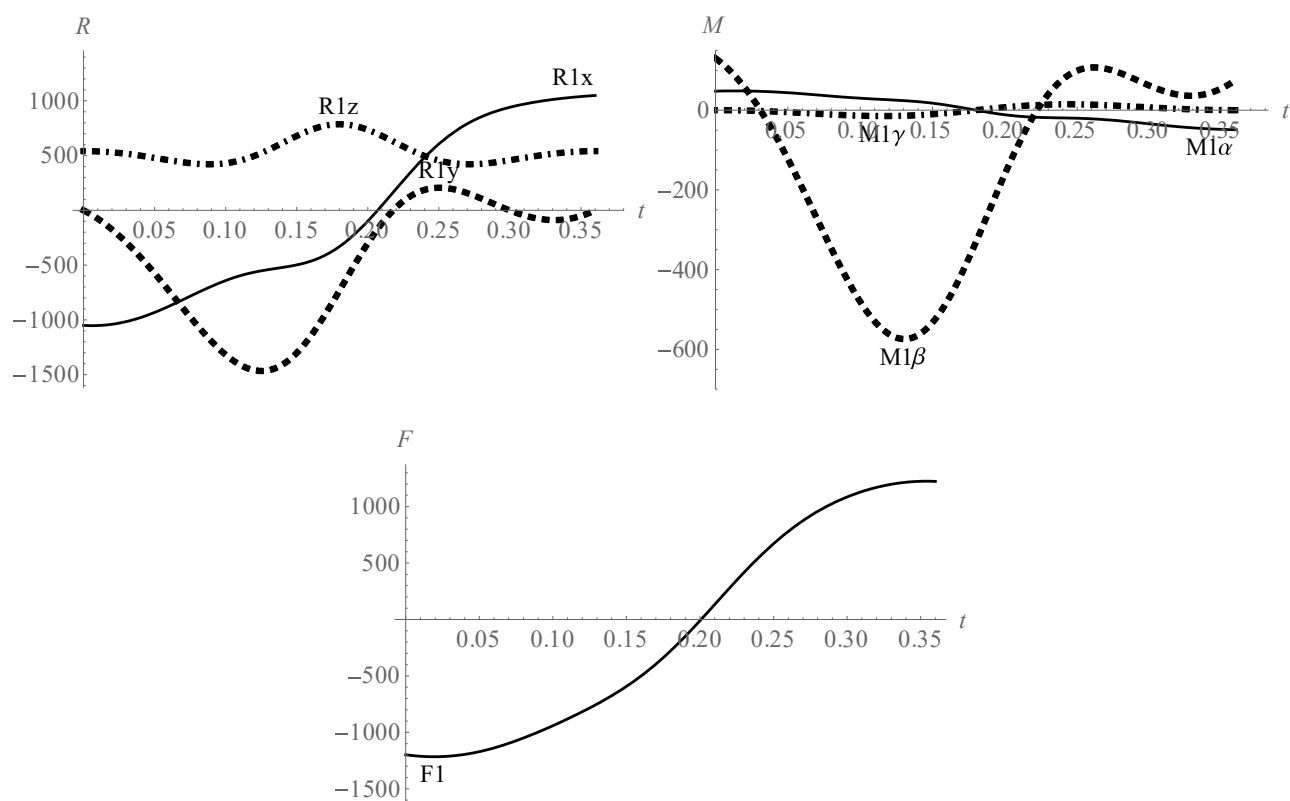


Рис. 4. Решение обратной задачи динамики

Достаточно большие значения полученных реакций, моментов и продольной силы объясняются значительным ускорением, с которым движется полюс (рис. 3), что связано с аэрокосмической направленностью модели, где возникают такие по порядку величины ускорения.

Полученная зависимость продольной силы, управляющей жесткостью магнитно-реологической жидкости через напряженность внешнего магнитного поля [10-12], определяет средние значения напряженности на рассматриваемом участке, представленные ступенчатыми функциями (рис. 5).

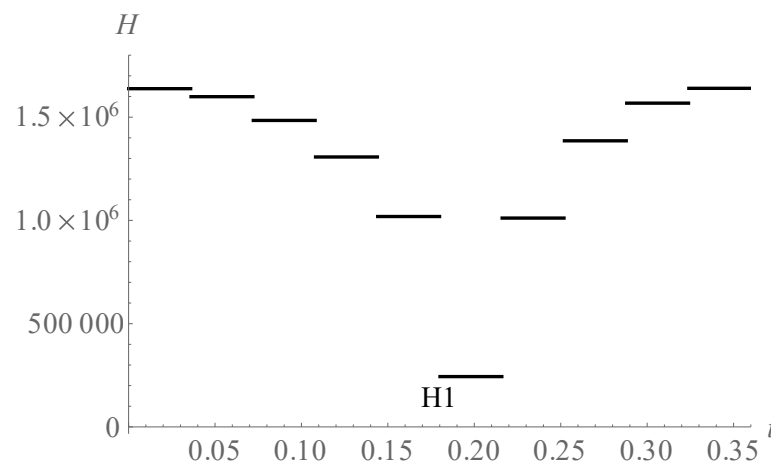


Рис. 5. Напряженность внешнего магнитного поля, управляющего жесткостью магнитно-реологической жидкости

Аппроксимация напряженности ступенчатыми функциями (рис. 5) связана с особенностью методики ее нахождения [10-12]. Столь значительные числовые значения напряженности внешнего магнитного поля связаны с необходимостью демпфировать, значительные продольные силы. При реальном функционировании экзоскелета значения будут меньше за счет участия опорно-двигательного аппарата человека, который будет компенсировать часть нагрузки.

Подсчитывая работу в каждом приводе по формулам, для всего механизма получим следующее выражение:

$$A = \int_0^T \left( |R_{1x}\dot{x}| + |R_{1y}\dot{y}| + |R_{1z}\dot{z}| + |M_{\eta}\dot{\eta}| + |M_{\theta}\dot{\theta}| + |M_{\psi}\dot{\psi}| + |F\dot{\xi}| \right) dt \quad (19)$$

Результаты расчетов работы приводов при движении звена экзоскелета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Работа реакций, моментов, продольной силы и суммарные затраты энергии

	$R_{1x}$	$R_{1y}$	$R_{1z}$	$M_{1\alpha}$	$M_{1\beta}$	$M_{1\gamma}$	$F_1$	$\Sigma$
$A, \text{ Дж}$	283.3	148.1	194.1	4.4	134.2	5.4	38.7	808.3

Как видно, из таблицы 1, основной расход энергии связан с работой реакции подвижного полюса, как следствие заданного ускорения, с которым он движется.

### Анализ полученных результатов

Полученные результаты показывают теоретическую возможность создания разработки звена переменной длины с управляемой жесткостью посредством приложения к цилиндру с магнитно-реологической жидкостью внешнего магнитного поля.

В результате численного моделирования решена обратная задача динамики с использованием метода управления программным движением. Определены силы реакции, управляющие моменты и продольная сила, а на ее основе и напряженность внешнего магнитного поля, управляющего жесткостью звена. Подсчитана работа реакций, моментов, продольной силы и суммарные затраты энергии при движении



звена, что является необходимым при выборе источника питания. Полученные значения превышают по абсолютной величине результаты, полученные ранее [1,3,6-15], в пределах, обусловленных учетом дополнительных масс и моментов инерции компонентов звена, а также значительного ускорения подвижного полюса звена, приближающего его к нагрузкам, возникающим в аэрокосмической отрасли.

### **Выводы и рекомендации**

В результате исследования создана достаточно точная и подробная модель звена переменной длины, с учетом цилиндрической формы всех деталей, входящих в конструкцию звена. Описаны тензоры инерции каждой детали. Учтено перетекание магнитно-реологической жидкости сквозь поршень и ее переменное количество в верхней и нижней частях цилиндра, в котором она содержится. В предложенной модели нижняя точка звена, принимаемая за полюс, движется поступательно относительно трех осей координат, что отличает созданную модель от рассмотренных ранее [1,3,6-13]. Создана механическая модель звена в виде уравнений Лагранжа второго рода, проведен ее численный анализ. Предложенная модель может быть использована при создании более комфортабельных, в сравнении с имеющимися моделями, многозвенных устройств антропоидной структуры: экзоскелетов, скафандров, роботов, демпфирующих устройств для спускаемых на поверхность приземления аппаратов.

### **Список источников**

1. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. О математическом моделировании динамики многозвенных систем и экзоскелетов // Известия РАН.

Теория и системы управления. 2021. № 5. С. 162-176. DOI: [10.31857/S0002338821040028](https://doi.org/10.31857/S0002338821040028)

2. Nordin M., Frankel H. Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System. Lippicott, London, Williams & Wilkins, 2001, 467 p.

3. Borisov A.V., Chigarev A.V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control. Monograph, Springer, 2022, 232 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>. DOI: [10.1007/978-3-030-97733-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97733-7)

4. Borisov A.V., Chigarev A.V. The Causes of a Change in The Length of a Person's Link and Their Consideration When Creating an Exoskeleton // Biomedical Journal of Scientific and Technical Research, 2020, vol. 25, pp. 18769-18771. DOI: [10.26717/BJSTR.2020.25.004137](https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.25.004137)

5. Piña-Martínez E., Rodriguez-Leal E. Inverse Modeling of Human Knee Joint Based on Geometry and Vision Systems for Exoskeleton Applications // Mathematical Problems in Engineering, 2015, pp. 1-14. DOI: [10.1155/2015/145734](https://doi.org/10.1155/2015/145734)

6. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г., Филиппенков К.Д. Роботизированная управляемая электромеханическая модель двух звеньев переменной длины аэрокосмического назначения // Известия вузов. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 60-69.

7. Blinov A., Borisov A., Filippenkov K., Konchina L., Maslova K. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion // Journal of Applied Informatics, 2022, vol. 99, no. 3, pp. 117-130. DOI: [10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130](https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130)

8. Борисов А.В., Волкова Ю.Е., Кончина Л.В., Маслова К.С. Пассивно-активный экзоскелет со звеньями переменной длины и пружинными элементами двух типов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2020. № 9. С. 54–64. DOI: [10.14489/hb.2020.09.pp.054-064](https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.054-064)
9. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Моделирование движения активного экзоскелета с пятью управляемыми электроприводами звеньями // Российский журнал биомеханики. 2023. № 4. С. 186–199. URL: [https://vestnik.pstu.ru/biomech/archives/?id=&folder\\_id=11774](https://vestnik.pstu.ru/biomech/archives/?id=&folder_id=11774). DOI: [10.15593/RZhBiomeh/2023.4.15](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.15)
10. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Novikova M. Applying the models of magnetorheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // Journal of Applied Informatics, 2022, vol. 98, no. 2, pp. 133-142. DOI: [10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142](https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142)
11. Blinov, A.O., Borisov, A.V., Mukharlyamov, R.G. Mathematical Simulation of Dynamics for Exoskeleton Including Variable-Length Links with Adjustable Stiffness // In: Azimov, D. (eds) Proceedings of the IUTAM Symposium on Optimal Guidance and Control for Autonomous Systems 2023. IUTAM 2023. IUTAM Bookseries, vol 40, pp 117–131. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39303-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39303-7_8)
12. Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. Dynamics of two-link exoskeleton support leg, considering payload and adjustable stiffness // Proc. SPIE 12986, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023), 1298603 (19 January 2024). URL: <https://doi.org/10.1117/12.3016477>

13. Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Новикова М.А., Чигарев А.В. Разработка методов управления свойствами магнитно-реологической среды с целью регулирования жесткости звена переменной длины экзоскелета // *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 296–305. URL: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305>
14. Бадяева В.К., Блинов А.О., Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г. Движение антропоида на подвижном основании // *Российский журнал биомеханики*. 2022. № 3. С. 87-97. DOI: [10.15593/RZhBiomech/2022.3.07](https://doi.org/10.15593/RZhBiomech/2022.3.07)
15. Бадяева В.К., Блинов А.О., Борисов А.В., Мухарлямов Р.Г. Моделирование движения экзоскелета при полете на подвижной платформе с учетом динамики электроприводов // *Известия вузов. Авиационная техника*. 2022. № 4. С. 51-60.
16. Vasenin S.A., Reshmin S.A. Optimal Suppression of Oscillations in the Problem of a Spin-Up of a Two-Mass System // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2023, vol. 62, pp. 942–955. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064230723060114>
17. Błażkiewicz M., Hadamus A. Influence of Perturbation’s Type and Location on Treadmill Gait Regularity // *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (2), pp. 493. URL: <https://doi.org/10.3390/app14020493>
18. Park C., Park K. Dynamic Stability of Human Walking in Response to Sudden Speed Changes // *Symmetry*, 2024, vol. 16 (1), pp. 26. URL: <https://doi.org/10.3390/sym16010026>
19. Chandrasekaran S., Ngo C., Lueken M., Bollheimer C., Wolf A., Leonhardt S. On Gait Stability: Correlations between Lyapunov Exponent and Stride Time Variability //

- Current Directions in Biomedical Engineering, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 564-567. URL: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2022-1144>
20. Pan Q. et al. A Nonresonant and Frequency Up-Conversion Motion Converter for Footstep Energy Harvesting // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024. DOI: [10.1109/TMECH.2023.3341411](https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3341411)
  21. Tijjani I., Kumar S., Boukheddimi M. A Survey on Design and Control of Lower Extremity Exoskeletons for Bipedal Walking // Applied Sciences, 2022, vol. 12, pp. 2395. URL: <https://doi.org/10.3390/app12052395>
  22. Su Q., Pei Z., Tang Z., Liang Q. Design and Analysis of a Lower Limb Loadbearing Exoskeleton // Actuators, 2022, vol. 11 (10), pp. 285. URL: <https://doi.org/10.3390/act11100285>
  23. Bourgeois A., Rice B., Goh C.-H. Design Optimization of the Lift Mechanism in the Robotic Walking Training Device Using the Engineering Design Methodology // Applied Sciences, 2023, vol. 14 (1), pp. 327. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010327>
  24. Heo Y., Choi H.-J., Lee J.-W., Cho H.-S., Kim G.-S. Motion-Based Control Strategy of Knee Actuated Exoskeletal Gait Orthosis for Hemiplegic Patients: A Feasibility Study // Applied Sciences, 2023, vol. 14(1), pp. 301. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010301>
  25. Capitani S.L., Bianchi M., Secciani N. et al. Model-based mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for assisting workers in shotcrete projection // Meccanica, 2021, vol. 56, pp. 195–210. URL: <https://doi.org/10.1007/s11012-020-01282-3>
  26. Guo Y.-Q., Luo W.-H., Xu Z.-D., Shu B.-M., Yang D.-K. Research on the Design and Gait Planning of a Hexapod Robot Based on Improved Triangular Gait for Lunar

Exploration // Applied Sciences, 2024, vol. 14 (1), pp. 260. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010260>

27. Петров Ю.А., Брешев Е.Н., Сергеев Д.В. Амортизация спускаемых аппаратов при посадке на поверхности планет // Труды МАИ. 2023. № 133. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=177654>

28. Берников А.С., Петров Ю.А., Сергеев Д.В., Штокал А.О. Амортизация автоматических космических аппаратов при посадке на планеты и их спутники с учетом упругости конструкции посадочного устройства // Труды МАИ. 2021. № 121. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)

29. Chen J., Liao W. Design and control of a Magnetorheological actuator for leg exoskeleton // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Sanya, 2007, pp. 1388-1393. DOI: [10.1109/ROBIO.2007.4522367](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522367)

30. Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение. - Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 94 с.

31. Simon Laflamme. Online learning algorithm for structural control using magnetorheological actuators, Massachusetts Institute of Technology, 2007, 88 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39271/170931934-MIT.pdf?sequence=2>

32. Psomopoulou E., Doulgeri Z., Rovithakis G., Tsagarakis N. A Simple Controller for a Variable Stiffness Joint with Uncertain Dynamics and Prescribed Performance Guarantees // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal, pp. 5071–5076. DOI: [10.1109/BioRob.2012.6290757](https://doi.org/10.1109/BioRob.2012.6290757)

33. Блинов А.О. Создание алгоритма управления жесткостью магнитно-реологической среды звена переменной длины и моделирование его движений для использования в комфортабельных защитных экзоскелетах человека // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 1-2 (175-176). С. 11-19.
34. Ahmadkhanlou F., Zite J.L., Washington G.N. A magnetorheological fluid-based controllable active knee brace // In Proceedings SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, vol. 6527. DOI: [10.1117/12.715902](https://doi.org/10.1117/12.715902)
35. Andrade R.M., Fabríz Ulhoa P.H., Fragoso Dias E.A. Design and testing a highly backdrivable and kinematic compatible magneto-rheological knee exoskeleton // Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, vol. 5. DOI: [10.1177/1045389X221117496](https://doi.org/10.1177/1045389X221117496)
36. Bougrinat Y. Design and development of a lightweight ankle exoskeleton for human walking augmentation, Avril, Université de Montréal, 2018, 114 p. URL: [https://publications.polymtl.ca/3076/1/2018\\_YacineBougrinat.pdf](https://publications.polymtl.ca/3076/1/2018_YacineBougrinat.pdf)
37. Carlson J. Magnetorheological Fluid Actuators. Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications, 2013, 1808 p.
38. Зубарев А.Ю., Чириков Д.Н. Магнитореологические свойства феррожидкостей с кластерными частицами // Коллоидный журнал. 2013. Т. 75. № 5. С. 567–576.
39. Коновалова Н.И., Мартынов С.И. Динамика магнитных частиц в вязкой жидкости // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. Математика. 2009. № 3 (11). С. 3-11.

40. Макарова Л.А. Исследование магнитных и электрических свойств композитных реологических материалов на основе ферромагнитных и сегнетоэлектрических наполнителей: автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. - М.: МГУ им. Ломоносова, 2018. – 27 с.
41. Найгерт К.В., Целищев В.А. Прикладные свойства магнитореологических жидкостей. - Уфа: УГАТУ, 2021.
42. Чириков Д.Н. Теоретическое исследование реологических свойств бидисперсных магнитных жидкостей. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013. – 17 с.
43. Lebedev A.V. Viscosity of magnetic fluids must be modified in calculations of dynamic susceptibility // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, vol. 431, pp. 30–32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.110>
44. Dollar A.M., Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art // IEEE Transactions on robotics, 2008, vol. 24, pp. 144-158.
45. Glowinski S., Krzyzynski T., Bryndal A., Maciejewski I. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators // Sensors, 2020, vol. 20, pp. 6116. URL: <https://doi.org/10.3390/s20216116>
46. Glowinski S., Obst M., Majdanik S., Potocka-Banaś B. Dynamic Model of a Humanoid Exoskeleton of a Lower Limb with Hydraulic Actuators // Sensors, 2021, vol. 21 (10), pp. 3432. URL: <https://doi.org/10.3390/s21103432>
47. Lee T., Lee D., Song B., Baek Y.S. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator // Sensors, 2020, vol. 20, pp. 211. URL: <https://doi.org/10.3390/s20010211>



## References

1. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 5, pp. 162-176. DOI: [10.31857/S0002338821040028](https://doi.org/10.31857/S0002338821040028)
2. Nordin M., Frankel H. *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. Lippicott, London, Williams & Wilkins, 2001, 467 p.
3. Borisov A.V., Chigarev A.V. *Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control*. Monograph, Springer, 2022, 232 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>. DOI: [10.1007/978-3-030-97733-7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97733-7)
4. Borisov A.V., Chigarev A.V. The Causes of a Change in The Length of a Person's Link and Their Consideration When Creating an Exoskeleton, *Biomedical Journal of Scientific and Technical Research*, 2020, vol. 25, pp. 18769-18771. DOI: [10.26717/BJSTR.2020.25.004137](https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.25.004137)
5. Piña-Martínez E., Rodríguez-Leal E. Inverse Modeling of Human Knee Joint Based on Geometry and Vision Systems for Exoskeleton Applications, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, pp. 1-14. DOI: [10.1155/2015/145734](https://doi.org/10.1155/2015/145734)
6. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G., Filippenkov K.D. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2022, no. 1, pp. 60-69.
7. Blinov A., Borisov A., Filippenkov K., Konchina L., Maslova K. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system

of differential equations of motion, *Journal of Applied Informatics*, 2022, vol. 99, no. 3, pp. 117-130. DOI: [10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130](https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130)

8. Borisov A.V., Volkova Yu.E., Konchina L.V., Maslova K.S. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem*, 2020, no. 9, pp. 54–64. DOI: [10.14489/hb.2020.09.pp.054-064](https://doi.org/10.14489/hb.2020.09.pp.054-064)

9. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*, 2023, no. 4, pp. 186-199. URL: [https://vestnik.pstu.ru/biomech/archives/?id=&folder\\_id=11774](https://vestnik.pstu.ru/biomech/archives/?id=&folder_id=11774). DOI: [10.15593/RZhBiomeh/2023.4.15](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.15)

10. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Novikova M. Applying the models of magneto-rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // *Journal of Applied Informatics*, 2022, vol. 98, no. 2, pp. 133-142. DOI: [10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142](https://doi.org/10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142)

11. Blinov, A.O., Borisov, A.V., Mukharlyamov, R.G. Mathematical Simulation of Dynamics for Exoskeleton Including Variable-Length Links with Adjustable Stiffness, *In: Azimov, D. (eds) Proceedings of the IUTAM Symposium on Optimal Guidance and Control for Autonomous Systems 2023*. IUTAM 2023. IUTAM Bookseries, vol 40, pp 117–131. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-39303-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-39303-7_8)

12. Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. Dynamics of two-link exoskeleton support leg, considering payload and adjustable stiffness, *Proc. SPIE 12986, Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023)*, 1298603 (19 January 2024). URL: <https://doi.org/10.1117/12.3016477>

13. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Novikova M.A., Chigarev A.V. Razrabotka metodov upravleniya svoistvami magnitno-reologicheskoi sredy s tsel'yu

regulirovaniya zhestkosti zvena peremennoi dliny ekzoskeleta, *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 296–305. URL: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-296-305>

14. Badyaeva V.K., Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*, 2022, no. 3, pp. 87-97. DOI: [10.15593/RZhBiomeh/2022.3.07](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2022.3.07)

15. Badyaeva V.K., Blinov A.O., Borisov A.V., Mukharlyamov R.G. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2022, no. 4, pp. 51-60.

16. Vasenin S.A., Reshmin S.A. Optimal Suppression of Oscillations in the Problem of a Spin-Up of a Two-Mass System, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2023, vol. 62, pp. 942–955. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064230723060114>

17. Błażkiewicz M., Hadamus A. Influence of Perturbation's Type and Location on Treadmill Gait Regularity, *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (2), pp. 493. URL: <https://doi.org/10.3390/app14020493>

18. Park C., Park K. Dynamic Stability of Human Walking in Response to Sudden Speed Changes, *Symmetry*, 2024, vol. 16 (1), pp. 26. URL: <https://doi.org/10.3390/sym16010026>

19. Chandrasekaran S., Ngo C., Lueken M., Bollheimer C., Wolf A., Leonhardt S. On Gait Stability: Correlations between Lyapunov Exponent and Stride Time Variability, *Current Directions in Biomedical Engineering*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 564-567. URL: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2022-1144>

20. Pan Q. et al. A Nonresonant and Frequency Up-Conversion Motion Converter for Footstep Energy Harvesting, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024. DOI: [10.1109/TMECH.2023.3341411](https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3341411)

21. Tijjani I., Kumar S., Boukheddimi M. A Survey on Design and Control of Lower Extremity Exoskeletons for Bipedal Walking, *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, pp. 2395. URL: <https://doi.org/10.3390/app12052395>
22. Su Q., Pei Z., Tang Z., Liang Q. Design and Analysis of a Lower Limb Loadbearing Exoskeleton, *Actuators*, 2022, vol. 11 (10), pp. 285. URL: <https://doi.org/10.3390/act11100285>
23. Bourgeois A., Rice B., Goh C.-H. Design Optimization of the Lift Mechanism in the Robotic Walking Training Device Using the Engineering Design Methodology, *Applied Sciences*, 2023, vol. 14 (1), pp. 327. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010327>
24. Heo Y., Choi H.-J., Lee J.-W., Cho H.-S., Kim G.-S. Motion-Based Control Strategy of Knee Actuated Exoskeletal Gait Orthosis for Hemiplegic Patients: A Feasibility Study, *Applied Sciences*, 2023, vol. 14(1), pp. 301. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010301>
25. Capitani S.L., Bianchi M., Secciani N. et al. Model-based mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for assisting workers in shotcrete projection, *Meccanica*, 2021, vol. 56, pp. 195–210. URL: <https://doi.org/10.1007/s11012-020-01282-3>
26. Guo Y.-Q., Luo W.-H., Xu Z.-D., Shu B.-M., Yang D.-K. Research on the Design and Gait Planning of a Hexapod Robot Based on Improved Triangular Gait for Lunar Exploration, *Applied Sciences*, 2024, vol. 14 (1), pp. 260. URL: <https://doi.org/10.3390/app14010260>
27. Petrov Yu.A., Breshev E.N., Sergeev D.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 133. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=177654>
28. Bernikov A.S., Petrov Yu.A., Sergeev D.V., Shtokal A.O. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=162657>. DOI: [10.34759/trd-2021-121-10](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-10)

29. Chen J., Liao W. Design and control of a Magnetorheological actuator for leg exoskeleton, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, 2007, pp. 1388-1393. DOI: [10.1109/ROBIO.2007.4522367](https://doi.org/10.1109/ROBIO.2007.4522367)
30. Belyaev E.S., Ermolaev A.I., Titov E.Yu., Tumakov S.F. *Magnitoreologicheskie zhidkosti: tekhnologii sozdaniya i primenenie* (Magnetorheological fluids: technologies for creation and application), Nizhnii Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva, 2017, 94 p.
31. Simon Laflamme. *Online learning algorithm for structural control using magnetorheological actuators*, Massachusetts Institute of Technology, 2007, 88 p. URL: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39271/170931934-MIT.pdf?sequence=2>
32. Psomopoulou E., Doulgeri Z., Rovithakis G., Tsagarakis N. A Simple Controller for a Variable Stiffness Joint with Uncertain Dynamics and Prescribed Performance Guarantees, *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 7-12, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal, pp. 5071–5076. DOI: [10.1109/BioRob.2012.6290757](https://doi.org/10.1109/BioRob.2012.6290757)
33. Blinov A.O. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviya terrorizmu*, 2023, no. 1-2 (175-176), pp 11-19.
34. Ahmadkhanlou F., Zite J.L., Washington G.N. A magnetorheological fluid-based controllable active knee brace, *In Proceedings SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2007, vol. 6527. DOI: [10.1117/12.715902](https://doi.org/10.1117/12.715902)
35. Andrade R.M., Fabríz Ulhoa P.H., Fragosó Dias E.A. Design and testing a highly backdrivable and kinematic compatible magneto-rheological knee exoskeleton, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, vol. 5. DOI: [10.1177/1045389X221117496](https://doi.org/10.1177/1045389X221117496)

36. Bougrinat Y. *Design and development of a lightweight ankle exoskeleton for human walking augmentation*, Avril, Université de Montréal, 2018, 114 p URL: [https://publications.polymtl.ca/3076/1/2018\\_YacineBougrinat.pdf](https://publications.polymtl.ca/3076/1/2018_YacineBougrinat.pdf)
37. Carlson J. *Magnetorheological Fluid Actuators. Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications*, 2013, 1808 p.
38. Zubarev A.Yu., Chirikov D.N. *Kolloidnyi zhurnal*, 2013, vol. 75, no. 5, pp. 567–576.
39. Konovalova N.I., Martynov S.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Fiziko-matematicheskie nauki. Matematika*, 2009, no. 3 (11), pp. 3-11.
40. Makarova L.A. *Issledovanie magnitnykh i elektricheskikh svoistv kompozitnykh reologicheskikh materialov na osnove ferromagnitnykh i segnetoelektricheskikh napolnitelei* (Study of the magnetic and electrical properties of composite rheological materials based on ferromagnetic and ferroelectric fillers): dissertation abstract, Moscow, MGU im. Lomonosova, 2018, 27 p.
41. Naigert K.V., Tselishchev V.A. *Prikladnye svoistva magnetoreologicheskikh zhidkosti* (Applied properties of magnetorheological fluids: textbook), Ufa, UGATU, 2021.
42. Chirikov D.N. *Teoreticheskoe issledovanie reologicheskikh svoistv bidispersnykh magnitnykh zhidkosti* (Theoretical study of the rheological properties of bidisperse magnetic fluids), Ekaterinburg, Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2013, 17 p.
43. Lebedev A.V. Viscosity of magnetic fluids must be modified in calculations of dynamic susceptibility, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 431, pp. 30–32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.09.110>

44. Dollar A.M., Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art, *IEEE Transactions on robotics*, 2008, vol. 24, pp. 144-158.
45. Glowinski S., Krzyzynski T., Bryndal A., Maciejewski I. A Kinematic Model of a Humanoid Lower Limb Exoskeleton with Hydraulic Actuators, *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 6116. URL: <https://doi.org/10.3390/s20216116>
46. Glowinski S., Obst M., Majdanik S., Potocka-Banaś B. Dynamic Model of a Humanoid Exoskeleton of a Lower Limb with Hydraulic Actuators, *Sensors*, 2021, vol. 21 (10), pp. 3432. URL: <https://doi.org/10.3390/s21103432>
47. Lee T., Lee D., Song B., Baek Y.S. Design and Control of a Polycentric Knee Exoskeleton Using an Electro-Hydraulic Actuator, *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 211. URL: <https://doi.org/10.3390/s20010211>

Статья поступила в редакцию 05.04.2024

Одобрена после рецензирования 10.04.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 05.04.2024; approved after reviewing on 10.04.2024; accepted for publication on 27.06.2024