



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07
УДК 531.3

ДВИЖЕНИЕ АНТРОПОИДА НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

В.К. Бадяева¹, А.О. Блинов², А.В. Борисов², Р.Г. Мухарлямов¹

¹ Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

² Филиал национального исследовательского университета «Московский энергетический институт»
в г. Смоленске, Смоленск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 июня 2022
Одобрена: 25 сентября 2022
Принята к публикации: 27 сентября 2022

Ключевые слова:

антропоид, экзоскелет, антропоморфный робот, углы между звеньями, программное движение, управление, электродвигатель, затраты энергии.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается антропоидная модель из трех подвижных звеньев, изменяющих свою конфигурацию под действием внутренних управляющих усилий и реакций со стороны подвижной точки опоры, движение которой задано. Первое нижнее звено моделирует голень, второе звено – бедро и третье – корпус вместе с головой. Отличием предложенной модели, от созданных ранее, заключается в использовании углов между звеньями. В предшествующих работах по моделированию динамики антропоидов углы обычно отсчитываются от какого-либо фиксированного направления – вертикали или горизонтали. Однако такой способ не соответствует биомеханике опорно-двигательного аппарата антропоида, экзоскелета, антропоморфного робота, положения звеньев которых измеряются углами между звеньями. При таком способе задания углов усложняется система дифференциальных уравнений динамики, описывающая движение предложенной модели, в сравнении с моделями, в которых углы отсчитываются от фиксированного направления. Для составления уравнений движения используются локальные подвижные системы координат, связанные со звеньями. Рассматривается программное движение модели, соответствующее заданному закону изменения обобщенных координат, и в результате решения прямой задачи определяются соответствующие управляющие силы. Управление моделируется кусочно-заданной ступенчатой функцией. Рассматривается влияние собственной массы пассивного экзоскелета. Исследуется влияние вращающихся роторов электродвигателей активного экзоскелета на динамику биомеханической системы человек-экзоскелет. Проводятся оценки энергетических затрат в каждом приводе. Проведен полный цикл моделирования динамики антропоида на подвижном основании при различных режимах движения. Ценность полученных результатов заключается в том, что предложенную модель можно непосредственно использовать при создании антропоморфных роботов или экзоскелетов.

© ПНИПУ

Введение

Комфортную окружающую среду для лиц с ограниченными двигательными возможностями можно создать, используя экзоскелеты, которые по аналогии с биомеханикой опорно-двигательного аппарата человека обеспечивают стабилизацию положения тела. Это

позволяет повысить социальную и физическую адаптацию, эффективность работы организма в целом, следовательно, вернуть к полноценной жизни. Таким образом, экзоскелет имеет не только медицинское, но и важное социально-экономическое значение, позволяя социализировать в обществе и вернуть к активной полноценной трудовой деятельности инвалидов, ранее

© Бадяева Владлена Константиновна – студентка, e-mail: vlada_badyaeva@mail.ru ID: 0000-0001-8174-3487

© Блинов Александр Олегович – старший преподаватель, e-mail: alex-blinov67@yandex.ru ID: 0000-0002-1883-7883

© Борисов Андрей Валерьевич – д.ф.-м.н., профессор, e-mail: BorisowAndrei@yandex.ru ID: 0000-0002-7004-3140

© Мухарлямов Роберт Гарабшевич – д.ф.-м.н., профессор, e-mail: robgar@mail.ru ID: 0000-0002-1119-7772



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

не имевших такой возможности. Применение экзоскелетов возможно в восстановительных и геронтологических центрах, для которых экзоскелеты являются необходимыми, как для лечебного процесса пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата, так и для их использования медицинскими сестрами и врачами при уходе за лежачими больными. Экзоскелеты могут применяться в качестве вспомогательного или основного средства для перемещения тяжестей, увеличивая полезную нагрузку, для выполнения различных трудовых нагрузок в промышленности, сельском хозяйстве, армии, с целью их уменьшения на опорно-двигательный аппарат человека, повышения выносливости рабочих, предохранения их от профессиональных заболеваний и травм. Поэтому разработка биомеханических моделей «человек – экзоскелет», обеспечивающих устойчивое, целенаправленное, комфортабельное передвижение человека, является важной научной и практической задачей. Следствием использования экзоскелетов будет рост качества выпускаемой продукции, снижения ее себестоимости, повышение качества услуг.

Биомеханическому моделированию движения антропоидных структур в разных видах спорта посвящены работы [4; 9; 16; 16; 26; 35]. В них строятся модели спортсменов, изучаются методы сбора информации, исследуется кинематика и динамика движений. Системы видеоанализа антропоидов исследуются в работе П.А. Кручинина и соавт. [15]. Анализу поведения человека на подвижной платформе посвящены работы [1; 47].

В работах А.В. Борисова, Г.М. Розенблата, Л.В. Кончиной, Р.Г. Мухарлямова [3; 5–8; 33; 34] предложены различные алгоритмы и методы составления уравнений движения экзоскелетов и антропоморфных механизмов в виде стержневых систем, в том числе с переменной длиной звеньев. Исследуются вопросы управления такими системами.

Вопросам внедрения последних технических достижений антропоморфной мехатроники, в том числе экзоскелетов, в практику посвящена работа В.Г. Медведева [18].

В оздоровительных учреждениях России [24] и мира [49] экзоскелеты применяются для восстановления двигательных способностей больных. В Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук (ИПМ РАН) создан экзоскелет нижних конечностей для лечения пациентов с заболеваниями опорно-двигательного аппарата [19]. В Лаборатории бионической робототехники ИПМ РАН в помощь врачам разработаны экзоскелеты *ExoArm* и *ExoChair* [10; 22]. Для медицины, спасательных работ и т.п. в проекте «ЭкзоАтлет» разработаны модели пассивных и активных экзоскелетов [39]. Проводится внедрение в медицинскую практику разработанных моделей [13; 14].

Решению прикладных задач и применению экзоскелетов в промышленном производстве посвящены научно-практические работы и патенты С.Ф. Яцуна [20; 28]. Имеются патенты отечественных и зарубежных моделей экзоскелетов, направленные на применение их в промышленности [23; 27].

Теоретическим разработкам математических моделей экзоскелетов с управляемыми гидравлическими, электромеханическими приводами и их аналитическому и численному исследованию посвящены работы [31; 32; 43; 45]. Обзор возможностей применения экзоскелета в военных целях приведен в работе [44]. В США агентство *DARPA* ведет активные разработки антропоморфных механизмов [36; 46] Использование экзоскелетов в сельском хозяйстве описывается в работах [39; 48; 50].

Для моделирования различных технических систем, в том числе антропоидной структуры, разработана программа «Универсальный механизм» [25]. В ней проводится составление дифференциальных уравнений движения, численное решение задачи Коши, имеется возможность анимационной визуализации движения модели по результатам моделирования. Программа предназначена инженерам для разработки конкретных моделей в машиностроении, но неудобна для аналитических исследований. В программе осуществлялось численно-аналитическое моделирование антропоморфных роботов, реализация алгоритмов управления с обратной связью для обеспечения устойчивой целенаправленной двуногой ходьбы [11; 21]. Антропоморфные роботы необходимы в качестве транспортных систем, так как вся инфраструктура внутри помещений создавалась под двуногую ходьбу, а не под колесный тип перемещения.

В лаборатории *Boston Dynamics* [36] разрабатывается антропоморфный робот *Atlas* [30]. Программа, управляющая движениями робота *Atlas*, координирует перемещения ног, корпуса и рук для манипуляций всем механизмом в целом, увеличивая его рабочее пространство. В Японии много фирм занимаются практической разработкой антропоморфных роботов. Так, компания *Honda* создала робота-гуманоида *Asimo* [29]. Также разработаны вспомогательные устройства *Stride Management Assist* и *Bodyweight Support Assist*, облегчающее нагрузку на ноги человека во время ходьбы или выполнения трудовых операций [40].

Отметим, что в большинстве моделей экзоскелетов рассматриваются в основном углы, отсчитываемые от фиксированного направления, а не относительные углы между звеньями. Проведенный обзор известных моделей антропоидов показал, что пока не созданы управляемые пространственные антропоморфные механизмы на подвижных основаниях с углами, отсчитываемыми между звеньями. Данная работа является теоретической основой для создания нового класса антропоидных моделей.

Описание модели антропоида на подвижном основании и постановка задачи

Рассмотрим биомеханическую модель антропоида, содержащую три подвижных звена на подвижном основании, способных изменять свою конфигурацию под действием внутренних усилий и реакций опоры (рис. 1). Подвижное основание моделирует, например, гироскутер, лыжи или лошадь под всадником, стоящим на стремянах. Движение точки опоры ног антропоида считается заданным. Антропоид моделируется стержневым механизмом с цилиндрическими шарнирами, в которых создаются необходимые для реализации заданного целенаправленного движения вращающие моменты. Движение биомеханической системы осуществляется в вертикальной плоскости xOy . Будем считать, что в двумерном случае координаты крепления антропоида к подвижному основанию $(x_{A_1}(t), y_{A_1}(t))$ представляют дважды дифференцируемые функции времени. Для сокращения записи в дальнейшем аргумент t будем опускать. Первое звено антропоида моделирует голень со стопой, второе – бедро, третье – корпус вместе с головой и руками. Звенья моделируются однородными стержнями, центры масс которых расположены в середине, и моменты инерции вычисляются по известным формулам.

Предлагаемая модель антропоида отличается от известных моделей [3–8; 35] использованием углов, отсчитываемых между звеньями. Такой подход удобен при описании опорно-двигательного аппарата человека и в технических системах, моделирующих двуногую ходьбу, – экзоскелетах и антропоморфных роботах. Углы $\varphi_i = \varphi_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) являются переменными функциями времени. Длины звеньев $l_i = A_i A_{i+1}$, массы звеньев m_i , моменты инерции относительно центров масс I_i ($i = 1, 2, 3$) считаются постоянными.

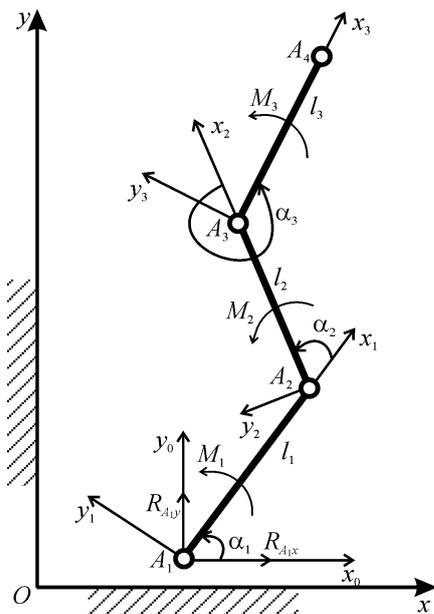


Рис. 1. Стержневая модель антропоида с цилиндрическими шарнирами и тремя подвижными звеньями на подвижном основании

Для первого звена выберем в качестве полюса точку A_1 . Для составления дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода используем локальные подвижные системы координат и матрицы перехода из одной системы координат в другую. Оси $A_i x_i$ будем направлять вдоль соответствующих звеньев ($i = 1, 2, 3$). Для подвижного основания, непосредственно не показанного на рис. 1, ось x_0 направим по горизонтали. Выражения значений координат и центров масс звеньев в неподвижной системе координат имеют вид:

$$\begin{aligned} x_{C_1} &= x_{A_1} + \left(\frac{1}{2}\right)l_1 \cos(j_1), \\ y_{C_1} &= y_{A_1} + \left(\frac{1}{2}\right)l_1 \sin(j_1), \\ x_{C_2} &= x_{A_1} + l_1 \cos(j_1) + \left(\frac{1}{2}\right)l_2 \cos(j_1 + j_2), \\ y_{C_2} &= y_{A_1} + l_1 \sin(j_1) + \left(\frac{1}{2}\right)l_2 \sin(j_1 + j_2), \\ x_{C_3} &= x_{A_1} + l_1 \cos(j_1) + l_2 \cos(j_1 + j_2) + \left(\frac{1}{2}\right)l_3 \cos(j_1 + j_2 + j_3), \\ y_{C_3} &= y_{A_1} + l_1 \sin(j_1) + l_2 \sin(j_1 + j_2) + \left(\frac{1}{2}\right)l_3 \sin(j_1 + j_2 + j_3). \end{aligned} \tag{1}$$

Дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода были составлены с использованием системы компьютерной математики *Wolfram Mathematica 11.3*:

$$\begin{aligned} \theta \ddot{x}_A - (\eta_1 l_1 S_1 + \eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) - (\eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) - \\ - \eta_3 l_3 S_{123} - (\eta_1 l_1 C_1 + \eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) - (\eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) - \\ - \eta_3 l_3 C_{123} - (\eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) - \eta_3 l_3 C_{123} = R_{A_1 x}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \theta \ddot{y}_A + (\eta_1 l_1 C_1 + \eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) + (\eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) + \\ + \eta_3 l_3 C_{123} - (\eta_1 l_1 S_1 + \eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) - (\eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) - \\ - \eta_3 l_3 S_{123} - (\eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) - \eta_3 l_3 S_{123} - \theta g = R_{A_1 y}, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} - (\eta_1 l_1 S_1 + \eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) \ddot{x}_A + (\eta_1 l_1 C_1 + \eta_2 l_2 C_{12} + \\ + \eta_3 l_3 C_{123}) \ddot{y}_A + (\zeta_1 + \eta_2 l_2 l_2 C_2 + \eta_3 l_2 l_3 C_3 + \eta_3 l_3 l_3 C_{23}) \ddot{\varphi}_1 + \\ + (\zeta_2 + \eta_2 l_2 l_2 C_2 + \eta_3 l_2 l_3 C_3 + \eta_3 l_3 l_3 C_{23}) C_{12} \ddot{\varphi}_2 + (\zeta_3 + \\ + \eta_3 l_2 l_3 C_3 + \eta_3 l_3 l_3 C_{23}) \ddot{\varphi}_3 - (\eta_2 l_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_2 l_3 S_{123}) \dot{\varphi}_2^2 - \\ - (\eta_3 l_2 l_3 S_3 + \eta_3 l_3 l_3 S_{23}) \dot{\varphi}_3^2 - (\eta_2 l_2 l_2 S_2 + \eta_3 l_2 l_3 S_{23}) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 - \\ - (\eta_3 l_2 l_3 S_3 + \eta_3 l_3 l_3 S_{23}) \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 - (\eta_3 l_2 l_3 S_3 + \eta_3 l_3 l_3 S_{23}) \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + \\ + g (\eta_1 l_1 C_1 + \eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) = M_1 - M_2, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} - (\eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) \ddot{x}_A + (\eta_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_3 S_{123}) \ddot{y}_A + \\ + (\zeta_2 + \eta_2 l_2 l_2 C_2 + \eta_3 l_2 l_3 C_3 + \eta_3 l_3 l_3 C_{23}) \ddot{\varphi}_1 + \\ + (\zeta_2 + \eta_3 l_2 l_3 C_3) \ddot{\varphi}_2 + (\zeta_3 + \eta_3 l_2 l_3 C_3) \ddot{\varphi}_3 + \\ + (\eta_2 l_2 l_2 S_{12} + \eta_3 l_2 l_3 S_{123}) \dot{\varphi}_1^2 - \eta_3 l_2 l_3 S_3 \dot{\varphi}_3^2 - \\ - \eta_3 l_2 l_3 S_3 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 - \eta_3 l_2 l_3 S_3 \dot{\varphi}_2 \dot{\varphi}_3 + g (\eta_2 l_2 C_{12} + \eta_3 l_3 C_{123}) = \\ = M_2 - M_3, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} - \eta_3 l_3 S_{123} \ddot{x}_A + \eta_3 l_3 C_{123} \ddot{y}_A + (\zeta_3 + \eta_3 l_2 l_3 C_3 + \eta_3 l_3 l_3 C_{23}) \ddot{\varphi}_1 + \\ + (\zeta_3 + \eta_3 l_2 l_3 C_3) \ddot{\varphi}_2 + \zeta_3 \ddot{\varphi}_3 - (\eta_3 l_2 l_3 S_3 + \eta_3 l_3 l_3 S_{23}) \dot{\varphi}_1^2 - \\ - \eta_3 l_2 l_3 S_3 \dot{\varphi}_2^2 + \eta_3 l_2 l_3 S_3 \dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_3 + g \eta_3 l_3 C_3 = M_3, \end{aligned} \tag{6}$$

где $\zeta_j = \sum_{i=j}^3 I_i + \sum_{i=j}^3 l_i^2 m_{i+1}$, $\eta_j = \sum_{i=j}^3 (m_{i+1} + \delta_{ij} m_i / 2)$, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases}$

$\theta = \sum_{i=1}^3 m_i$, $C_{12} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$, $C_{123} = \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$,

$C_i = \cos \varphi_i$, $S_i = \sin \varphi_i$, ($i = 1, 2, 3$), $S_{12} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2)$, $S_{123} = \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$, ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$).

Дифференциальные уравнения движения механизма с углами, отсчитываемыми между звеньями, для многозвенных механизмов достаточно громоздки. Поэтому целесообразно представить их в матричной форме записи. Вычисление кинетической энергии, составление уравнений движений, матричная форма записи и выражения элементов матриц приведено в [7; 8; 35].

Задачей исследования является проведение замкнутого цикла моделирования движения антропоида на подвижном основании. На первом этапе требуется определить обобщенные силы, используя закон движения модели, основанный на аналитическом задании обобщенных координат. На втором этапе необходимо решить задачу Коши для системы дифференциальных уравнений (2)–(6). При этом управление моделируется кусочно-заданной ступенчатой функцией, определенной на первом этапе. Необходимо провести исследование поведения модели, рассмотрев влияние вращающихся роторов электродвигателя на динамику биомеханической системы «человек – экзоскелет», определить оценки энергетических затрат в каждом приводе при движении антропоида.

Определение управляющих моментов в шарнирах-суставах антропоида

Для решения задачи определения усилий в подвижных соединениях антропоидной модели используем программное управление движением. Определим координаты точки крепления первого звена механизма на подвижном основании и углы между звеньями в виде периодических дифференцируемых функций, синтезирующих антропоидное движение:

$$\begin{aligned} x_{A1}(t) &= t, \\ y_{A1}(t) &= b_1 \sin(2\pi t / T), \\ \varphi_1(t) &= \pi / 2 + a_1 j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t / T])\pi / 2], \\ \varphi_2(t) &= a_2(j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t / T])\pi / 2] / 2 - \\ &\quad - j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t / T])\pi / 2]), \\ \varphi_3(t) &= a_3(j_3 \sin[f_2 - \pi(1 + \cos[2\pi t / T])\pi / 2] - \\ &\quad - (j_2 \cos[f_2 - \pi(1 - \cos[2\pi t / T])\pi / 2] / 2 - \\ &\quad - j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t / T])\pi / 2])). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $a_1, a_2, a_3, b_1, j_1, j_2, j_3$ и f_1, f_2, f_3 – параметры ходьбы, T – период ходьбы. Значения длин, масс и моментов инерции звеньев антропоида, соответствующие эмпирически определенным значениям голени, бедра и корпуса человека [2], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Числовые характеристики звеньев антропоида

Параметр	Голень	Бедра	Корпус
Длина, м	0,385	0,477	0,771
Масса, кг	2,910	8,930	28,930
Момент инерции, кг·м ²	0,144	0,677	5,732

Параметры в формулах (7), обеспечивающие реализацию антропоморфного движения, определены величинами: $a_1 = 1,00, a_2 = 0,11, a_3 = 0,40, b_1 = 0,25, j_1 = j_2 = 0,25, j_3 = 0,10, f_1 = 1,57, f_2 = 0,69$. Время движения $t_k = 0,36$ с. Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². На рис. 2 показаны зависимости углов поворота, угловых скоростей и угловых ускорений звеньев, определяемые формулами (7) и их производными с заданными параметрами движения. Зависимости, представленные на рис. 2, показывают, что при движении антропоида на подвижном основании возникают значительные кратковременные угловые и линейные ускорения, что следует учитывать при выборе приводов для создания экзоскелета. Кадры анимационной визуализации движения антропоида, представлены на рис. 3. Они демонстрируют движение модели, находящейся на подвижном основании. Из системы уравнений движения (2)–(6) находим реакции подвижного основания R_{A1x}, R_{A1y} и управляющие моменты $M_1(t), M_2(t), M_3(t)$ для приводов, расположенных в шарнирах A_1, A_2, A_3 . Соответствующие графики представлены на (рис. 4). Представленные на рис. 4 результаты показывают, что имеются кратковременные значительные нагрузки в шарнирах-суставах экзоскелета, что надо учитывать, создавая реально работающий антропоидный механизм при выборе конструкционных материалов, редукторов и электродвигателей. Наибольшие абсолютные значения реакций подвижного основания и управляющих моментов в шарнирах-суставах антропоида $R_{A1x} = 1026,4$ Н, $R_{A1y} = 667,3$ Н, $M_1 = 2188,0$ Н·м, $M_2 = 1068,4$ Н·м и $M_3 = 321,4$ Н·м можно использовать для подбора электродвигателей и редукторов. Управляющие моменты M_1, M_2, M_3 – это моменты на выходном валу редуктора в шарнирах-суставах антропоида, позволяющие изменять конфигурацию звеньев требуемым образом для синтеза антропоморфного движения.

Решение задачи Коши

Проведем решение задачи Коши для дифференциальных уравнений (2)–(6), используя управляющие моменты, представленные на рис. 4. Реализуем импульсное управление движением. Зададим импульсный закон управления антропоидным механизмом, аппроксимируя управляющие моменты ступенчатой функцией. Разделим время движения на шесть равных участков, на каждом из которых значение момента будем считать постоянным. Значения моментов подсчитаем как среднее арифметическое на каждом участке по формуле:

$$M_\gamma = \frac{\int_{t_{\gamma-1}}^{t_\gamma} M_1(t) dt}{t_\gamma - t_{\gamma-1}}, \quad (8)$$

где γ – ранжированная переменная, задающая номер участка разбиения. Разобьем время движения на шесть участков $\gamma = 1, 2, \dots, 6$. Графики полученных ступенчатых функций для управляющих моментов в шарнирах-суставах антропоида приведены на рис. 5.

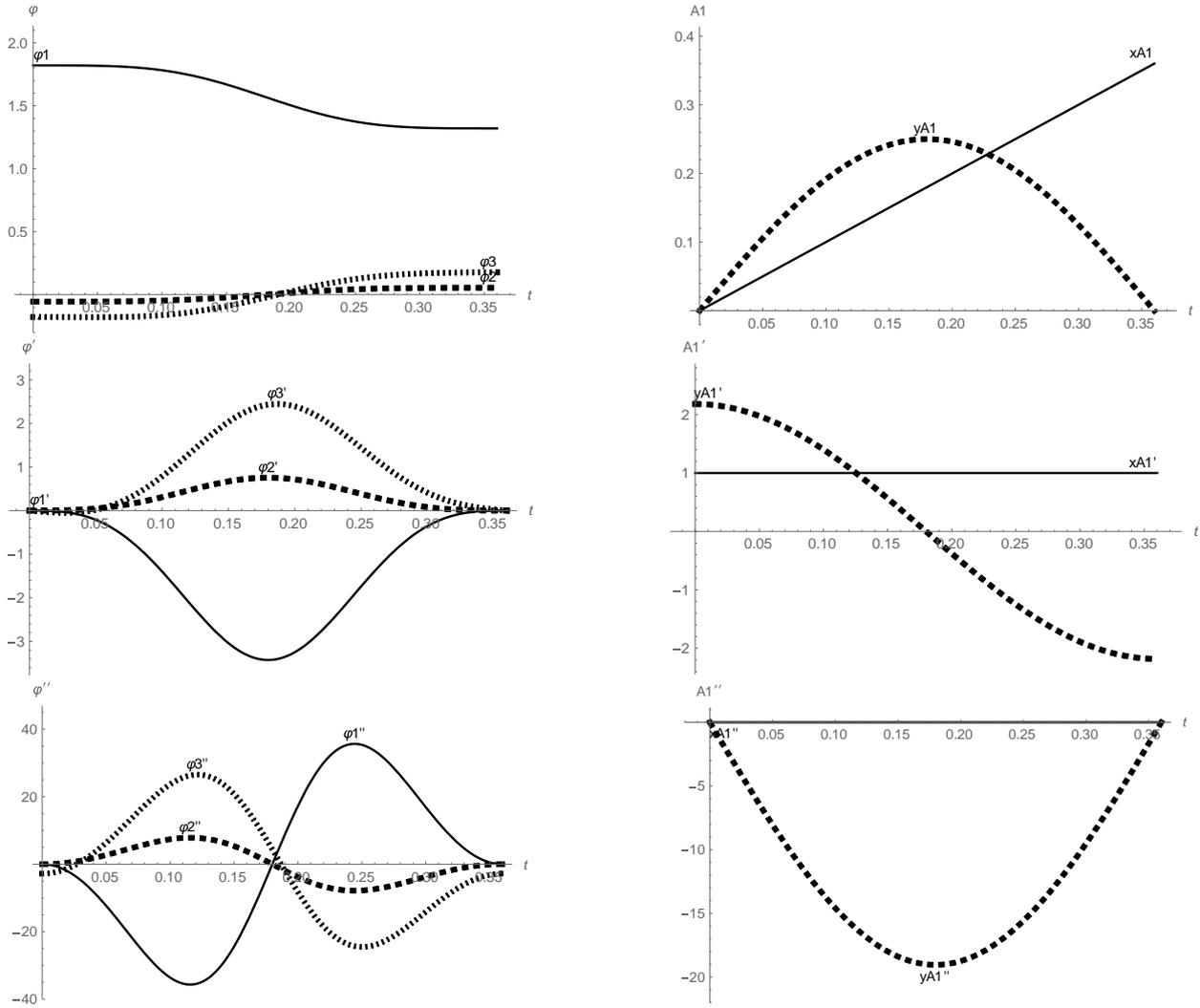


Рис. 2. Зависимости от времени координат подвижного основания x_{A1} , y_{A1} , углов поворота φ_1 , φ_2 , φ_3 , и их производных

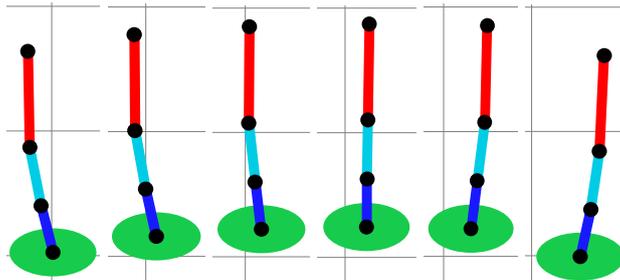


Рис. 3. Анимация движения антропоидного механизма, заданного формулами (7)

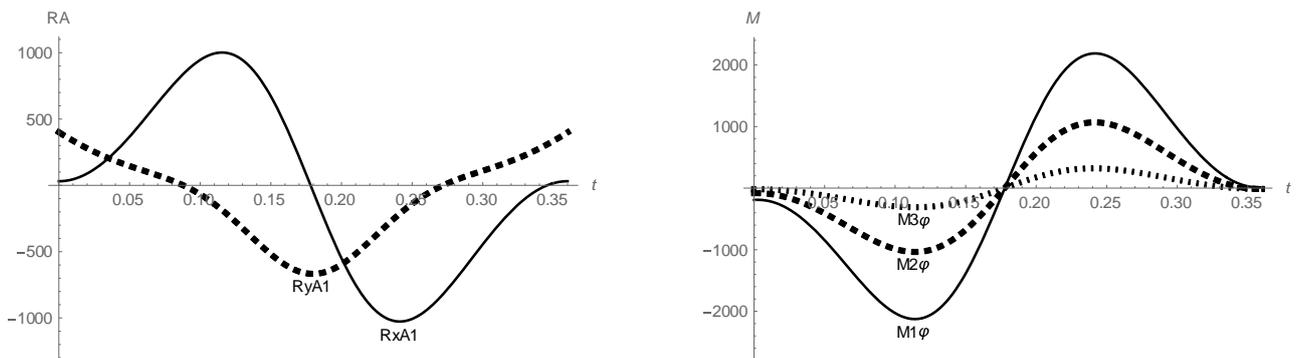


Рис. 4. Реакции подвижного основания R_{A1x} , R_{A1y} и управляющие моменты M_1 , M_2 , M_3

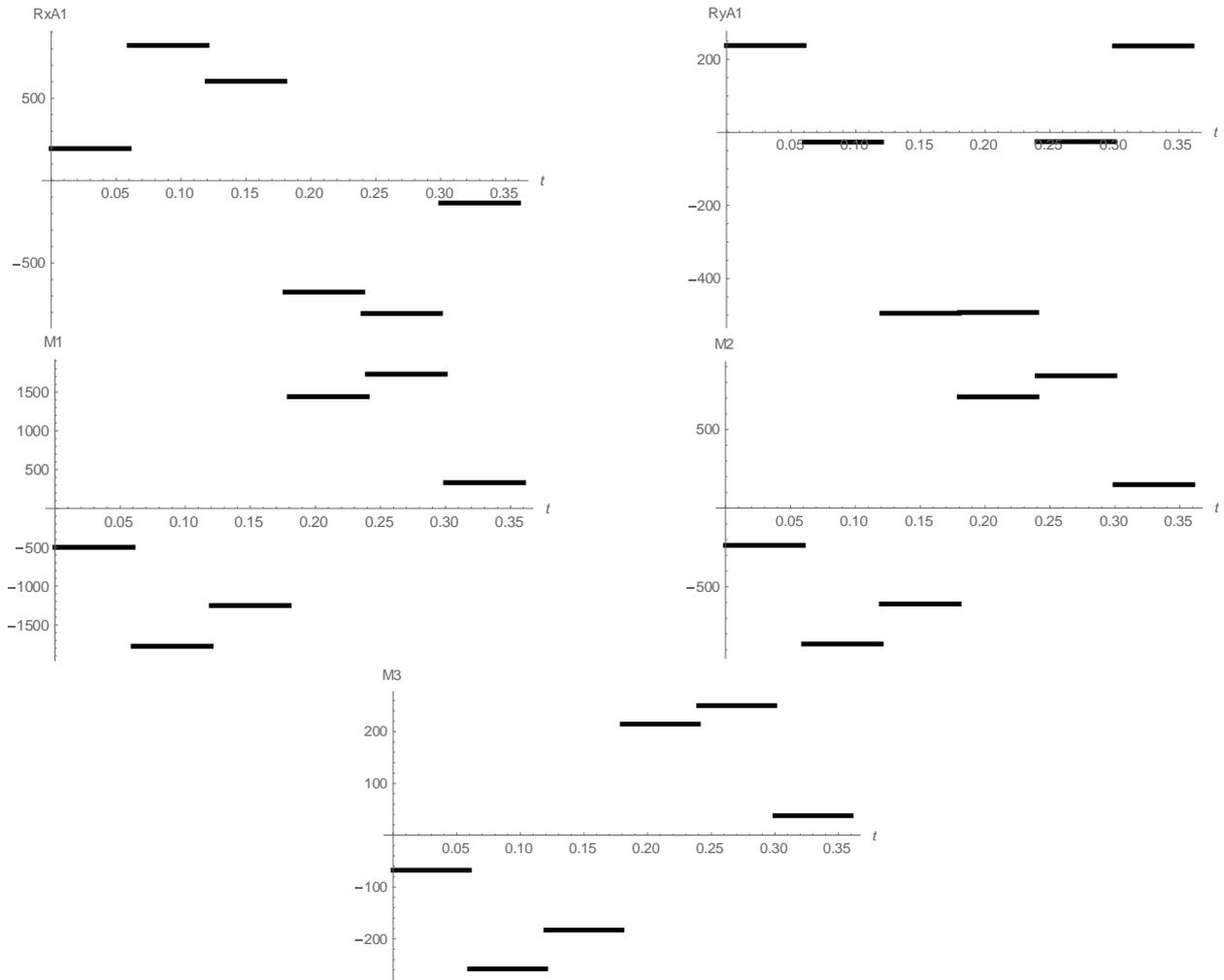


Рис. 5. Реакции подвижного основания $R_{A_{1,x}}$, $R_{A_{1,y}}$ и управляющие моменты $M_1(t)$, $M_2(t)$ и $M_3(t)$ в виде кусочно-заданных функций в шарнирах-суставах антропоидного механизма

Решая задачу Коши для уравнений движения (2)–(6) с управляющими моментами в виде ступенчатых функций, представленных на (рис. 5), получены кинематические характеристики движения, приведенных на рис. 6.

Сравнивая результаты численного решения задачи Коши для системы уравнений движения (2)–(6) с исходным (см. рис. 2), видно хорошее совпадение зависимостей углов поворота звеньев, качественное совпадение угловой скорости и углового ускорения. Следовательно, импульсное управление в виде ступенчатых функций для управляющих моментов (см. рис. 5) является приемлемым и может быть использовано при управлении движением антропоидного механизма.

Энергетические затраты антропоида подсчитаем как работу реакций и управляющих моментов, пренебрегая силами сопротивления и рекуперацией энергии при торможении звена:

$$A = \int_0^T \sum_{i=1}^n |Q_i \dot{q}_i| dt + \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^k |M_i| dt, \quad (9)$$

где Q_i , \dot{q}_i – обобщенные силы и обобщенные скорости, M_i – моменты, развиваемые приводами аппарата,

T – время движения, k – количество независимых приводов антропоидного механизма.

В табл. 2 представлены результаты применения первого слагаемого формулы (9) к подсчету затрат энергии на перемещение подвижного основания и второго слагаемого для вычисления энергозатрат приводов в шарнирах-суставах при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций показанных на рис. 5 суммарных затрат энергии антропоидного механизма.

Оценки энергетических затрат в приводах антропоидного механизма необходимы для выбора оптимального источника питания при создании, например, активного экзоскелета или антропоморфного робота.

Таблица 2

Энергетические затраты антропоидного механизма

Параметр	Основание		Привод, расположенный в точке			Сумма
	A_x	A_y	A_1	A_2	A_3	
Затраты энергии, Дж	201,5	226,6	1172,1	568,0	168,6	2336,8

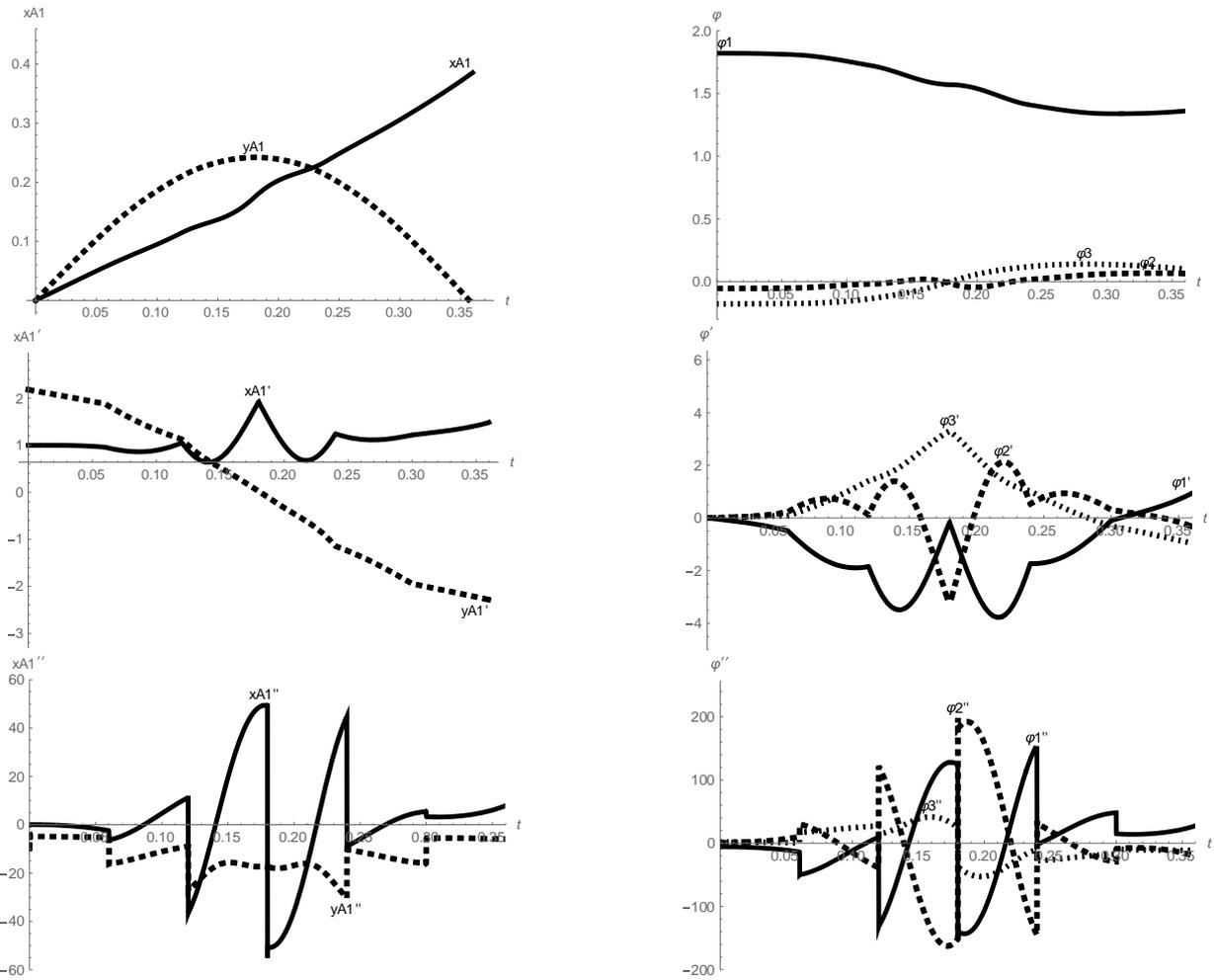


Рис. 6. Линейные координаты подвижного основания x_{A_1}, y_{A_1} ; углы поворота ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ; угловые скорости $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3$; угловые ускорения $\ddot{\phi}_1, \ddot{\phi}_2, \ddot{\phi}_3$ звеньев

Влияние вращающихся роторов электроприводов на динамику антропоидного механизма

Вследствие пренебрежимо малой массы электродвигателей, редукторов и их вращающихся частей влиянием указанных факторов на динамику антропоидных механизмов пренебрегают. Поэтому рассмотрим влияние вращения роторов электродвигателей на динамику всего механизма. Используем управляющие моменты, в виде кусочно-заданных ступенчатых функций, предложенных выше и представленных на рис. 5.

Рассмотрим электромеханическую модель привода антропоидного механизма, состоящую из электродвигателей с редукторами, расположенными в шарнирах-суставах A_i ($i = 1, 2, 3$). Рассмотрим влияние инерционных характеристик двигателей на систему дифференциальных уравнений движения (2)–(6) [12]. Подвижными являются роторы электродвигателей, совершающие вращательное движение вокруг осей, расположенных в точках A_i ($i = 1, 2, 3$). Вклад вращающихся роторов в кинетическую энергию всей электромеханической системы учтем следующим образом:

$$T_{R_i} = \frac{m_{E_i} v_{A_i}^2}{2} + \frac{I_{R_i} k_{R_i}^2 \dot{\phi}_i^2}{2} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (10)$$

где I_{R_i} – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_{R_i} – передаточное число редуктора, m_{E_i} – масса всего электропривода в целом в шарнире A_i , управляющим поворотом i -го звена, т.е. изменением угла ϕ_i ($i = 1, 2, 3$). Вкладом в кинетическую энергию вращающихся элементов редуктора пренебрежем, так как не имеется информации о моментах инерции вращающихся частей. Также пренебрежем трением в подшипниках всех вращающихся элементов механизма. Массы редукторов с электродвигателями будем учитывать в выражениях кинетической энергии и потенциальной энергии механизма как сосредоточенные массы, расположенные на конце звена, находящегося непосредственно перед шарниром.

Система дифференциальных уравнений в форме уравнений Лагранжа второго рода составляется с учетом наличия редуктора и ротора в электродвигателе. Система уравнений движения механизма антропоидной структуры с тремя подвижными звеньями и углами, отсчитываемыми между звеньями на подвижном основании, имеет

вид (2)–(6). Используются следующие замены коэффициентов перед обобщенными координатами и их производными:

$$\zeta_i = I_i + I_{R_i} + l_i^2 \sum_{i=1}^3 m_{i+1},$$

$$\eta_j = \sum_{i=j}^3 (m_{i+1} + \delta_{ij} (m_i/2) + m_{E_{i+1}}), \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (11)$$

$$\theta = \sum_{i=1}^3 (m_i + m_{E_i}), \quad (i = 1, 2, 3).$$

Управляющие моменты M_i на выходном валу редуктора определяются из системы уравнений (2)–(6). Таким образом, можно сделать вывод, что структура уравнений не изменилась, добавилось несколько слагаемых в выражения угловых ускорений и сил тяжести.

Электродвигатели и редуктора выбираются, исходя из максимальных значений управляющих моментов и развиваемых скоростей. В качестве примера для всех шарниров используем одинаковые электродвигатели постоянного тока фирмы *Maxon* [38] серии *DCX26L* с массой, равной 0,17 кг, и моментом инерции ротора $1,97 \cdot 10^{-6}$ кг·м². Выберем планетарный редуктор фирмы *Maxon* серии *GPX32* с массой, равной 0,23 кг, и переда-

точным числом редуктора $k_R = 231$. Масса электродвигателя с редуктором равна 0,4 кг.

Приведем сравнение решения задачи Коши (рис. 7) для системы уравнений динамики с учетом электроприводов (11) с решением, представленным на рис. 6, полученным на основе моментов, аппроксимируемых в виде ступенчатых кусочно-заданных функций (см. рис. 5).

По графикам на рис. 7 видно, что движение подвижного основания мало изменилось, а движение звеньев антропода изменилось незначительно, сохранилась антропоморфность. Графики скоростей стали более гладкими, максимальные значения незначительно уменьшились. Наибольшие изменения претерпели ускорения, максимальные значения уменьшились примерно в два раза. Учет динамики роторов сглаживает движение, делает его более плавным вследствие недостаточного управления моментами, рассчитанными без учета масс и моментов инерции роторов электроприводов, расположенных в шарнирах-суставах антропода. Следовательно, вращение роторов электродвигателей, несмотря на их относительно небольшие инерционные характеристики, оказывают существенный вклад в динамику антропода, и пренебрегать ими при создании экзоскелетов не следует.

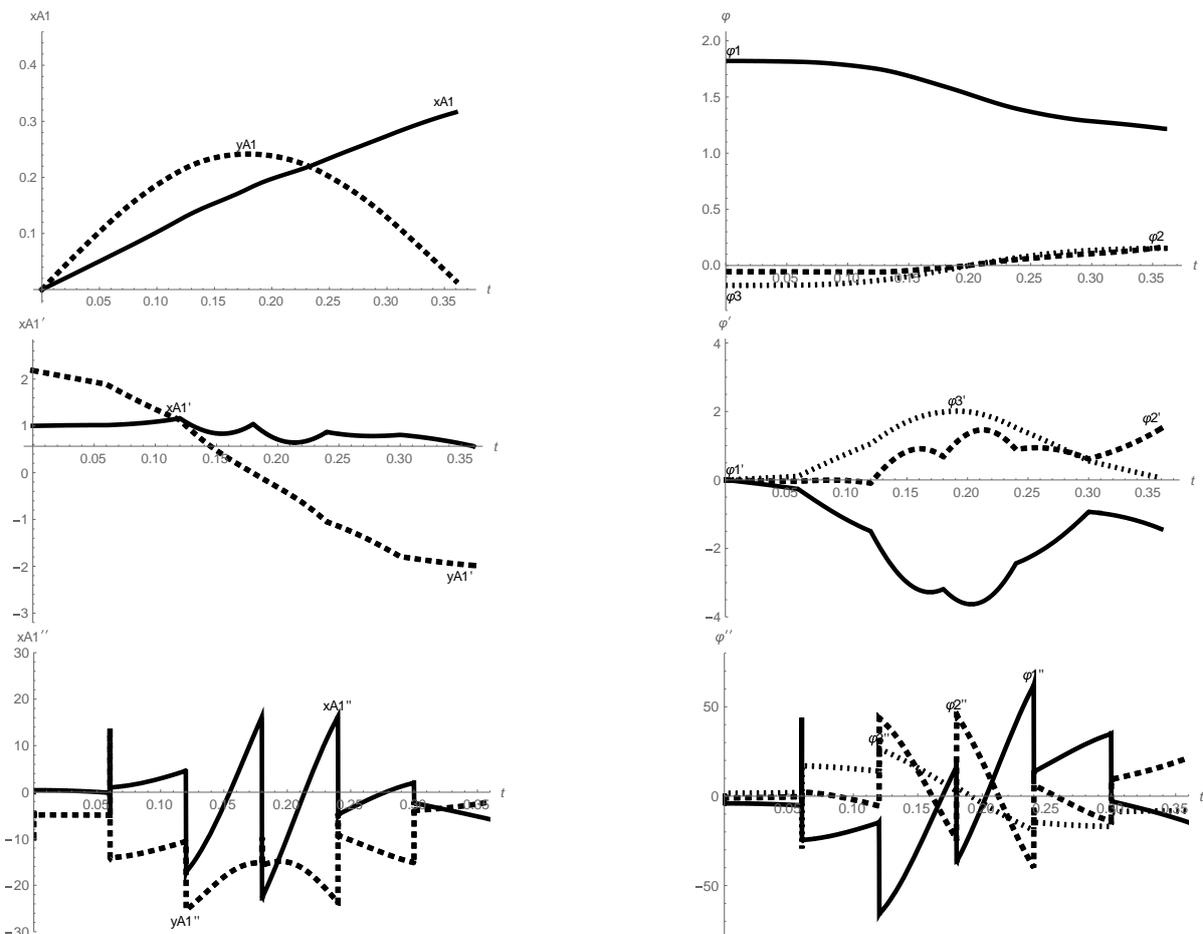


Рис. 7. Решение задачи Коши для антропоидного механизма с учетом вращения роторов электроприводов – линейные координаты подвижного основания x_{A_1}, y_{A_1} ; углы поворота $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$; угловые скорости $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3$; угловые ускорения $\ddot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_2, \ddot{\varphi}_3$ звеньев

Заключение

В результате исследования создана модель антропоида на подвижном основании с углами, отсчитываемыми между звеньями. Записана система дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Разработана методика задания программного движения экзоскелета, проведено решение прямой задачи динамики. Предложен способ решения обратной задачи динамики на основе задания управляющих моментов кусочно-заданными ступенчатыми функциями, рассчитываемыми исходя из решения прямой задачи динамики с использованием управления программным движением. Предлагаемый способ управления динамикой экзоскелета на подвижном основании приводит к хорошему результату. Проведены оценки энергетических затрат антропоидного механизма при движении, что может быть использовано при подборе источников питания для экзоскелета. Осуществлен анализ влияния вращения роторов электродвигателей на динамику антропоида. Установлено, что они оказывают влияние на конфигурацию звеньев, их угловые скорости и ускорения. Проведен полный цикл моделирования движения антропоида на подвижном основании при разных режимах движения. Важность полученных результатов заключается в применении углов между звеньями, что соответствует биомеханике антропоида и позволяет использовать предложенную модель для биомеханического моделирования опорно-двигательного аппарата человека, при создании экзоскелетов и антропоморфных роботов.

Список литературы

- Агиар М.Л., Папке К., Шеерен Э.М. Электромиографическая система, кинетические и кинематические переменные как факторы, недостаточные для прогнозирования невозможности восстановления надвигающейся потери равновесия // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 55–63.
- Борисов А.В. Динамика эндо- и экзоскелета: монография. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2012. – 296 с.
- Борисов А.В., Борисова В.Л., Каспирович И.Е., Каспирович К.З., Мухарлямов Р.Г., Филиппенков К.Д. Математическое моделирование динамики многомерных механических систем и решение задач управления. – Смоленск: Универсум, 2021. – 220 с.
- Борисов А.В., Каспирович И.Е., Матухина О.В., Мухарлямов Р.Г. Моделирование лыжника-сноубордиста звеном переменной длины с двумя весомами абсолютно твердыми участками // Вестник КГТУ. – 2020. – Т. 23, № 6. – С. 78–85.
- 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.
- Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарлямов Р.Г. Управление динамикой составной конструкции со звеньями переменной длины // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2021. – № 2. – С. 72–87.
- Борисов А.В., Розенблат Г.М. Матричный метод составления дифференциальных уравнений движения экзоскелета и управление им // Прикладная математика и механика. – 2017. – Т. 81, № 5. – С. 511–522.
- Борисов А.В., Розенблат Г.М. Моделирование динамики экзоскелета с управляемыми моментами в суставах и переменной длиной звеньев с использованием рекуррентного метода составления дифференциальных уравнений движения // Известия РАН. Теория системы управления. – 2018. – № 2. – С. 148–174.
- Васюк В.Е., Гусейнов Д.И., Давыдова Н.С., Лукашевич Д.А., Минченя А.В. Экспериментальное обоснование применения интеллектуальных сенсорных систем в оценке биомеханических параметров спортивных движений // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 300–311.
- Гергей А.М., Бондарук Е.В., Малахова Е.С., Ефимов А.Р., Тах В.Х., Сотин А.В. Исследование амплитуд движений в крупных суставах верхних и нижних конечностей и сочленениях позвоночника при использовании промышленных экзоскелетов // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 475–490.
- Голубев Ю.Ф., Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование шагающих роботов // Фундаментальная и прикладная математика. – 1998. – Т. 4, № 2. – С. 525–534.
- Колюбин С.А. Динамика робототехнических систем: учеб. пособ. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
- Котов С.В., Исакова Е.В., Лиждвой В.Ю., Секирин А.Б., Письменная Е.В., Петрушанская К.А., Геворкян А.А. Методические рекомендации по нейрореабилитации больных рассеянным склерозом, имеющих нарушения ходьбы, с использованием экзоскелета EхоAtlet. – М.: ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, 2018. – 26 с.
- Котов С.В., Петрушанская К.А., Лиждвой В.Ю., Письменная Е.В., Секирин А.Б., Сутченков И.А. Клинико-физиологическое обоснование применения экзоскелета «Экзоатлет» при ходьбе для больных с рассеянным склерозом // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 148–166.
- Кручинин П.А., Латонов В.В., Матвеев Д.С. Определение взаимной ориентации блока акселерометров и тела системы видеонализа // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 323–329.
- Кубяк А.Е., Паршин Д.В. Об исследовании кинематики движений лыжников элитного уровня при использовании техники «дабл полинг» // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 285–300.
- Лавровский Э.К. Задача управления движением «гимнаста» в свободном полете и при переходе в режим контакта с опорой // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 64–75.
- Медведев В.Г. Антропоморфная мехатроника для спорта и медицины // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 2. – С. 232–242.
- Павловский В.Е. [и др.]. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации – концепция, конструкция, модели и управление [Электронный ресурс] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2014. – № 111. – 19 с. (URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-111>).
- Пат. на полезную модель RU 190786 U1, 12.07.2019. Пассивный грузовой экзоскелетон / Яцун С.Ф., Мищенко В.Я., Яцун А.С. Заявка № 2019110529 от 09.04.2019, опубл. 12.07.2019.
- Погорелов Д.Ю. Современные алгоритмы компьютерного синтеза уравнений движения систем тел // Теория и

- системы управления (Известия АН). – 2005. – № 4. – С. 5–15.
22. Проекты. ExoChair. Промышленное оборудование [Электронный ресурс]. – URL: karfidovlab.com/projects/exochair (дата обращения: 29.05.2022).
 23. Пат. на изобретение RU 2489130 С1, 10.08.2013. Простая конструкция компенсации веса человека при ходьбе и беге / Родин И.А. Заявка № 2011148041/14 от 28.11.2011, опубл. 10.08.2013.
 24. Тихоплав О.А., Иванова В.В., Гурьянова Е.А., Иванов И.Н. Эффективность роботизированной механотерапии комплекса "ЛОКОМАТ PRO" у пациентов, перенёсших инсульт // Вестник восстановительной медицины. – 2019. – № 5. – С. 57–64.
 25. Универсальный механизм - программный комплекс для моделирования динамики механических систем [Электронный ресурс]. – URL: www.umlab.ru (дата обращения: 29.05.2022).
 26. Фаттах А.О., Батайне А.С. Анализ кинематики разбега в соревновании по прыжкам в длину у спортсменов мужской команды Иордании // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 19–27.
 27. Пат. на изобретение RU 2567589 С1, 10.11.2015. Экзоскелет / Иванов В.Г., Мерзанюкова Е.В., Санин Д.А. Заявка № 2014132377/14 от 05.08.2014, опубл. 10.11.2015.
 28. Яцун С.Ф., Антипов В.М. Карлов А.Е., Аль Манджи Хамиль Хамед Мохаммед. Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – Т. 23, № 2. – С. 8–17.
 29. ASIMO by Honda | The World's Most Advanced Humanoid Robot, available at: <http://asimo.honda.com> (accessed: 29 May 2022).
 30. Atlas™ | Boston Dynamics, available at: <https://www.bostondynamics.com/atlas> (accessed: 29 May 2022).
 31. Bao W., Villarreal D., Chiao J.-C. Vision-based autonomous walking in a lower-limb powered exoskeleton // 2020 IEEE 20th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). – Cincinnati, 2020. – P. 830–834. DOI: 10.1109/BIBE50027.2020.00141
 32. Blažek P., Bydžovský J., Griffin R., Mls K., Peterson B. Obstacle awareness subsystem for higher exoskeleton safety. In: Paralič J., Sinčák P., Hartono P., Mařík V. (Eds.). World Symposium on Digital Intelligence for Systems and Machines DISA 2020: Towards Digital Intelligence Society. DISA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1281. – P. 59–71.
 33. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D // Journal of Applied Informatics. – 2021. – Vol. 16, no. 4. – P. 122–134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
 34. Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Novikova M.A. Applying the models of magneto-rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // Journal of Applied Informatics. – 2022. – Vol. 17, no. 2. – P. 133–142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
 35. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. Matrix method for constructing dynamical equations of snowboarder // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – Vol. 1191. – Article no. 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/1191/1/012004
 36. Boston Dynamics | Changing Your Idea of What Robots Can Do, available at: <https://www.bostondynamics.com> (accessed: 29 May 2022).
 37. DARPA, available at: <https://darpa.com> (accessed: 29 May 2022).
 38. Discover the maxon's world of drive technology | maxon group, available at: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index> (accessed: 29 May 2022).
 39. Exoatlet. Носимые экзоскелеты для реабилитации детей и взрослых [Электронный ресурс]. – URL: exoatlet.lu ((дата обращения: 29.05.2022)).
 40. Exoskeleton designed to assist agricultural workers and gardeners – Robohub, available at: <https://robohub.org/exoskeleton-designed-to-assist-agricultural-workers-and-gardeners> (accessed: 29 May 2022)
 41. Honda Mobility Assistance and Robotics Technology | ASIMO Innovations, available at: <http://asimo.honda.com/innovations> (accessed: 29 May 2022).
 42. Jonsson M., Welde B., Stöggl T. L. Biomechanical differences in double poling between sexes and level of performance during a classical cross-country skiing competition // Journal of Sports Science. – 2019. – Vol. 37, no. 14. – P. 1582–1590.
 43. Passive Exoskeleton: patent no. US7571839B2 United States. Conrad Chu, Piscataway, NJ (US), Andy Chu, Cambridge, MA (US), publication of 21.07.2009.
 44. 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, available at: https://vuir.vu.edu.au/42729/1/Exoskeleton%20Application%20to%20Military%20Manual%20Handling%20Tasks_J.K.Proud_ProductionReady_V1.pdf (accessed: 29 May 2022).
 45. Qing Guo, Songjing Li, Dan Jiang. A lower extremity exoskeleton: human-machine coupled modeling, robust control design, simulation, and overload-carrying experiment // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–15. DOI: 10.1155/2015/905761
 46. Robot Locomotion Group, available at: <http://groups.csail.mit.edu/locomotion/> (accessed: 29 May 2022).
 47. Roelofs J.M., de Kam D., van der Zijden A.M., Robinovitch S.N., Weerdesteyn V. Effect of body configuration at step contact on balance recovery from sideways perturbations // Human Movement Science. – 2019. – Vol. 66. – P. 383–389.
 48. Toyama Shigeki, Yamamoto Gohei. Development of Wearable-Agri-Robot. 2009 // The IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – St. Louis, 2009. – P. 5801–5806. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354265
 49. 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. – Vol. 23, no. 2. – P. 308–318.
 50. UBC Back Study, available at: <https://research-groups.usask.ca/ergolab/our-research/exoskeleton.php> (accessed: 29 May 2022).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке за счет гранта Российского научного фонда и Смоленской области № 22-29-20308, <https://rscf.ru/project/22-29-20308/>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ANTHROPOID MOVEMENT ON A MOVABLE BASE

V.K. Badyaeva¹, A.O. Blinov², A.V. Borisov², R.G. Mukharlyamov¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

² Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Smolensk, Russia

ARTICLE INFO

Received: 14 June 2022

Approved: 25 September 2022

Accepted for publication: 27 September 2022

Key words:

anthropoid, exoskeleton, anthropomorphic robot, angles between links, programmed motion, control, electric motor, energy consumption.

ABSTRACT

The anthropoid model of three mobile links that can change their configuration due to internal steering forces and the mobile surface reactions with the specified motion is considered in the article. The first bottom link simulates shin, the second link simulates hip, and the third link simulates the body with the head. The proposed model differs from the existing ones in utilization of angles between links. In the preceding studies of anthropoid dynamics simulation, the angles are usually calculated from a particular assigned direction – either vertical or horizontal. This approach, however, is inconsistent with the musculoskeletal system biomechanics of anthropoid, exoskeleton, or anthropomorphic robot. The positions of their links are specified by the angles between the links. This approach of specifying the angles makes the system of differential equations, describing the proposed model motion, more complicated in comparison with the models where the angles are calculated from the assigned direction. The local mobile systems of coordinates are fixed with the corresponding links and are used for deriving the motion equations. The programmed motion corresponding to the specified law of generalized coordinates change is considered. The corresponding controlling forces are figured out as the result of the forward problem solution. The link control is simulated with the piecewise step function. The impact of the passive exoskeleton own mass is considered. The spinning rotors impact of the active exoskeleton's electric drives on the dynamics of human-exoskeleton biomechanical system is studied. The energy consumption in each drive is estimated. The entire cycle of anthropoid dynamics simulation on the movable base in different motion modes is conducted. The value of the obtained results lies in the fact that the proposed model can be used directly in creating anthropomorphic robots and exoskeletons.