

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 531.01

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165

ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПОРНО- ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА СТРЕЖНЕВЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Блинов А.О., Борисов* А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С.
филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия

*ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Резюме: на основе произведенного статистического анализа публикаций и патентов, расположенных в базе РИНЦ, по ключевым словам, «экзоскелет», «антропоморфный робот», «бионический протез» установлен интерес к теме исследования, выраженный в значительном росте публикаций в последние годы. Выявлено, что большинство моделей используют абсолютно твердые звенья в виде стержней. **ЦЕЛЬ.** Выявление и исследование проблем, возникающих при моделировании робототехнических систем антропоморфного типа. **МЕТОДЫ.** Используются методы математического моделирования, анализа, сравнения с биологическим прототипом, робототехники, теоретической механики, электромеханики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассмотрена проблема точности моделирования стержневыми робототехническими системами с абсолютно твердыми звеньями, звена опорно-двигательного аппарата человека. Вычислена относительная погрешность точности аппроксимации стержнями конечности человека, сделан вывод о существенной погрешности при моделировании звеньев. Рассмотрена проблема оценки влияния вращающегося ротора электродвигателя на модель механизма. Далее рассматривается модель с учетом вращающегося ротора и редуктора. Установлено, что при моделировании стержнями антропоморфных механизмов, возникает проблема необходимости учета динамики приводов. Предложена электромеханическая модель звена с двигателем постоянного тока. Установлен значительный рост затрат энергии при движении звена, в сравнении с моделью идеального шарнира, в котором создается требуемый управляющий момент, что представляет проблему. Предлагается частичное решение выявленных проблем с помощью модели звена переменной длины, содержащего три участка. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследование позволило выявить проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми робототехническими электромеханическими системами с абсолютно твердыми звеньями.

Ключевые слова: погрешность; стержень; экзоскелет; звено опорно-двигательного аппарата человека; уравнения Лагранжа второго рода; система уравнений Лагранжа-Максвелла; аппроксимация; угловые характеристики движения; управляющий момент.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Смоленской области в рамках научного проекта № 22-29-20308, <https://rscf.ru/project/22-29-20308/>

Для цитирования: Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими и электромеханическими системами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 147-165. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165.

ISSUES EMERGING IN HUMAN MUSCULOSKELETAL SYSTEM SIMULATION WITH MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL ROD STRUCTURES

AO. Blinov, AV. Borisov*, LV. Konchina, MG. Kulikova, KS. Maslova

Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

*ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Abstract: Based on the statistical analysis of publications and patents located in the RSCI database for the keywords «exoskeleton», «anthropomorphic robot», «bionic prosthesis», interest in the research topic has been established, expressed in a significant increase in publications in recent years. It was revealed that most of the models use absolutely solid links in the form of rods. **GOAL.** Identification and study of problems arising in the modeling of anthropomorphic robotic systems. **METHODS.** Methods of mathematical modeling, analysis, comparison with a biological prototype, robotics, theoretical mechanics, electromechanics were used. **RESULTS.** The problem of accuracy of modeling by rod robotic systems with absolutely rigid links, a link of the human musculoskeletal system, is considered. The relative error of the accuracy of approximation by rods of a human limb is calculated, a conclusion is made about a significant error in the modeling of links. The problem of evaluating the influence of a rotating rotor of an electric motor on a mechanism model is considered. Next, the model is considered taking into account the rotating rotor and gearbox. It has been established that when modeling anthropomorphic mechanisms with rods, the problem arises of the need to take into account the dynamics of drives. An electromechanical model of a link with a DC motor is proposed. A significant increase in energy costs during the movement of the link has been established, in comparison with the model of an ideal hinge, in which the required control moment is created, which is a problem. A partial solution of the identified problems is proposed using the model of a variable length link containing three sections. **CONCLUSION.** The study made it possible to identify problems that arise when modeling the human musculoskeletal system with rod robotic electromechanical systems with absolutely solid links.

Keywords: accuracy; rod; exoskeleton; human musculoskeletal link; equations of the motion in the form of Lagrange equations of the second kind; system of Lagrange-Maxwell equations; approximation; angular properties of the motion; controlling torque.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation and Smolensk region № 22-29-20308, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20308/>

For citation: Blinov AO, Borisov AV, Konchina LV, Kulikova MG, Maslova KS. Issues emerging in human musculoskeletal system simulation with mechanical and electromechanical rod structures. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(5):147-165. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165.

Введение

Создание комфортабельной инфраструктуры для людей с ограниченными двигательными возможностями возможно только при условии создания высокотехнологичной продукции робототехники, обеспечивающей повышение эффективности работы организма человека за счет вертикализации в целом, улучшения физической и социальной адаптации. Разработка механических и 3D-моделей человеко-машинных систем в виде бионических протезов и экзоскелетов, обеспечивающих устойчивое, целенаправленное, комфортабельное передвижение в нем человека и доступного для непосредственной технической реализации, является актуальной проблемой, стоящей перед исследователями и конструкторами.

Экзоскелеты являются результатом интеграции людей и роботизированных механизмов. Антропоморфные роботы, экзоскелеты и бионические протезы разрабатываются достаточно активно в последнее время, о чем свидетельствует большое количество публикаций, описанных в работах [1] и патентов по этим темам.

Актуальность разработки антропоморфных роботов, экзоскелетов и активных управляемых протезов в России прослеживается по количеству публикаций в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), значительно возросших в последние годы (рис. 1). На рисунке 1 представлены графики результатов поисков по ключевому слову «экзоскелет» (с маркерами в виде квадратов), «антропоморфный робот» (с маркерами в виде треугольников), «бионический протез» (с маркерами в виде кругов) с учетом морфологии публикаций. На рисунке 2 представлено количество патентов вместе с зарегистрированными программами с аналогичными маркерами, в которых учтены модели, соответствующие экзоскелетам для человека или их частям. В данное количество попало и некоторое количество близких научно-популярных публикаций, однако, так как речь идет о процессе роста популярности рассматриваемой темы, то они были включены, так как свидетельствуют о внимании к этой проблеме.

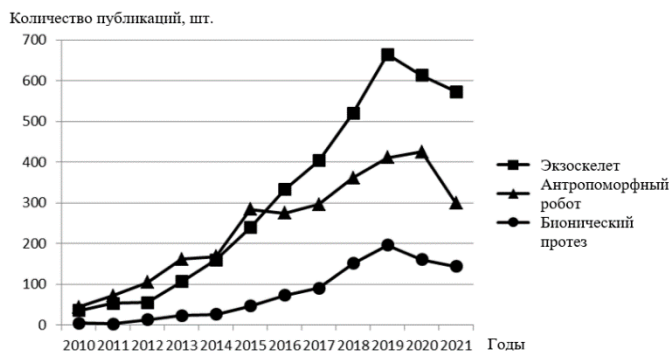


Рис. 1. Количество всех публикаций в системе РИНЦ за последние годы

Fig. 1. Number of all publications in the RSCI system in recent years

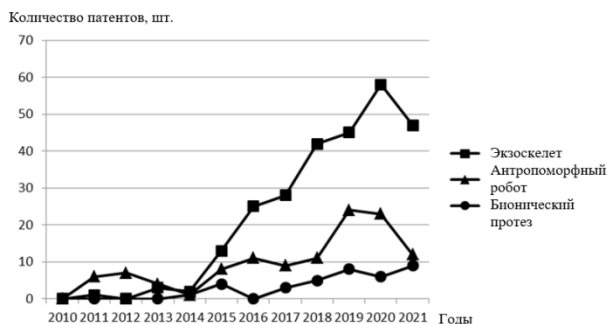


Рис. 2. Количество патентов в системе РИНЦ за последние годы

Fig. 2. Number of patents in the RSCI system in recent years

Из рисунка 1 видно, что интенсивный рост публикаций по исследуемым темам начался после 2011 года. Следует отметить, что до 2015 года количество публикаций по теме «антропоморфный робот» было больше, нежели по теме «экзоскелет», а затем количество работ об экзоскелетах увеличилось. Публикации по теме «бионический протез» впервые появляются только в 2012 году и с тех пор их количество только растет. Увеличение количества патентов (рис. 2) по теме «экзоскелет» начинается с 2015 года, до этого число патентов по теме «антропоморфный робот» превышало количество патентов по теме «экзоскелет». Количество патентов по теме «бионический протез» не превышает десяти в год и появляться они стали в последние шесть лет. Проведенный анализ публикационной активности свидетельствует о том, что практические применения моделей антропоморфных механизмов в виде экзоскелетов стало чрезвычайно важным, актуальным, востребованным и в настоящее время значительно опережает создание антропоморфных роботов. Некоторый спад в 2020-2021 годах очевиден и не связан с научными исследованиями. Таким образом, с каждым годом все большее количество научных работников и инженеров начинает работать в области создания экзоскелетов, антропоморфных роботов, бионических протезов. Значительный рост исследований по данной тематике объясняется технологическими возможностями, появившимися в

последнее время для создания новых моделей антропоморфных механизмов. Это – создание доступных мощных вычислительных систем, датчиков, новых материалов, методов управления, что подтверждается запаздывающим ростом количества патентов после роста теоретических разработок. Существенное значение имеют широта областей применения экзоскелетов в медицине, промышленности, сельском хозяйстве, военном и спасательном деле, в космосе, в быту и значительные перспективы коммерциализации проектов по их разработке.

Литературный обзор

Важность использования экзоскелетов в медицине [2, 3] можно оценить по следующим направлениям применения:

- восстановление опорно-двигательного аппарата человека после травм (рис. 3 а);
- восстановление подвижности и тренировка мышц людей после инсульта, больных рассеянным склерозом;
- восстановление подвижности и социализации парализованных людей;
- восстановление ослабевающих функций опорно-двигательного аппарата у пожилых людей, которым трудно ходить вследствие естественных возрастных изменений;
- физиотерапия и реабилитация пациентов после операций на опорно-двигательном аппарате;
- в спортивной медицине для реабилитации после нагрузок;
- в тренировочном процессе спортсменов;
- для помощи детям со спинальной мышечной атрофией (рис. 3 б);
- лечение детей с детским церебральным параличом;
- разгрузка и поддержка опорно-двигательного аппарата хирурга при выполнении продолжительных операций;
- помощь медицинскому персоналу при уходе за лежачими больными (рис. 3 в).

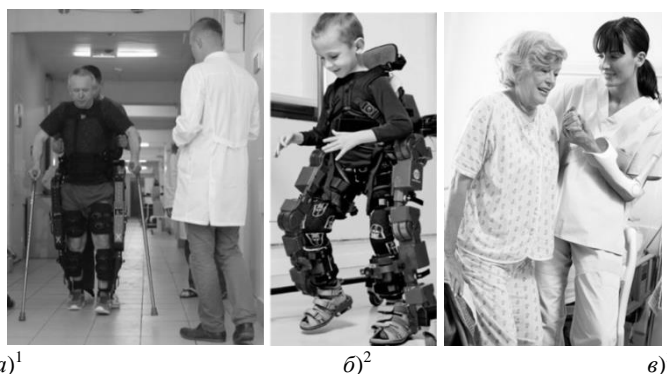


Рис. 3. Примеры экзоскелетов, используемых в медицине Fig. 3. Examples of exoskeletons used in medicine

Применение экзоскелетов [4] на транспорте, в промышленности (рис. 4 а), военно-промышленном комплексе (рис. 4 б) [5], освоении космического пространства, сельском хозяйстве [6] (рис. 4 в) [7], строительстве, повседневной жизни человека в его быту обусловлено следующими причинами:

- ограниченные силовые способности опорно-двигательного аппарата человека при подъеме и переносе тяжестей;
- низкая выносливость и время работы при выполнении однотипных движений, особенно в неудобной позе, например, с поднятыми вверх руками;
- профессиональные заболевания опорно-двигательного аппарата;
- травмы и внешние неблагоприятные воздействия.

¹ https://zdrav-nnov.ru/images/2019/04.09.2019_2.jpg

² <https://maxonmotoraust.files.wordpress.com/2018/06/exoskeleton-for-children-maxon-dc-motors.jpg?w=412>

³ <https://novate.ru/files/fusai/atlas-1.jpg>

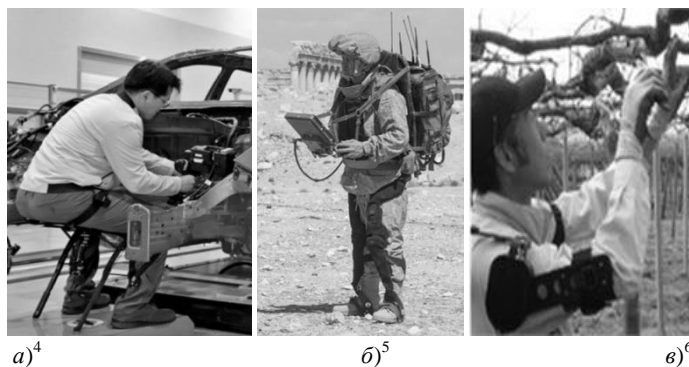


Рис. 4. Примеры экзоскелетов, используемых в промышленности, армии, сельском хозяйстве

Fig. 4. Examples of exoskeletons used in industry, army, agriculture

Следовательно, тема создания экзоскелетов для повсеместного внедрения является актуальной и востребованной, так как экзоскелеты являются высокоэффективными в технологическом, потребительском, медицинском, реабилитационном и экономическом плане устройствами. Экзоскелеты способны совмещать в одном устройстве несколько полезных свойств одновременно. Например, усиление физических возможностей человека, повышение выносливости, увеличение продолжительности времени работы в нем, защиту от травм, профессиональных заболеваний, широту использования и удовлетворение требованиям технологичности.

Исходя из перечисленных особенностей, экзоскелеты широко распространятся и будут высокоэффективно применяться в большинстве отраслей глобальной экономико-производственной системы.

Материалы и методы

Точность аппроксимации биологических прототипов стержневыми механическими системами. Вопросы точности моделирования движений антропоморфных механизмов являются важными и актуальными вследствие практической необходимости синхронного копирования экзоскелетом движения человека с минимальным запаздыванием. Это обеспечит комфортабельное использование экзоскелета. Оценки точности движений и необходимого количества звеньев рассмотрены в работах Борисова А.В., Чигарева А.В. и соавторов [8-10]. В данном параграфе рассмотрим вопрос о том, насколько точно стержень моделирует распределенное звено, например голень или бедро опорно-двигательного аппарата человека. В теоретической механике применяется подход, использующий аппроксимацию абсолютно твердого тела системой материальных точек, жестко соединенных друг с другом, т.е. масс, связанных стержнями. Желательно, чтобы при этом исходное тело и аппроксимирующая стержневая система были эквивалентны друг другу в смысле геометрии масс, т.е. $m_1 = m_2$, $I_1 = I_2$ и динамики, чтобы вели они себя эквивалентным образом [11].

В случае деформируемых тел, к которым относятся отдельные звенья опорно-двигательного аппарата человека в интегральном смысле: мышцы, кость, суставы с учетом сложной геометрии их формы и значимого изменения расстояния между осями вращения, также используется аппроксимация стержневой системой, в узлах которой имеются точечные массы, соединяющиеся друг с другом стержнями. Стержни в общем случае работают на изгиб, кручение, сжатие-растяжение. В механической системе с изменяемой геометрией в шарнирах необходимы повороты стержней. Они осуществляются с помощью шарниров. Возможен разрыв некоторых связей, возникают кинематические цепи [12].

При исследовании биомеханических систем, являющихся непрерывными, можно перейти к дискретным стержневым системам. Такой подход широко используется в машиностроении. Этот метод можно применить для исследования и моделирования биологических систем. Стержневая дискретная система должна подчиняться тем же законам, что и непрерывная. Рассмотрим преобразование фундаментальных законов при таком переходе.

⁴ <https://robroy.ru/images/hyundai-ispyityivaet-probnyie-vspomogatelnyie-ekzoskeletyi.jpg>

⁵ https://phototass2.cdnvideo.ru/width/1920_63600a28/tass/m2/uploads/i/20190121/4929654.jpg

⁶ <https://cdn.jvejournal.com/articles/17391/xml/img7.jpg>

1) Макроскопическая масса тела должна сохраняться.

$$m = \iiint_V \rho(x, y, z) dV \approx \sum_{k=1}^n m_k. \quad (1)$$

Плотность некоторого объема сплошного тела с точками, имеющими координаты (x, y, z) , проектируется в точечную массу, с номером k с координатами (x_k, y_k, z_k) . В итоге, получается сосредоточенная масса.

Следовательно, при переходе от непрерывной к дискретной модели сохраняется масса тела. Однако, распределение масс определяется, вообще говоря, неоднозначно. Возникает вопрос об адекватности и единственности такого преобразования. Деформируемое твердое тело имеет бесконечное число степеней свободы. Если его заменить стержневой системой с сосредоточенными массами, то возникает неопределенность, связанная с такой заменой. Если ввести подвижность шарниров, то это делает задачу еще более неопределенной. Чем больше число степеней свободы в стержневой системе с сосредоточенными массами, тем больше неопределенность аппроксимации такой системой деформируемого твердого тела. Поэтому необходимо, чтобы совпадали центры масс и моменты инерции.

2) Сохраняется геометрия масс, положение центра масс:

$$C_{\text{конт}}(x, y, z) = C_{\text{дискр}}(x, y, z). \quad (2)$$

Для непрерывного и дискретного тела радиус-векторы центра масс равны:

$$\bar{r}_C = \frac{\iiint_V \bar{r} \rho(\bar{r}) dV}{\iiint_V \rho(\bar{r}) dV} \approx \frac{\sum_{k=1}^n \bar{r}_k m_k}{\sum_{k=1}^n m_k}. \quad (3)$$

3) Моменты инерции одинаковы:

$$I_C = \iiint_V \bar{\xi}^2 \rho(\bar{r}) dV = \sum_{k=1}^n \bar{\xi}_{kC}^2 m_k, \quad (4)$$

где: $\bar{\xi}$ – расстояние от центра масс до k -той точки:

$$\bar{\xi} = \bar{r} - \bar{r}_C. \quad (5)$$

Аналогично должны быть равны моменты инерции относительно осей координат, проходящих через центр масс сплошного тела и дискретной системы.

$$I_{ij}^{\text{конт}} \approx I_{ij}^{\text{дискр}}. \quad (6)$$

Если считать, что форма звеньев в сплошном теле является цилиндрической, то в модели цилиндр можно заменить стержнем. Следовательно, и момент инерции цилиндра заменяем на момент инерции стержня.

Момент инерции сплошного цилиндра радиусом R и длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии цилиндра и проходящей через его центр масс, равен [13]:

$$I_{\text{cyl}} = m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right). \quad (7)$$

Осевой момент инерции стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии стержня и проходящей через его центр масс, равен:

$$I_{\text{rod}} = \frac{ml^2}{12}. \quad (8)$$

Тем самым можно найти абсолютную погрешность приближения цилиндра стержнем, как модуль разности соответствующих моментов инерции:

$$|I_{\text{cyl}} - I_{\text{rod}}| = \frac{mR^2}{4}. \quad (9)$$

Относительная погрешность для момента инерции определяется выражением:

$$\delta = \frac{|I_{\text{cyl}} - I_{\text{rod}}|}{I_{\text{rod}}} = 3 \frac{R^2}{l^2}. \quad (10)$$

Таким образом, погрешность тем больше, чем больше радиус цилиндра и меньше его

длина. Например, для бедра $R \approx 0.08$ м, $l \approx 0.48$ м, погрешность равная $\delta = 0,083 > 0,05$, является достаточно значимой, следовательно, пренебречь цилиндрической формой звена, можно только снижая точность модели.

Так как звено опорно-двигательного аппарата человека также похоже на конус, проведем анализ погрешности аппроксимации конуса стержнем. Момент инерции сплошного конуса радиусом R и длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии конуса и проходящей через его центр масс, равен:

$$I_{cone} = 3m \left(\frac{R^2}{20} + \frac{l^2}{80} \right). \quad (11)$$

Момент инерции стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии стержня и проходящей через его центр масс, определяется выражением (8).

Абсолютную погрешность приближения конуса стержнем, можно найти, как модуль разности соответствующих моментов инерции:

$$|I_{cone} - I_{rod}| = \left| \frac{3mR^2}{20} - \frac{11ml^2}{240} \right|. \quad (12)$$

Тогда относительная погрешность для момента инерции равна:

$$\delta = \frac{|I_{cone} - I_{rod}|}{I_{rod}} = \left| \frac{9R^2}{20l^2} - \frac{11}{20} \right|. \quad (13)$$

Таким образом, погрешность ведет себя сложнее, нежели в случае с цилиндром. Для анализа полученного результата введем безразмерную величину $\chi = \frac{R}{l}$ тогда:

$$\delta = \left| \frac{9}{20} \chi^2 - \frac{11}{20} \right|. \quad (14)$$

Построим график (рис. 5) относительной погрешности в виде (14).

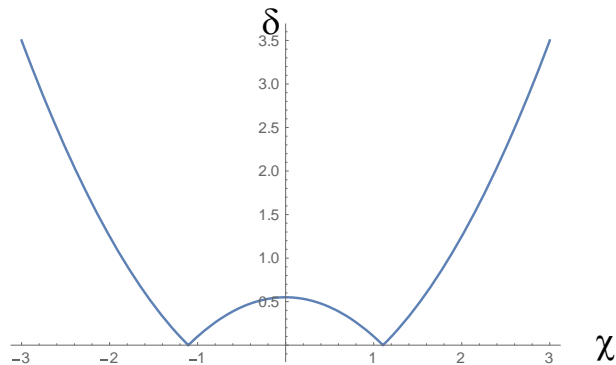


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от отношения радиуса основания конуса R к его длине l

Fig. 5. Dependence of the relative error on the ratio of the radius of the base of the cone R to its length l

Полученный график показывает, что есть значение величины χ , при котором погрешность обращается в ноль. Это значение по модулю равно $\frac{\sqrt{11}}{3}$. То есть, при оптимальном отношении между длиной конуса и радиусом основания $R \approx 1,1 \cdot l$ стержень будет точно аппроксимировать конус. Если отношение $\frac{R}{l}$ будет уменьшаться относительно значения $\chi = \frac{\sqrt{11}}{3}$, что соответствует случаю увеличения длины конуса или уменьшению радиуса его основания, погрешность будет увеличиваться по параболе, достигая своего максимума $\delta = \frac{11}{20}$ при $\chi \rightarrow 0$, что физически соответствует случаю $R \ll l$. При увеличении отношения $\frac{R}{l}$ относительно значения $\chi = \frac{\sqrt{11}}{3}$ погрешность будет

неограниченно увеличиваться по параболе. Этот случай соответствует увеличению радиуса основания конуса при уменьшении его длины, что не реализуется для звеньев опорно-двигательного аппарата человека.

Таким образом, установлено, что погрешность аппроксимации отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата человека стержнями является сопоставимой величиной, и пренебрежение ею приведет к существенным погрешностям. Это значит, что звенья экзоскелета частично могут повторять движения звеньев пользователя. Этим частично может быть объяснена некомфортность нынешних моделей экзоскелетов.

4) Жесткость в реальном деформируемом твердом теле в различных местах разная, поэтому жесткость стержней должна быть распределена так, чтобы она адекватно аппроксимировала жесткость исходной системы. Для этого необходимо применение звеньев переменной длины с управляемой жесткостью.

Чтобы решить указанные проблемы, необходимо стремиться к тому, чтобы поведение деформируемого тела и дискретной системы было близко, то есть имело аналогичную геометрию масс и жесткостные свойства.

Результаты

Влияние динамики вращающегося ротора электродвигателя в плоской модели абсолютно твердого звена.

Современной тенденцией развития антропоморфных мехатронных устройств с изменяемой геометрией и наложенными связями, благодаря росту вычислительных возможностей компьютеров и развитию алгоритмов управления, является увеличение количества степеней свободы механизмов. Указанные факторы позволят создать механизмы с большими возможностями, чем у имеющихся в настоящее время антропоморфных роботов и экзоскелетов, что обеспечивает актуальность данного исследования.

Предложенная модель антропоморфного робота и экзоскелета отличается от ранее созданных в работах Борисова А.В. тем, что используются углы между звеньями, которые соответствуют реальной работе электроприводов с редукторами, которые изменяют относительные углы между звеньями. Таким образом, целенаправленное перемещение антропоморфного механизма осуществляется за счет изменения конфигурации звеньев, внутренних усилий и налагаемых внешних связей. Предложены плоские и пространственные модели из одного, двух, трех и пяти подвижных звеньев. Для них составлены системы дифференциальных уравнений движения в форме уравнений Лагранжа второго рода с использованием локальных систем координат и матриц поворота. Такие модели, в отличие от рассмотренных ранее [4], более точно моделируют степени подвижности между звеньями, имеющиеся в опорно-двигательном аппарате человека. Поэтому можно использовать данные модели при создании не только антропоморфных роботов, но и экзоскелетов, что имеет важное практическое значение.

Рассмотрим модель механизма с одним звеном, движущимся в вертикальной плоскости (рис. 6).

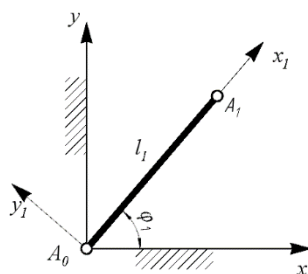


Рис. 6. Модель механизма с одним подвижным звеном и локальной системой координат, движущегося в вертикальной плоскости

Fig. 6. Model of a mechanism with one moving link and a local coordinate system moving in a vertical plane

Модель механизма, состоит из одного подвижного звена, с углами, отсчитываемыми между звеньями и двумя системами координат – абсолютной и локальной (рис. 6). Введем абсолютную неподвижную правую декартову систему координат A_0xyz , с плоскостью xA_0y , в которой происходит движение антропоморфного механизма (рис. 6). Для описания движения звена A_0A_1 введем подвижную локальную систему координат $A_0x_1y_1$, жестко

связанную со звеном. Подвижную ось A_0x_1 направим вдоль звена, ось A_0y_1 введем, исходя из условия правого базиса. В отличие от более ранних работ, в предлагаемой модели углы отсчитываются между осями локальной системой координат против хода часовой стрелки от абсолютной неподвижной системы координат к подвижной локальной системе, жестко связанной со звеном A_0A_1 .

Рассматриваемая модель механизма состоит абсолютно твердого весомого звена, представляющего собой стержень (рис. 6). Звено соединяется с опорной поверхностью посредством жестко закрепленного цилиндрического шарнира, расположенного в точке A_0 . Под действием реакции со стороны опоры, силы тяжести, управляющих усилий (не показанных на рис. 6) осуществляется поворот звена вокруг осей вращения цилиндрического шарнира. Тем самым, при заданном должным образом управлении, может быть реализовано требуемое движение механизма. Форма и длина звена: $A_0A_1 = l_1$, представляющего собой прямолинейный стержень, считаются неизменной во все время движения при любых прикладываемых нагрузках. Масса звена A_0A_1 равна m_1 . Так как звено механизма представляет собой абсолютно твердый весомый стержень, то момент инерции для него определяется, как момент инерции однородного твердого стержня. Тогда у звена A_0A_1 момент инерции относительно оси, проходящей через его начало – точку A_0 перпендикулярно плоскости движения $x_1A_0y_1$, обозначим I_1 . В силу однородности стержня $I_1 = m_1 l_1^2 / 3$. Звено A_0A_1 совершает вращательное движение в цилиндрическом шарнире A_0 . Положение звена однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$. Обозначим через M_1 управляющий момент в шарнире A_0 . Примем за обобщенную координату угол $\varphi_1(t)$ между осями координат (рис. 6). Модель звена имеет одну степень свободы. Для реализации управляемого движения необходимо использовать один независимый привод для управления углом поворота звена. Приводы могут быть различными: гидравлическими, пневматическими, электрическими. В дальнейшей работе предполагается использовать электрические двигатели. Для управления угловыми координатами электродвигатели будут работать в паре с редукторами, понижающими обороты и увеличивающими крутящие моменты.

Кинетическая энергия механизма является энергией вращательного движения стержня A_0A_1 .

$$T = \frac{I_1 \dot{\varphi}_1^2}{2}. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение движения для рассматриваемой модели, составленное с использованием уравнений Лагранжа второго рода имеет вид.

$$I_1 \ddot{\varphi}_1 + (1/2)m_1 l_1 g \cos \varphi_1 = M_1. \quad (16)$$

Оценим управляющий момент, необходимый для целенаправленного антропоморфного движения звена и осуществления подбора электродвигателя, используя уравнение (16). Для этого применим метод программного управления движением. Определим аналитически угол в виде периодической дифференцируемой функции, синтезирующей антропоморфное движение звена. Предположим, что моделируется движение голени опорной ноги человека. Тогда траектория его движения может быть задана следующей функцией [14]:

$$\varphi_1(t) = \pi/2 + j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2], \quad (17)$$

где: T – период ходьбы, j_1 и f_1 – параметры ходьбы.

Выберем числовые характеристики механизма, соответствующими значениям для голени человека, информация о которых приводится в монографии [15]. Длина звена $l_1 = 0.385$ м, масса звена $m_1 = 2.91$ кг, момент инерции звена определим, исходя из формулы момента инерции стержня для оси, проходящей перпендикулярно через его конец $I_1 = m_1 l_1^2 / 3 = 0.144$ кг·м². Ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с². Время, в течение которого происходит одноопорная фаза шага, т.е. половина периода ходьбы $t_k = 0.36$ с. Параметры ходьбы: $j_1 = 0.25$, $f_1 = \pi/2$.

Приведем графики угла поворота (17) звена и его первой и второй производных – угловой скорости и углового ускорения звена (рис. 7).

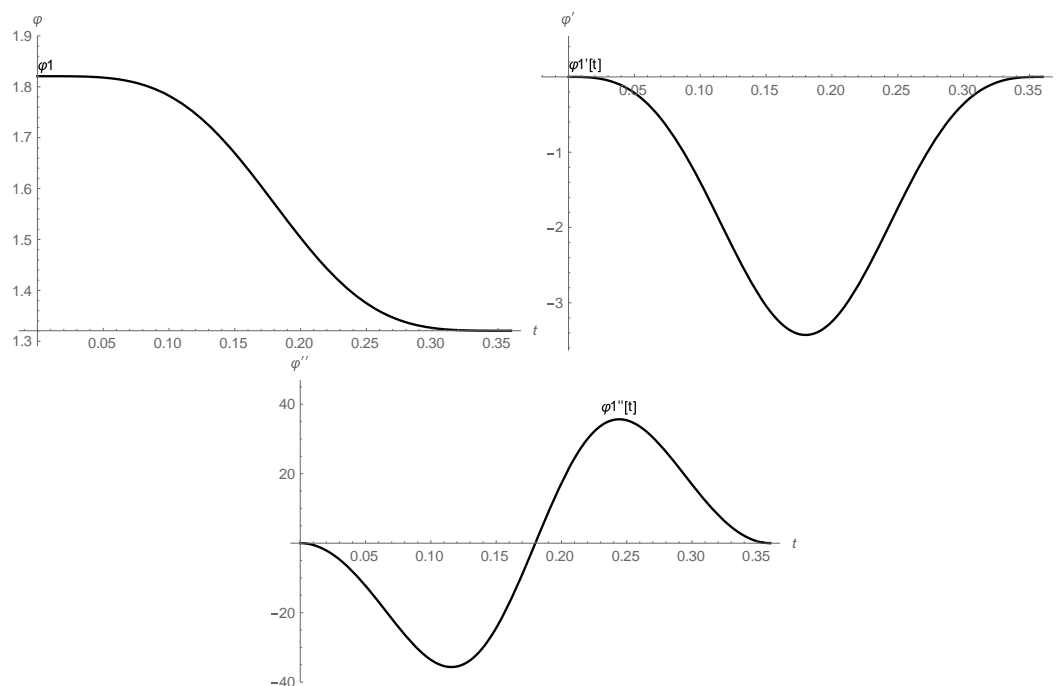


Рис. 7. Графики угла поворота φ_1 , угловой скорости $\dot{\varphi}_1$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}_1$ звена от времени

Fig. 7. Graphs of the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link from time

Синтезируем анимацию движения звена (рис. 8).

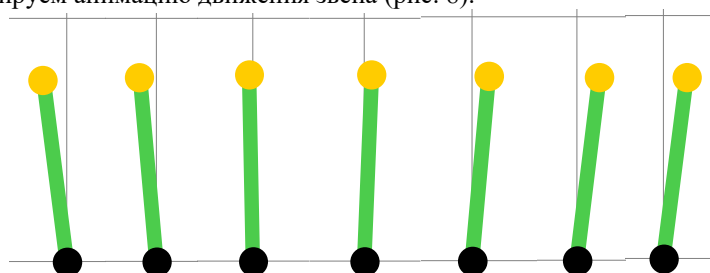


Рис. 8. Кадры анимации звена при движении по заданному в виде (17) углу φ_1

Fig. 8. Animation frames of the link when moving along the φ_1 angle specified in the form (17)

Из уравнения (16), решая обратную задачу динамики, находим управляющий момент (рис. 9).

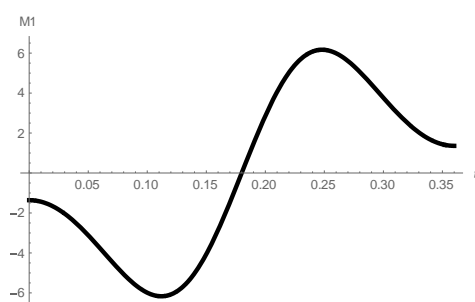


Рис. 9. График управляющего момента M_1 от времени

Fig. 9. Graph of the control moment M_1 against time

Максимальное значение управляющего момента $M_1 = 6,167$ Н·м, используем для подбора электродвигателя и редуктора.

Рассмотрим электромеханическую модель привода звена, состоящую из электродвигателя с редуктором, расположенными в неподвижном шарнире A_0 . Пусть ось вращения звена и ротора двигателя расположены на одной прямой. Рассмотрим влияние инерционных характеристик двигателя на дифференциальное уравнение движения (16). Так как двигатель с редуктором жестко закреплены и неподвижны, то их масса не дает вклад в

кинетическую энергию движения звена. Подвижным является ротор электродвигателя, совершающий в данном случае вращательное движение вокруг неподвижной оси, расположенной в точке A_0 . Его вклад в кинетическую энергию всей электромеханической системы учтем следующим образом [16]:

$$T_R = \frac{I_R k_R^2 \dot{\varphi}_1^2}{2}, \quad (18)$$

где I_R – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_R – передаточное число редуктора.

Вкладом в кинетическую энергию вращающихся элементов редуктора пренебрежем, т.к. конструкции редукторов бывают разными и здесь не конкретизируются, но обычно их масса и момент инерции гораздо меньше, чем у ротора электродвигателя. Также пренебрежем трением в подшипниках всех вращающихся элементов механизма.

Так как электродвигатель закреплен на горизонтальной поверхности, он не перемещается вдоль вертикали и его элементы не дают вклада в потенциальную энергию гравитационного взаимодействия. Таким образом, уравнение движения (16) принимает вид:

$$(I_1 + I_R k_R^2) \ddot{\varphi}_1 + (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 = M_1. \quad (19)$$

Управляющий момент M_1 – это момент на выходном валу редуктора, определенный выше из уравнения (16). Таким образом, проведен анализ влияния двигателя на механическую подсистему уравнений движения.

Проведем решение модельной задачи Коши для уравнения (19) с выбранным на основе рисунка 9 моментом, аппроксимируемым в виде ступенчатой кусочно-заданной функции. Разобьем время движения на шесть равных участков, на каждом из которых момент будем брать постоянным, а его значение подсчитаем как среднее арифметическое на данном участке.

$$M_\gamma = \frac{\int_{t_{\gamma-1}}^{t_\gamma} M_1(t) dt}{t_\gamma - t_{\gamma-1}}. \quad (20)$$

Здесь γ – ранжированная переменная, задающая участок разбиения. Разобьем на время движения на шесть участков $\gamma = 1, 2, \dots, 6$. График ступенчатой функции (20) для управляющего момента, полученного в результате решения обратной задачи (рис. 9), представлен на (рис. 10).

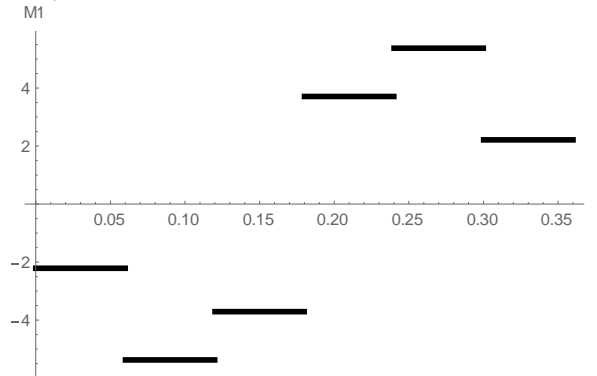


Рис. 10. График аппроксимации ступенчатой функцией управляющего момента M_1 от времени

В результате решения задачи Коши для уравнений (16) и (19) с управляющим моментом в виде ступенчатой функции, представленным на (рис. 10), получены следующие зависимости угла поворота звена от времени, показанные на (рис. 11). Сплошная линия представляет решение уравнения (16), пунктирная – (19).

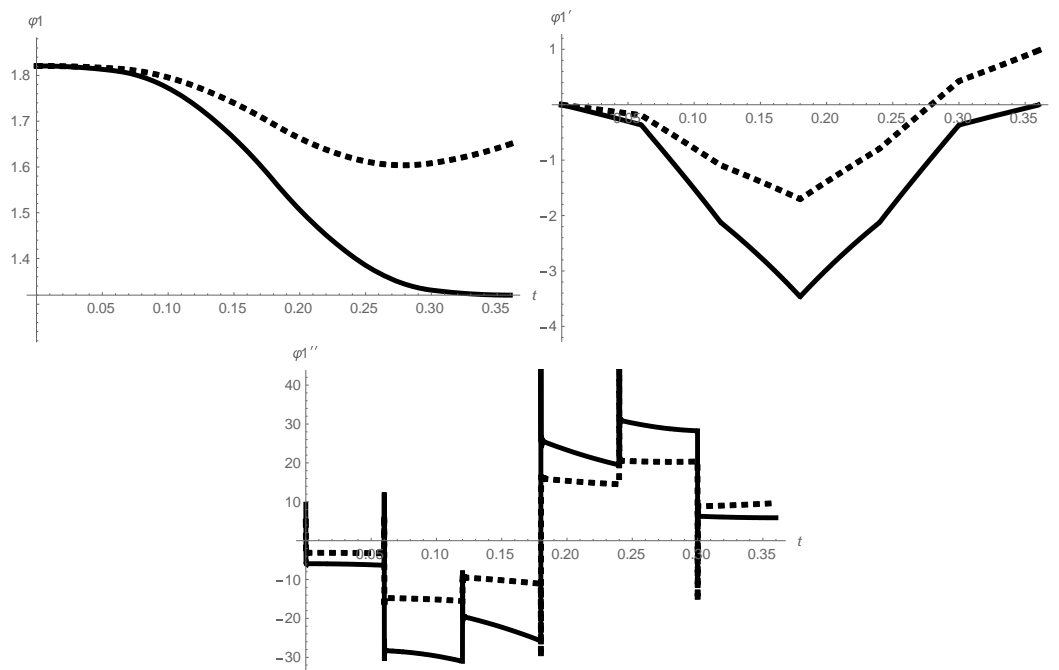


Рис. 11. Результаты решения задачи Коши – найденные угол поворота φ_1 , угловая скорость $\dot{\varphi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}_1$ звена

Fig. 11. The results of solving the Cauchy problem - found the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link

В результате полученного численного решения дифференциального уравнения (16), представленного сплошной линией на (рис. 11) сравнивая с исходным движением звена (рис. 7), видно, что получилось практически полное совпадение угла поворота, достаточно хорошее совпадение угловой скорости и приемлемое совпадение углового ускорения. Следовательно, импульсное управление в виде ступенчатой функции управляющего момента (рис. 10) является приемлемым и может быть использовано при управлении движением звена.

Решение дифференциального уравнения (19), в котором учтены инерционные характеристики ротора электродвигателя и передаточное число редуктора, представленное на (рис. 11) пунктирной линией, показывает значительные расхождения с исходным движением (рис. 7) особенно в конце интервала времени. Это представляет собой существенную проблему при оценке адекватности модели без учета динамики подвижных частей привода в стержневых механических системах. Однако, при этом, качественное поведение и вид всех кинематических характеристик остается прежним, если сравнивать с движением, полученным в результате численного решения задачи Коши для уравнения (16). Это свидетельствует о том, что пренебрегать вращением ротора электродвигателя нельзя, т.к. его вклад в динамику звена оказывается существенным. В этом случае имеем недостаточное управляющее воздействие для синтеза заданного движения механизма, следовательно, необходимо увеличивать управляющий момент.

Затраты энергии при анализе антропоморфной ходьбы, можно вычислить как работу управляющих моментов в предположении об отсутствии сил сопротивления и рекуперации энергии при торможении звена.

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^k |M_i| dt. \quad (21)$$

Здесь T – время одного шага, M_i – моменты, развиваемые приводами аппарата, k – число независимых приводов.

В результате применения формулы (21) к расчету энергетических затрат приводов, осуществляющих повороты звеньев при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций, имеем: $A_{\varphi_1} = 3.77$ Дж, являющиеся суммарными энергозатратами механизма.

Электромеханическая модель звена с электрическим двигателем постоянного тока. Введем электрическую часть управления движением электродвигателя. Уравнения

движения с электрической подсистемой записываются в виде уравнений Лагранжа-Максвелла [17-20].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_1} = 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{i}_1} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial i_1} = U_1. \end{cases} \quad (22)$$

Функции Лагранжа и Релея для рассматриваемой модели звена экзоскелета могут быть записаны в виде.

$$L = \frac{1}{2} (I_1 + I_R k_R^2) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} L_1 \dot{i}_1^2 + c_1 k_R \varphi_1 i_1 - \frac{1}{2} m_1 l_1 g \sin \varphi_1, \quad (23)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} R_1 i_1^2. \quad (24)$$

Тогда система уравнений движения предложенной электромеханической модели имеет вид.

$$\left\{ \frac{1}{c_1 k_R} \left[(I_1 + I_R k_R^2) \ddot{\varphi}_1 + (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 \right] = i_1, \right. \quad (25)$$

$$\left. L_1 \dot{i}_1 + c_1 k_R \dot{\varphi}_1 + R_1 i_1 = U_1. \right. \quad (26)$$

Здесь R_1 , L_1 – обобщенные сопротивление и индуктивность обмоток ротора электродвигателя, c_1 – коэффициент электромеханического взаимодействия, $i_1 = i_1(t)$ – ток во внешней цепи ротора, $U_1 = U_1(t)$ – подаваемое на двигатель напряжение, I_R – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_R – передаточное число редуктора.

Система уравнений (25)-(26) может быть преобразована подстановкой выражения для силы тока i_1 из уравнения (25) и ее производной в (26) к одному дифференциальному уравнению движения звена экзоскелета.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c_1 k_R} \left[(I_1 + I_R k_R^2) L_1 \ddot{\varphi}_1 + (I_1 + I_R k_R^2) R_1 \dot{\varphi}_1 + \right. \\ & \left. + (c_1^2 k_R^2 - (1/2) L_1 l_1 m_1 g \sin \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + R_1 (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 \right] = U_1. \end{aligned} \quad (27)$$

Управляющим параметром в системе будет напряжение. Незвестной искомой функцией является угол поворота звена φ_1 .

Исходя из максимальных значений момента нагрузки и скорости, в качестве примера выбираем подходящие электродвигатель и редуктор из номенклатуры выпускаемых в настоящее время. В результате подбора, выбираем двигатель постоянного тока серии DCX26L и планетарный редуктор серии GPX32 компании Maxon⁷. Момент инерции ротора электродвигателя $I_R = 1,97 \cdot 10^{-6}$ кг·м², передаточное число редуктора $k_R = 231$, номинальное напряжение $U_1 = 48$ В, сопротивление якоря $R_1 = 0,87$ Ом, индуктивность якоря $L_1 = 2,06 \cdot 10^{-3}$ Гн. Коэффициент электромеханического взаимодействия входит в уравнения (2.6) в виде произведения с передаточным числом редуктора, поэтому определим его совместно [18,20]:

$$c_1 k_R = \frac{M_{1P}}{U_1}. \text{ Пусковой момент на выходе редуктора оценим по формуле: } M_{1P} \approx \frac{g m_1 l_1}{2}.$$

Таким образом, получаем: $c_1 k_R = \frac{g m_1 l_1}{2 U_1} \approx 0,115$ Н·м/В, $c_1 \approx 4,98 \cdot 10^{-4}$ Н·м/В. Начальные условия имеют вид $\varphi_1(0) = 1,82$ рад, $\dot{\varphi}_1(0) = 0$ рад/с, $\ddot{\varphi}_1(0) = 0$ рад/с².

Используем программное управление движением модели, заданное формулой (17) и представленное на графиках (рис. 7). Используя их, решая прямую задачу динамики для системы уравнений движения (25)-(26), находим зависимости силы тока и напряжения графики которых представлены на (рис. 12).

⁷ <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index>

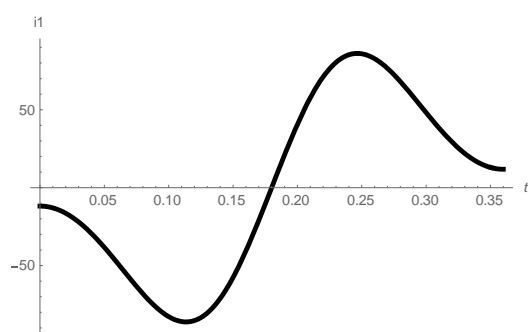


Рис. 12. Зависимости силы тока и напряжения от времени

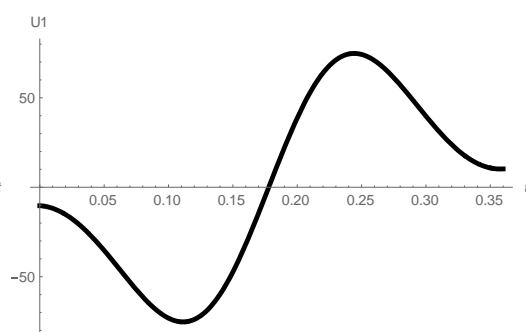


Fig. 12. Dependences of current and voltage on time

Далее, полученные зависимости силы тока и напряжения от времени были аппроксимированы ступенчатыми функциями (рис. 13).

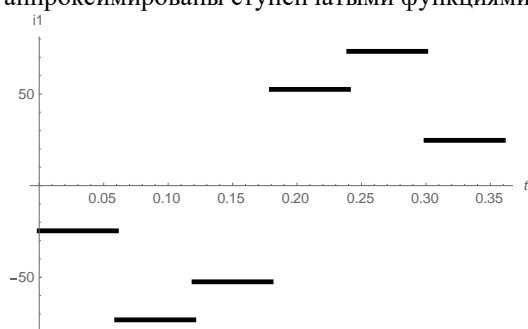


Рис. 13. График аппроксимации ступенчатой функцией силы тока и напряжения от времени

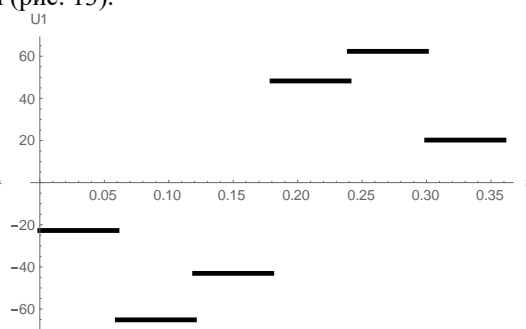


Fig. 13. Graph of approximation by a step function of current and voltage versus time

В результате решения задачи Коши для уравнения (27) с управляющим напряжением в виде ступенчатой функции, представленным на (рис. 13), получены следующие зависимости угла поворота звена от времени, показанные на (рис. 14).

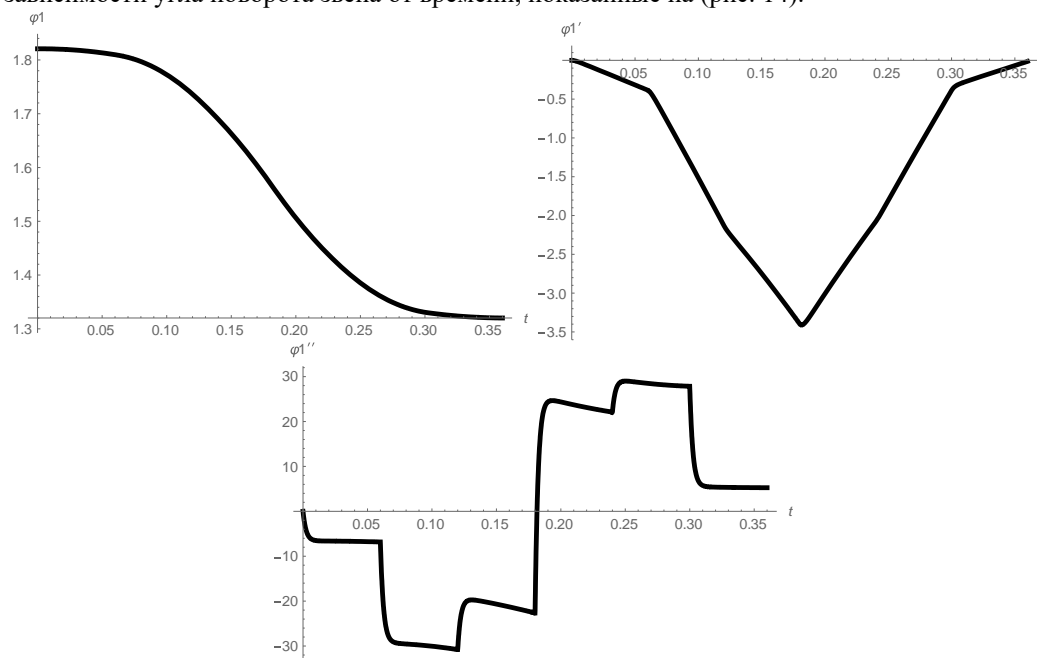


Рис. 14. Результаты решения задачи Коши — найденные угол поворота φ_1 , угловая скорость $\dot{\varphi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}_1$ звена

Fig. 14. The results of solving the Cauchy problem - found the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link

Затраты энергии при анализе антропоморфной ходьбы, можно вычислить как работу управляющих моментов в предположении об отсутствии сил сопротивления и рекуперации энергии при торможении звена.

$$A = \int_0^T \sum_{i=1}^k |U_i i_i| dt. \quad (28)$$

Здесь T – время одного шага, U_i, i_i – напряжение и сила тока в электродвигателях аппарата, k – число независимых приводов.

В результате применения формулы (28) к расчету энергетических затрат приводов, осуществляющих повороты звеньев при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций (рис. 13), имеем: $A_{\text{ф1}} = 911.56$ Дж, являющиеся суммарными энергозатратами механизма. Таким образом, проблемой является значительная разница в затратах энергии на перемещение при идеальных моментах и приводах и на основе реального электрического двигателя.

Обсуждение

Модель звена переменной длины, состоящего из трех участков. Частичным решением выявленных выше проблем может быть модель звена переменной длины [21-24], которая лучше будет аппроксимировать свойства биологического прототипа – опорно-двигательного аппарата человека, в том числе и проблему значительных ускорений, возникающих в момент постановки переносимой ноги на неподвижную опору. Эти ускорения в случае модели с абсолютно твердыми звеньями передавались бы по организму человека, достигая головной мозг, чего в реальности не наблюдается. Введем абсолютную неподвижную правую декартову систему координат $Oxyz$, в которой происходит движение звена переменной длины (рис. 15). Введем подвижную локальную систему координат $Ox_1y_1z_1$, жестко связанную со звеном. Подвижную ось Oz_1 направим вдоль звена, две другие оси введем, исходя из условия правого базиса. Пусть звено состоит из двух массивных абсолютно твердых частей, которые совершают движение относительно друг друга вдоль направления прямой A_0A_1 (рис. 15). В точке A_0 расположен сферический шарнир, жестко соединенный с опорной поверхностью.

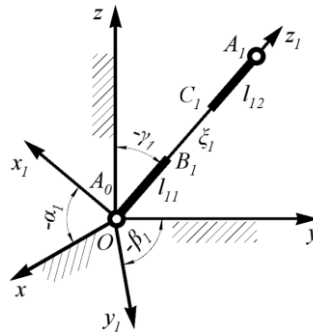


Рис. 15. Звено экзоскелета переменной длины в 3D пространстве

Fig. 15. Exoskeleton link of variable length in 3D space

Геометрические характеристики звена переменной длины: $A_0B_1 = l_1$, $C_1A_1 = l_2$, $B_1C_1 = \xi_1(t)$ размер участка переменной длины, считающегося невесомым. Пусть на участке B_1C_1 действует сила F_1 реализующая требуемое управление изменением длины звена.

Так как углы отсчитываются между осями абсолютной и локальной системы координат против хода часовой стрелки, то, в силу особенностей чертежа, на (рис. 15) углы $\alpha_1(t)$, $\beta_1(t)$, $\gamma_1(t)$ показаны в отрицательном направлении.

Положение в пространстве весомого участка C_1A_1 зависит от двух углов $\alpha_1(t)$, $\beta_1(t)$ и переменной длиной участка $\xi_1(t)$, следовательно, модель имеет три степени свободы. $M_{1\alpha}$, $M_{1\beta}$ – управляющие моменты в шарнире A_0 . Третьим управляющим параметром является сила F_1 , определяющая изменение длины участка стержня $\xi_1(t)$.

Масса участка A_0B_1 равна m_1 , момент инерции относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения – I_1 , участка C_1A_1 – m_2 , момент инерции относительно оси, проходящей через его конец перпендикулярно плоскости движения – I_{12} .

Кинетическая энергия звена является суммой энергий движения стержней A_0B_1 и C_1A_1 :

$$T = T_{A_0B_1} + T_{C_1A_1}, \quad (29)$$

$$2T = \dot{\xi}_1^2 m_{12} + (I_{11} + I_{12} + m_{12}(l_{11}^2 + l_{11}l_{12} + 2\xi_1 l_{11} + \xi_1 l_{12} + \xi_1^2)) \times \\ \times (\dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \beta_1 + \dot{\beta}_1^2).$$

Уравнения движения, составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода и применением локальной системы координат, имеют вид:

$$(I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2))(\ddot{\alpha}_1 \cos^2 \beta_1 - \\ - 2\dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 \cos \beta_1 \sin \beta_1) + m_{12} \cos^2 \beta_1 (2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\alpha}_1 + \\ + g(m_{11}l_{11} + m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1)) \cos \beta_1 = M_{1\alpha}, \quad (30)$$

$$(I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2)) \ddot{\beta}_1 + \\ + \cos \beta_1 \sin \beta_1 (I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2)) \dot{\alpha}_1^2 + \\ + m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\beta}_1 - \\ - g(m_{11}l_{11}/2 + m_{12}(l_{11} + l_{12}/2 + \xi_1)) \cos \alpha_1 \sin \beta_1 = M_{1\beta}, \quad (31)$$

$$- m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1)(\dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \beta_1 + \dot{\beta}_1^2)/2 + \\ + gm_{12} \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + m_{12} \ddot{\xi}_1 = F_{1..} \quad (32)$$

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений движения, описывающая модель звена экзоскелета переменной длины в пространстве. Данная модель позволит приблизить поведение стержневых систем к биомеханическим свойствам опорно-двигательного аппарата человека.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими и электромеханическими системами с абсолютно твердыми звеньями. Рассмотрены вопросы точности аппроксимации биологических прототипов стержневыми механическими системами. Установлено, что погрешность аппроксимации отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата человека стержнями является сопоставимой величиной, и пренебрежение ею приведет к существенным неточностям модели.

Выявлено, что не следует пренебрегать влиянием подвижных частей приводов механизма на его динамику, так как на примере вращения ротора электродвигателя, показано, что он оказывает существенный вклад в движение управляемой модели звена. Возникают проблемы со значительным увеличением расхода энергии на движение, если в модели рассматривать реальный электрический двигатель постоянного тока.

Изучив недостатки моделей, основанных на абсолютно твердом звене, предложено решение указанных проблем на основе звена переменной длины, состоящего из трех участков. Для всех моделей были составлены дифференциальные уравнения движения, описывающие их поведение. Все модели были реализованы в среде универсальной системы компьютерной математики *Wolfram Mathematica* 11.3.

Литература

1. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons // (2021) Journal of Computer and Systems Sciences International, 60 (5), pp. 827-841. <https://link.springer.com/article/10.1134/S106423072104002X>
2. Tsukahara A., Hasegawa Y., Eguchi K., Sankai Y. Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2015. V. 23, №. 2. P. 308-318.
3. Павловский В.Е. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации - концепция, конструкция, модели и управление // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. №11. 19 с.
4. Блинов А.О., Борисов А.В., Борисова В.Л., Гончаров М.В., Гончарова И.А., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С., Новикова М.А. Механика экзоскелета. Монография. Смоленск: Универсум . 2021. 220 с.

5. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., Carstairs G.L., Billing D.C., Garofolini A., Begg R.K. Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks. Hum Factors. 2020 Nov 18:18720820957467. doi: 10.1177/0018720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237.
6. Borisov A.V., Borisova V.L., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Application of active exoskeletons with touch sensing, electric drives, energy recuperators and gravity compensators in agricultural technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V. 699 012019 doi:10.1088/1755-1315/699/1/012019.
7. Toshitake Araie, Tomozumi Ikeda, Uichi Nishizawa, Akira Kakimoto, Shigeki Toyama Mechanism evaluation of agricultural power assist suit under development // Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 8, 2016, p. 328-333. <https://www.jvejournal.com/article/17391>
8. Борисов А.В., Чигарев А.В. Статистическое моделирование неточности и неповторяемости позы человека при ходьбе с использованием конфигурационной энтропии. // Математическое моделирование в области клеточной биологии, биохимии и биофизики: материалы научно-практической интернет-конференции. 25-26 ноября 2014 г. Ульяновск: SIMJET. ноябрь 2014. С. 152-158.
9. Борисов А.В., Волкова Ю.Е. Оценка точности движений при изменении количества звеньев экзоскелета и антропоморфного робота. // Естественные и технические науки. 2015. № 10(88). С. 23-26.
10. Борисов А.В., Буренин А.А., Поленов В.С., Чигарев А.В. Детерминированные и стохастические модели неоднородных сред в механике твердых тел. Монография. Под. ред. профессора Чигарева А. В. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2020. 648 с.
11. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. 544 с.
12. Микулик Н.А. Динамические системы с реактивными звеньями. Минск: Высшая школа. 1985. 112 с.
13. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. ч.4. Динамика. Москва: Высшая школа. 1966. 411 с.
14. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем – Киев: Наукова Думка. 1989. 192 с.
15. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота: монография. Москва: Спутник+. 2009. 212 с.
16. Колубин С.А. Динамика робототехнических систем. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.
17. Львович А.Ю. Основы теории электромеханических систем. Под ред. Н.Н. Поляхова Л. Издательство Ленинградского университета, 1973. 196 с.
18. Сирегар Х.П. Энергетические затраты при ходьбе антропоморфных роботов. Дисс. канд. технич. наук., М. 2003. 134 с.
19. Белов М.П., Чыонг Д.Д., Лань Н.В. Разработка математической модели и управление методом разделения закона управления для экзоскелета // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 1/2020. С. 71-77. https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-1_2020_p071-077.pdf
20. Варков А.А. Разработка и исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом на базе контроллера движения. Дисс. канд. технич. наук., Иваново. 2015. 133 с.
21. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Kulikova M., Maslova K. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D. // Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics, 2021, vol.16, no.4, pp.122-134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
22. 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 // Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.98, no.2, pp. 133-142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
23. Borisov A.V., Chigarev A.V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control. Monograph. Springer, 2022, 232 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>

24. 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 // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2022, vol.99, no.3, pp. 117-130. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130

Авторы публикации

Блинов Александр Олегович – ассистент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Борисов Андрей Валерьевич – д-р физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Кончина Лариса Владимировна – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Куликова Марина Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Маслова Ксения Сергеевна – студентка, филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

References

1. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons. (2021) *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021;60(5):827-841. <https://link.springer.com/article/10.1134/S106423072104002X>
2. Tsukahara A., Hasegawa Y., Eguchi K., Sankai Y. *Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2015. V. 23, №. 2. – P. 308-318.
3. Pavlovsky V.E. *Biomechatronic neurorehabilitation complex - concept, design, models and management*. Preprints of the IPM im. M.V. Keldysh - 2014. - No. 11 - 19 p.
4. Blinov A.O., Borisov A.V., Borisova V.L., et al. *Exoskeleton mechanics*. Monograph. Smolensk: Universum. 2021. 220 p.
5. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., et al. *Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks*. *Hum Factors*. 2020 Nov 18;18720820957467. doi: 10.1177/0018720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237.
6. Borisov A.V., Borisova V.L., Konchina L.V., et al. *Application of active exoskeletons with touch sensing, electric drives, energy recuperators and gravity compensators in agricultural technologies*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V. 699 012019 doi:10.1088/1755-1315/699/1/012019.
7. Toshitake Araie, Tomozumi Ikeda, Uichi Nishizawa. *Mechanism evaluation of agricultural power assist suit under development*. Vibroengineering PROCEEDIA. 2016. V. 8. p. 328-333. <https://www.jvejournal.com/article/17391>
8. Borisov A.V., Chigarev A.V. *Statistical modeling of inaccuracy and non-repeatability of human posture when walking using configuration entropy*. Mathematical modeling in the field of cell biology, biochemistry and biophysics: materials of scientific and practical internet-conference. November 25-26, 2014 - Ulyanovsk: SIMJET. - November 2014. - p. 152-158.
9. Borisov AV, Volkova YuE. Estimation of the accuracy of movements when changing the number of links of the exoskeleton and anthropomorphic robot. *Natural and technical sciences*. 2015;10(88). With. 23-26.
10. Borisov AV, Burenin AA, Polenov VS, et al. *Deterministic and stochastic models of inhomogeneous media in solid mechanics*. Monograph. Under. ed. Professor Chigarev A. V - LAP LAMBERT Academic Publishing. 2020. 648 p.
11. Kron G. *Study of complex systems in parts (diacoptics)*. M.: Nauka, 1972. 544 p.
12. Mikulik NA. *Dynamic systems with reactive links*. Minsk: Higher School. 1985. 112 p.

13. Yablonsky A.A., Nikiforova V.M. *Course of theoretical mechanics*. part 4. Dynamics. Moscow: Higher School. 1966. 411 p.
14. Berbyuk V. E. Dynamics and optimization of robotic systems - Kyiv: Naukova Dumka - 1989. - 192 p.
15. Borisov A. V. *Modeling of the human musculoskeletal system and the application of the results obtained to develop a model of an anthropomorphic robot: monograph*. - Moscow: Sputnik +. 2009. 212 p.
16. Kolyubin S.A. *Dynamics of robotic systems*. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 117 p.
17. Lvovich A.Yu. *Fundamentals of the theory of electromechanical systems*. Ed. N.N. Polyakhova L. Leningrad University Publishing House, 1973. 196 p.
18. Siregar H.P. *Energy costs when walking anthropomorphic robots*. Diss. cand. tech. nauk., M. 2003. 134 p.
19. Belov MP, Truong DD, Lan NV. *Development of a mathematical model and control of the method of separation of the control law for the exoskeleton*. pp. 71-77. https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-1_2020_p071-077.pdf
20. Varkov AA. *Development and research of a control system for a manipulative industrial robot based on a motion controller*. Diss. cand. tech. Sciences., Ivanovo. 2015. - 133 p.
21. Blinov A, Borisov A, Konchina L, et al. *Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D*. Prikladnaya informatika. *Journal of Applied Informatics*. 2021;16(4):122-134. doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
22. Blinov A, Borisov A, Konchina L, et al. Applying the models of magneto- rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness. Prikladnaya informatika. *Journal of Applied Informatic*. 2022;98(2):133-142. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
23. Borisov AV, Chigarev AV. *Mathematical Models of Exoskeleton*. Dynamics, Strength, Control. Monograph. Springer. 2022, 232 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>
24. Blinov A, Borisov A, Filippenkov K, et al. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion. Prikladnaya informatika. *Journal of Applied Informatics*. 2022;99(3):117-130. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130.

Authors of the publication

Alexander O. Blinov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Andrey V. Borisov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Larisa V. Konchina – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Marina G. Kulikova – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Ksenia S. Maslova – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Получено 13.08.2022г.

Отредактировано 19.09.2022г.

Принято 20.09.2022г.