
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (05.02.05)

УДК 531.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-110-120

Управление звеном экзоскелета переменной длины

А.В. Борисов, К.Д. Филиппенков

Цель исследования — создание пространственной электромеханической модели звена переменной длины для использования в телескопических манипуляторах, антропоморфных роботах, экзоскелетах и при изучении опорно-двигательного аппарата человека. Предложенная модель звена имеет на концах два массивных абсолютно твердых участка и расположенный между ними невесомый участок переменной длины.

Для достижения цели работы использованы методы теоретической механики, электромеханики, математического моделирования, инженерного проектирования, численные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, теории управления, нелинейной динамики, экспериментальные методы, эмпирические данные о биомеханических свойствах опорно-двигательного аппарата человека. Надежность полученных результатов обоснована строгим использованием указанных методов. В результате работы записана система дифференциальных уравнений Лагранжа–Максвелла, создана электромеханическая модель антропоморфной системы в пакете Matlab Simulink. При геометрических и инерционных параметрах звена переменной длины, соответствующих голени среднестатистического человека, и времени, соответствующего фазе одноопорного движения, выполнен подбор электрических двигателей и редукторов, обеспечивающих реализацию фрагмента биомеханики движения звена опорно-двигательного аппарата человека. Все взятые двигатели имеют достаточный запас по напряжению. Определены траектории для всех обобщенных координат, обеспечивающих необходимое движение антропоморфной системы. Получены нагрузочные диаграммы механизма. Синтезирована система управления для двигателей. Проведена оценка ошибки позиционирования.

Новизна подхода заключается в том, что впервые разработанные электромеханические модели управляемых звеньев переменной длины имеют широкую область применения результатов и могут быть использованы при создании антропоморфных роботов и комфортабельных экзоскелетов нового поколения.

Таким образом, создана электромеханическая модель звена переменной длины с параметрами, соответствующими голени среднестатистического человека. Подобраны электроприводы и передачи, позволяющие реализовать движение, близкое к антропоморфному, показана его реализация и даны результаты численных расчетов.

Ключевые слова: звено переменной длины, электропривод, редуктор, экзоскелет, антропоморфный робот, дифференциальные уравнения Лагранжа–Максвелла, численное моделирование.

Для цитирования: Борисов А.В., Филиппенков К.Д. Управление звеном экзоскелета переменной длины // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 110—120. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-110-120.

Controlling a Variable-Length Exoskeleton Link

A.V. Borisov, K.D. Filippenkov

The aim of the study is to develop a spatial electromechanical model of a variable-length link for use in telescopic manipulators, anthropomorphic robots, exoskeletons, and in studying the human musculoskeletal system. The proposed link model has two massive absolutely solid sections at the ends and a weightless section of variable length located between them.

The study was carried out using the methods of theoretical mechanics, electromechanics, mathematical modeling, engineering design, numerical methods for solving systems of ordinary differential equations, control theory, nonlinear dynamics, experimental methods, and empirical data on the biomechanical properties of the human musculoskeletal system. The reliability of the obtained results is substantiated by a rigorous use of the above-mentioned methods.

As a result of the study, a system of Lagrange-Maxwell differential equations was written, and an electromechanical model of an anthropomorphic system was developed in the Matlab Simulink software package. With the specified geometric and inertial parameters of a variable-length link corresponding to an average person's leg lower part and the time corresponding to the single-support motion phase, the electric motors and reducing gears implementing the human musculoskeletal system link's biomechanical motion fragment are selected. All of the selected motors have a sufficient operating parameters margin. The trajectories of all generalized coordinates along which the anthropomorphic system performs its necessary motion are determined. The mechanism load diagrams are obtained. The control system for the motors is synthesized, and the positioning error is evaluated. The novelty of the approach is that the newly developed electromechanical models of controlled variable-length links have a wide range of applying the obtained results and can be used in designing anthropomorphic robots and comfortable new-generation exoskeletons. Thus, the electromechanical model of a variable-length link with the parameters corresponding to the average person's leg lower part has been developed. The electric drives and transmissions able to implement a motion close to the anthropomorphic one have been selected; its implementation has been demonstrated, and the numerical calculation results are given.

Key words: variable-length link, electric drive, reducing gear, exoskeleton, anthropomorphic robot, Lagrange-Maxwell differential equations, numerical simulation.

For citation: Borisov A.V., Filippenkov K.D. Controlling a Variable-Length Exoskeleton Link. Bulletin of MPEI. 2021;3:110—120. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-110-120.

Состояние вопроса по анализируемой проблеме

Разрабатываемая модель отличается от имеющихся наличием двух массивных абсолютно твердых участков и расположенным между ними невесомым участком переменной длины [1 — 3].

Имеется модель экзоскелета, служащая для ходьбы и реабилитации людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата, а также в качестве универсальной транспортной платформы [4]. Однако, ее конструкция усложнена. Необходимы два аккумулятора: пневматический и электрический. Это утяжеляет конструкцию, время автономной работы невелико, и пользователю приходится приспосабливаться к экзоскелету.

Один из лидеров в разработке экзоскелетов — США, где большинство работ финансируется DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) [5]. При их поддержке фирмы Raytheon и Sarcos создали экзоскелет XOS, однако в нем отсутствует автономность. Существует и автономный экзоскелет HULC, но время его работы невелико.

Экзо (Ekso) фирмы Экзо Бионикс (Ekso Bionics) [6] получен в лаборатории робототехники и человеческой инженерии в Беркли (Berkeley, Exoskeletons: Robotics & Human Engineering Laboratory) [7]. Также, в качестве эволюции экзоскелета можно рассматривать роботов, представленных Н. Kazerooni [8].

ReWalk Robotics выпустил экзоскелет с четырьмя звеньями (бедро и коленные суставы), программируемый с заданной структурой походки, обеспечивающей необходимую мышечную тренировку для пользователя [9].

Большинство моделей экзоскелетов разработаны японскими инженерами и учеными. Существует модель HAL-5 (Hybrid Assistive Limb, гибридная вспомогательная конечность) корпорации Cyberdyne с ножными и ручными усилителями. Экзоскелет HAL стал базовой моделью для проведения различных исследований. Так, в [10] описано управление робота-

экзоскелета HAL, основанное на датчиках скорости, изменении положения центра масс и силы реакции. В [11] экзоскелет HAL управляется на базе объединения сигналов, создаваемых верхними и нижними конечностями.

Компания Honda создала вспомогательное устройство Honda-Walk Assist And Mobility Devices [12], представляющее собой портативный экзоскелет, состоящий из талии (рамы) с закрепленными с двух сторон искусственными бедрами, каждое из которых имеет одну степень свободы.

В Новой Зеландии Rex Bionics Group спроектировала экзоскелет Rex [13], обеспечивающий полную поддержку веса тела в состоянии равновесия без использования трости.

Экзоскелет для больных после инсульта создал М. Bortole [14]. Этой же проблемой занимаются индийские ученые [15]. В Европе Швейцарская компания Hocoma [16] разработала Локомат (Lokomat), являющийся роботизированным экзоскелетом. Он востребован в медицинских учреждениях России для восстановления постинсультных больных [17].

В ИПМ им. М.В. Келдыша РАН изобретен экспериментальный комплекс роботизированных мехатронных реабилитационных устройств, включающий экзоскелет нижних конечностей, применяемый для пациентов с различной тяжестью заболеваний опорно-двигательного аппарата [18, 19]. Также в лаборатории бионической робототехники ИПМ им. М.В. Келдыша РАН созданы экзоскелетные устройства EchoArm и EchoChair [20].

В институте механики МГУ исследуются вопросы управления движением экзоскелета и энергетических затрат при ходьбе [21, 22].

В рамках проекта «ЭкзоАтлет» [23] воспроизведены перспективные модели пассивных и активных экзоскелетов, в первую очередь, ориентированных на социально значимые проекты: медицину, спасательные работы и т. п.

Тема промышленных применений экзоскелетов развита в [24, 25], а практические результаты исследований даны в [26, 27]. В указанных работах выявлены общие недостатки активных экзоскелетов — малое время работы, большая масса аккумуляторов, сложность конструкции и управления. Из представленного обзора научной литературы и имеющихся патентов моделей экзоскелетов следует, что к настоящему времени еще не созданы модели экзоскелетов со звеньями переменной длины, которые были бы комфортабельными для пользователя.

Постановка задачи

Рассмотрим модель звена экзоскелета с одной закрепленной точкой в пространстве. Введем неподвижную правую декартову систему координат $Oxyz$, в которой движется механизм (рис. 1.). Звено AB переменной длины состоит из двух весоных частей постоянной длины и одной невесоной части между ними переменной длины.

Система имеет два весоных абсолютно жестких стержня AC и DB с длинами участков звена постоянной длины $AC = l_{11}$, $DB = l_{12}$ (двойная нумерация индексов связана с перспективами построения многозвеной модели экзоскелета: первый индекс соответствует номеру звена, второй — номеру весоного участка на звене). Переменность длины звена реализована за счет относительного движения вдоль направления звена AB участка DB . Участок переменной длины CD считается невесоным. Сила F_1 обеспечивает необходимое управляемое изменение длины звена. Поступательное перемещение звена осуществляется ременной передачей. Для уменьшения массы конструкции шестерню и рейку лучше изготавливать на основе композитных материалов.

Комбинация двух цилиндрических шарниров с электродвигателями, расположенных в точке A и жестко соединенных с опорной поверхностью, позволяет реализовать движение вдоль двух угловых обобщен-

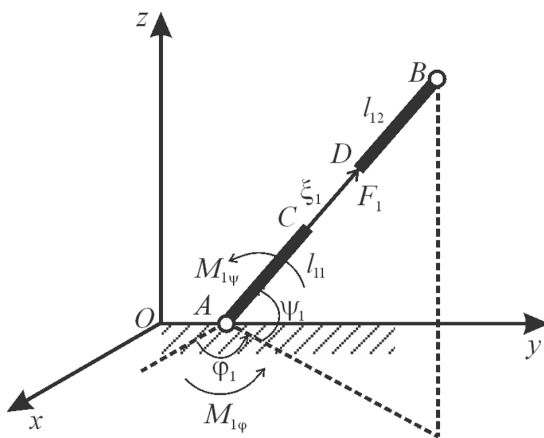


Рис. 1. Модель звена экзоскелета переменной длины в пространстве

ных координат ϕ_1 и ψ_1 . Под действием силы тяжести и реакции со стороны опоры и соседних стержней (на рис. 1 не приведены) происходит движение участка DB относительно участка AC вдоль направления AB , тем самым обеспечивается изменение длины звена на участке CD .

Положение весоного участка звена зависит от трех параметров и однозначно определяется углами $\phi_1(t)$, $\psi_1(t)$ и переменной длиной участка стержня $\xi_{11}(t)$. Рассматриваемая система имеет три степени свободы. Обозначим через $M_{1\phi}$ и $M_{1\psi}$ управляющие моменты, развиваемые электроприводами в шарнире A . Продольная сила F_1 — третий управляющий параметр в изучаемой системе.

Масса стержня AC равна m_{11} , момент инерции относительно оси, проходящей через его конец, — I_{11} , для стержня DB масса составляет m_{12} , момент инерции относительно оси, проходящей через его конец, — I_{12} .

Кинетическая энергия звеньев складывается из энергий весоных участков звена: стержней AC и DB . Стержень DB совершает сложные движения: вращательное — вокруг полюса, находящегося в точке A прикрепления к опоре, и поступательное — вдоль направления звена:

$$T = T_{AC} + T_{DB};$$

$$T = \left[m_{12} \dot{\xi}_1^2 + (I_{11} + I_{12} + m_{12} (l_{11}^2 + l_{11}l_{12} + 2\xi_1 l_{11} + \xi_1 l_{12} + \xi_1^2)) \times (\dot{\phi}_1^2 \cos^2 \psi_1 + \dot{\psi}_1^2) \right] / 2.$$

Дифференциальные уравнения движения, составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид:

$$\begin{aligned} & \left(I_{11} + I_{12} + m_{12} \left((2l_{11} + l_{12}) \xi_1 + (l_{11} + l_{12}) l_{11} + \xi_1^2 \right) \right) \times \\ & \times \left(\ddot{\phi}_1 \cos^2 \psi_1 - 2\dot{\phi}_1 \dot{\psi}_1 \cos \psi_1 \sin \psi_1 \right) + \\ & + m_{12} \cos^2 \psi_1 (2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\phi}_1 = M_{1\phi}; \\ & \left(I_{11} + I_{12} + m_{12} \left((2l_{11} + l_{12}) \xi_1 + (l_{11} + l_{12}) l_{11} + \xi_1^2 \right) \right) \times \\ & \times \left(\ddot{\psi}_1 + \dot{\phi}_1^2 \cos \psi_1 \sin \psi_1 \right) + \\ & + g \left(m_{11} l_{11} / 2 + m_{12} (l_{11} + l_{12} / 2 + \xi_1) \right) \cos \psi_1 + \\ & + m_{12} (2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\psi}_1 = M_{1\psi}; \\ & m_{12} \ddot{\xi}_1 - m_{12} (2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \left(\dot{\phi}_1^2 \cos^2 \psi_1 + \dot{\psi}_1^2 \right) / 2 + \\ & + g m_{12} \sin \psi_1 = F_1. \end{aligned}$$

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений движения, описывающая модель звена экзоскелета переменной длины на плоскости.

Запишем уравнения электрической подсистемы в виде уравнений Лагранжа–Максвелла. Вычислим кинетическую энергию магнитного поля, учтем обратную ЭДС и активные потери в двигателе. В качестве обобщенной координаты примем заряд якоря.

В результате получим закон изменения напряжения, прикладываемого к двигателю для обеспечения движения механизма по заданной траектории.

Запишем уравнения электрической подсистемы:

$$\begin{cases} L_{\varphi} \ddot{q}_{\varphi} + \dot{q}_{\varphi} R_{я_{\varphi}} + k\Phi_{\varphi} \dot{\varphi} i_{\varphi} = u_{я_{\varphi}}; \\ L_{\psi} \ddot{q}_{\psi} + \dot{q}_{\psi} R_{я_{\psi}} + k\Phi_{\psi} \dot{\psi} i_{\psi} = u_{я_{\psi}}; \\ L_{\xi} \ddot{q}_{\xi} + \dot{q}_{\xi} R_{я_{\xi}} + k\Phi_{\xi} \dot{\xi} \frac{i_{\xi}}{R_{дш}} = u_{я_{\xi}}, \end{cases}$$

где L_{φ} , L_{ψ} , L_{ξ} — индуктивности обмоток ДПТ, Гн; $R_{я_{\varphi}}$, $R_{я_{\psi}}$, $R_{я_{\xi}}$ — активные сопротивления обмоток ДПТ, Ом; $k\Phi_{\varphi}$, $k\Phi_{\psi}$, $k\Phi_{\xi}$ — моментные постоянные ДПТ, В·с; i_{φ} , i_{ψ} , i_{ξ} — передаточные числа редукторов; $R_{дш}$ — делительный радиус шестерни реечной передачи, м.

Необходимо подобрать электродвигатели, редукторы и провести моделирование управляемого движения звена с заданными числовыми параметрами модели, синтезировать систему управления для двигателей и оценить ошибку позиционирования.

Моделирование антропоморфной системы выполним со следующими данными.

Начальное состояние соответствует моменту постановки ноги на опору, конечное — отрыву ноги от опоры. Угол ψ_1 в начальный момент времени равен 120° , в конечный — 60° . Угол φ_1 в процессе движения совершает небольшие колебания. Если предположить, что данное звено моделирует голень человека, то эмпирические данные для человека среднего роста таковы. Начальные длины недеформированных звеньев — $l_1^* = 0,385$ м. Длины на звене распределены следующим образом: $l_{11} = l_{12} = 0,15$ м, $\xi_1^* = 0,085$ м. Масса звена $m_1 = 2,91$ кг. Пусть полная масса включает в себя массы двигателей и редукторов. Предположим, что она распределена поровну между двумя весомами абсолютно твердыми участками звена, т. е. $m_{11} = m_{12} = m/2$. Время, в течение которого происходит одноопорная фаза шага, т. е. половина периода ходьбы $t_k = 0,36$ с. Ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

Метод решения и допущения

Моделирование антропоморфной системы проведем в пакете Matlab Simulink (рис. 2).

Сначала синтезируем для каждой степени свободы траектории. Для координаты φ траектория представляет собой синусоидальные колебания возле угла 90° (рис. 3, а).

Для координаты ψ синтезирована траектория второго порядка с трапецеидальным скоростным профилем (рис. 3, б). Пусть время разгона равно времени работы на постоянной скорости, т. е. траектория раз-

бита на 3 участка: разгон — 0,12 с, движение на номинальной скорости — 0,12 с, торможение — 0,12 с. Поскольку весь путь координаты ψ равен $\pi/3$, ускорение считаем равным $\pi/(6 \cdot 0,12^2)$, а скорость — $\pi/(6 \cdot 0,12)$.

Для координаты ξ траектория — синусоида с амплитудой 0,085/2, сдвинутая на 0,085/2 вверх относительно 0 (рис. 3, в). Таким образом, получаем плавную траекторию поступательного движения.

Для установки управляющих и полных моментов используем блок Matlab Fcn. Внутри блока записаны уравнения движения системы. На вход поступают значения всех координат, на выход — диаграммы моментов.

Дополним модель подсистемами вычисления момента инерции и среднеквадратичных моментов.

Необходимо подобрать двигатели и редукторы, рассчитать реечную передачу. Двигатель выберем по среднеквадратичному и максимальному моментам, скорости. Редуктор взят с таким передаточным числом, чтобы обеспечить заданную динамику антропоморфной системы. Двигатели и редукторы должны быть очень компактными, с малой массой. Реечную передачу лучше изготовить из композитного материала, например, карбона, тем самым, обеспечив высокую прочность деталей и малую массу.

После выбора двигателей и редукторов модель дополняется подсистемой расчета токов двигателей и блока Matlab Fcn для расчета управляющих напряжений.

Синтезированы системы управления двигателями. Выбрана простейшая одноконтурная система управления с ПИД-регулятором. Коэффициенты регулятора рассчитаны с использованием Control Systems Toolbox. Для координат ψ , φ момент инерции — переменный, что также учтено в модели. Для координаты ξ момент инерции — постоянный, равный сумме моментов инерции двигателя, редуктора и весомого участка DB . Все моменты и траектории приведены к валу двигателя.

Результаты

Выбраны приводные коллекторные двигатели и редукторы компании Maxon [28].

Для координаты φ — планетарный редуктор GPX16 с передаточным отношением 679, двигатель DCX14L мощностью 3,4 Вт. Суммарная масса привода — 57 г.

Для координаты ψ — планетарный редуктор GPX32 с передаточным отношением 231, двигатель DCX26L мощностью 62,6 Вт. Суммарная масса привода — 390 г.

Для координаты ξ — планетарный редуктор GP32BZ с передаточным отношением 3,7, двигатель RE30. Делительный диаметр шестерни — 18,3 мм, количество зубцов — 17, модуль зубчатого зацепления — 1 мм. Суммарная масса привода — 410 г.

Анализ полученных результатов

По синтезированным траекториям рис. 3, обеспечивающим желаемое движение антропоморфной си-

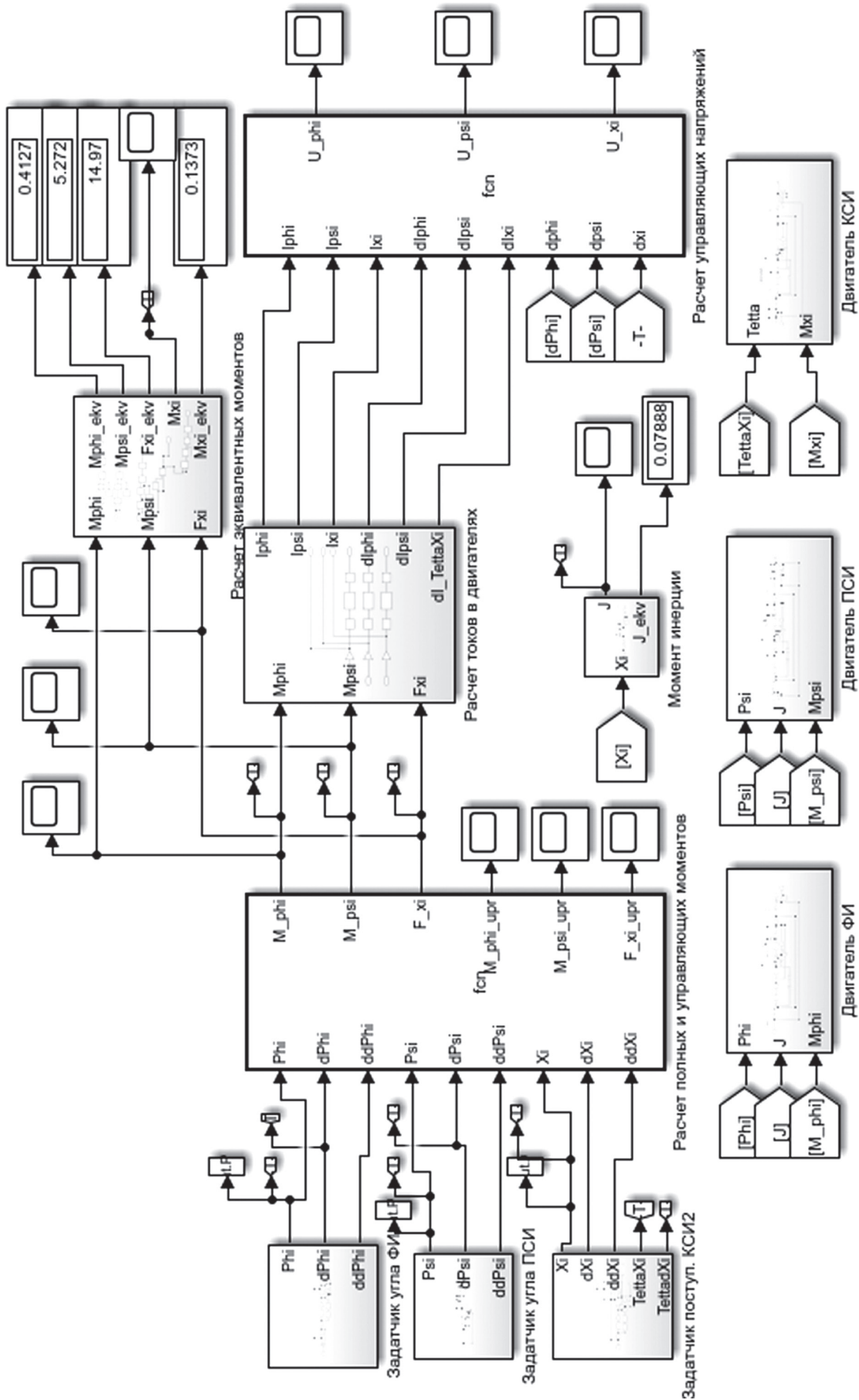


Рис. 2. Модель расчета антропоморфной системы в Matlab

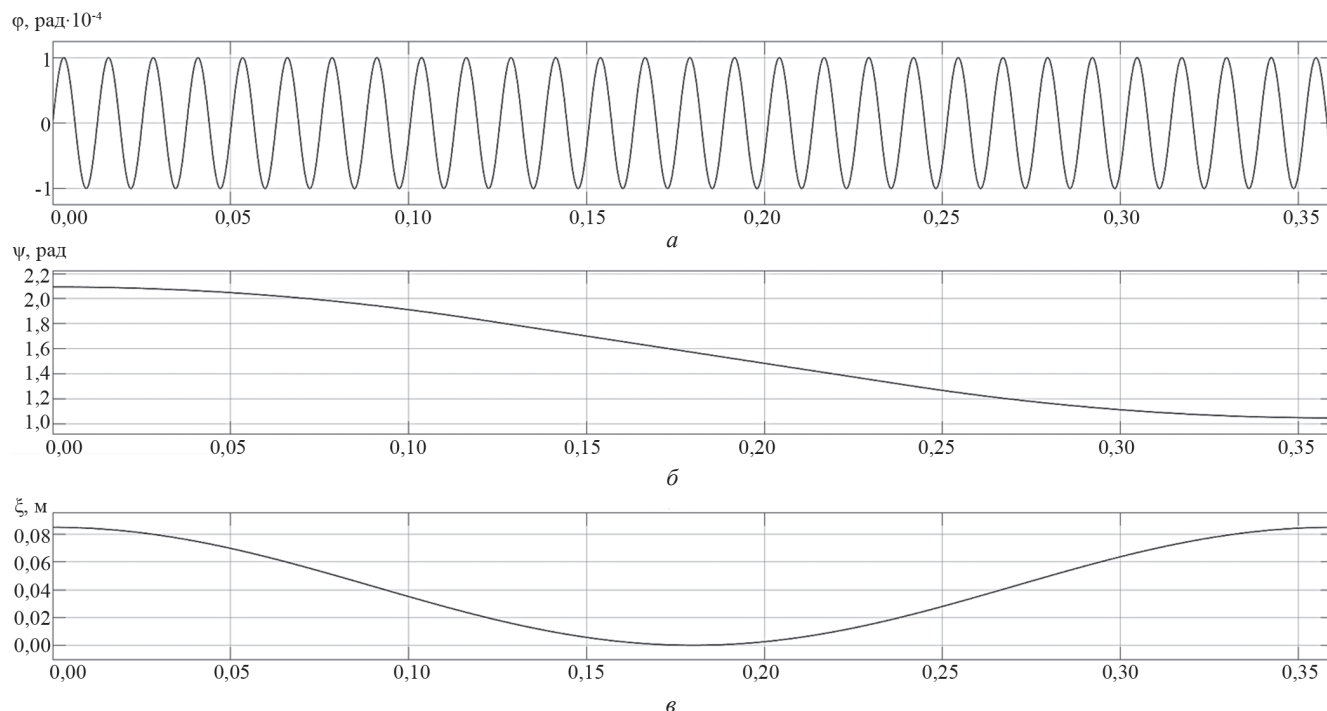


Рис. 3. Траектории движения для координат φ (a), ψ (δ), ξ (ϵ)

стемы, получены нагрузочные диаграммы механизма (рис. 4). Подобраны двигатели, редукторы и реечная передача. На рисунке 5 изображены диаграммы управляющих напряжений, полученные по уравнениям Лагранжа–Максвелла. Все выбранные двигатели имеют достаточный запас по напряжению, что особенно важно при построении замкнутой системы управления.

Для двигателя координаты φ стоит задача стабилизации положения системы при возмущающем мо-

менте нагрузки. На рисунке 6 дана траектория вала редуктора координаты φ . Видно, что амплитуда колебаний траектории меньше, чем у траектории, синтезированной ранее. Колебания траектории тем больше, чем больше момент нагрузки. Снизить влияние момента нагрузки можно путем синтеза двухконтурной системы управления, однако такая система будет менее быстродействующей. Также можно создать комбинированную систему управления по возмущаю-

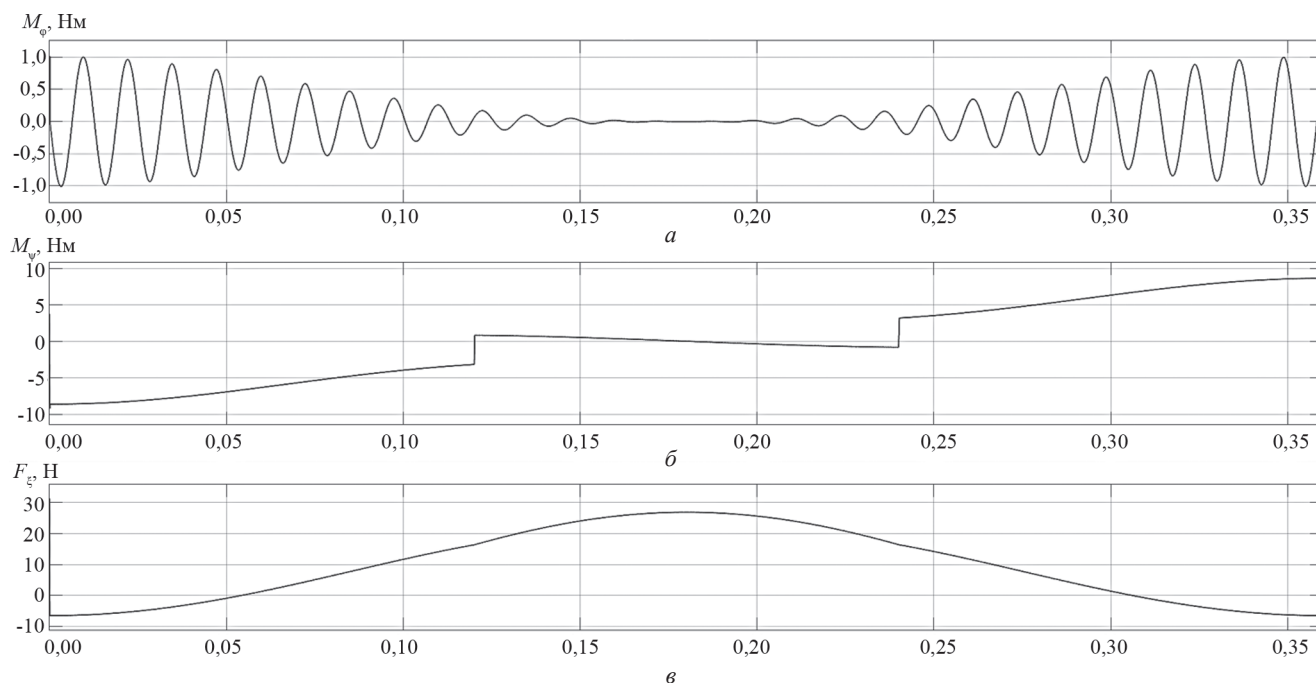
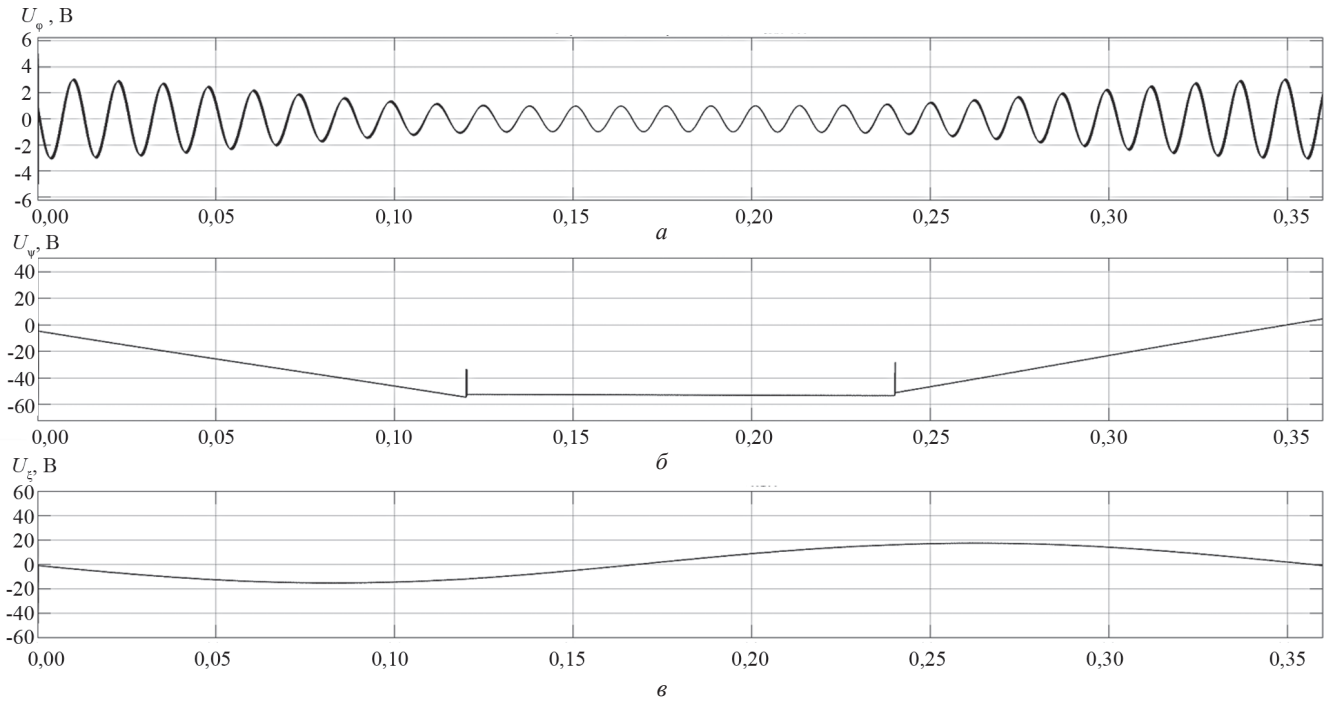
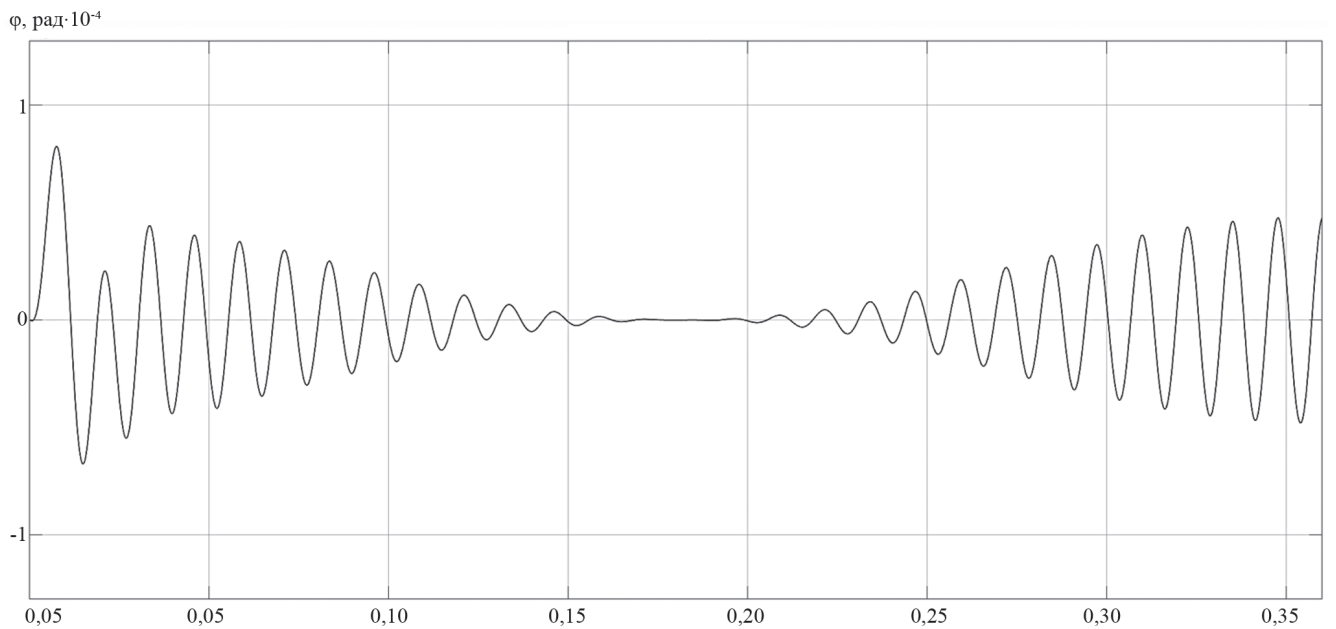


Рис. 4. Нагрузочные диаграммы механизма M_φ (a), M_ψ (δ), F_ξ (ϵ)

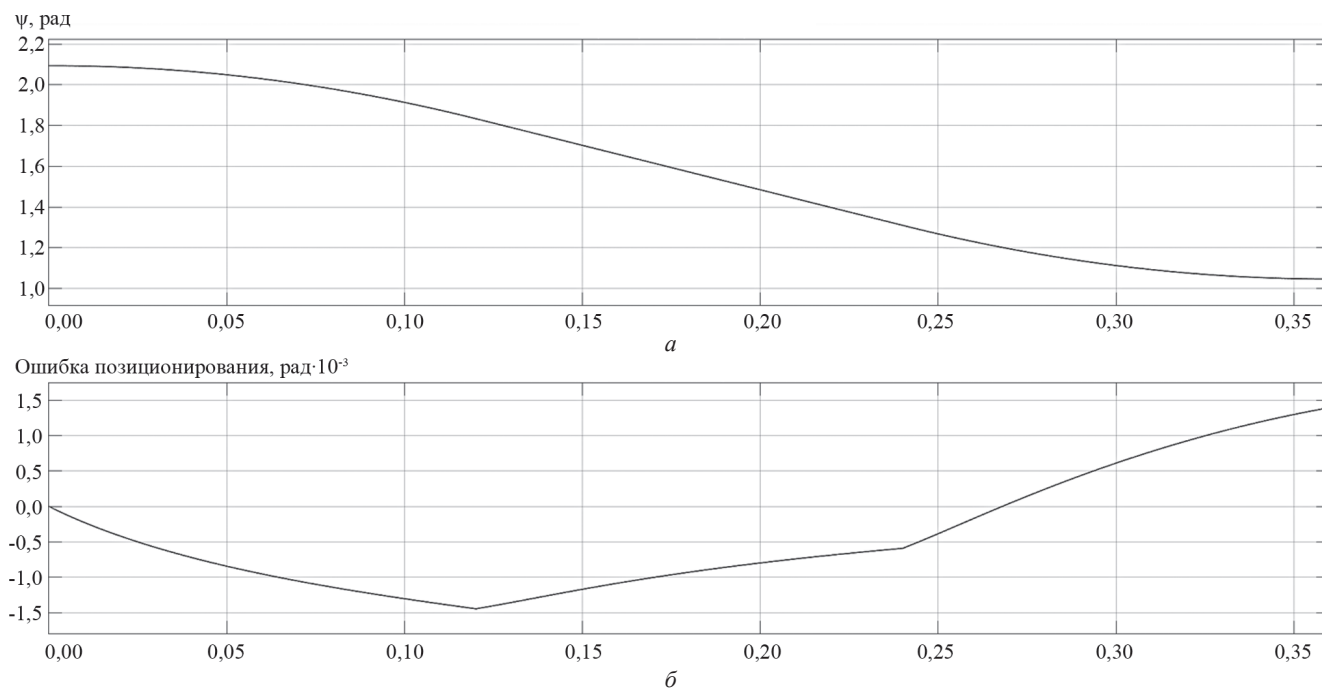
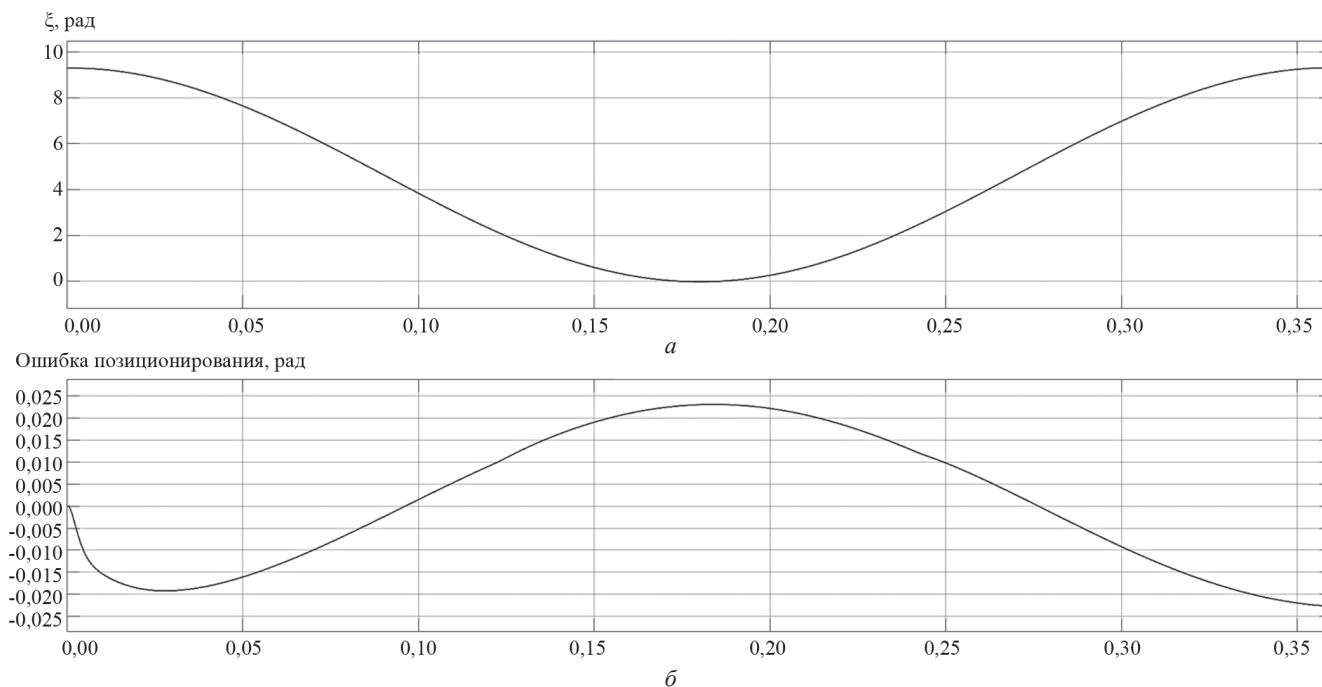
Рис. 5. Управляющие напряжения для двигателей $U_\varphi(a)$, $U_\psi(b)$, $U_\xi(v)$ Рис. 6. Траектория вала редуктора координаты φ

щему воздействию, которая сведет влияние момента нагрузки к минимуму.

Для двигателя координаты ψ следует синтезировать систему управления, которая будет точно обрабатывать заданную траекторию с допустимой ошибкой. На рисунке 7 представлены траектория движения координаты ψ и ошибка позиционирования. На участках разгона и торможения ошибка увеличивается по абсолютному значению, т. к. синтезированная одноконтурная система с ПИД-регулятором имеет астатизм первого порядка по возмущению. При увеличении

момента нагрузки ошибка будет больше. Кроме того, момент инерции для координаты ψ , так же, как и для φ , носит переменный характер, это тоже дает погрешность в обработке траектории. Ошибку от изменения момента инерции можно уменьшить, создав адаптивную систему управления с переменными коэффициентами ПИД-регулятора.

Для координаты ξ синтезирована следящая система управления, однако заданная траектория более сложная, чем для ψ . Также возмущающее воздействие нагрузки оказывает сильное влияние на ошибку по-

Рис. 7. Траектория вала редуктора координаты ψ (a) и ошибка позиционированияРис. 8. Траектория редуктора координаты ξ (a) и ошибка позиционирования (b) (поступательное движение приведено к вращательному движению вала редуктора)

позиционирования. В данной системе управления хорошим вариантом будет применение комбинированного управления по возмущающему и управляющему воздействиям.

Следует отметить, что для всех систем синтезирована одинаковая по структуре одноконтурная система управления с ПИД-регулятором положения и отсечкой по току. Расчет коэффициентов выполнен автоматизировано в Control Systems Toolbox. В антропоморфной

системе наименее точное регулирование обеспечивалось двигателем координаты ξ , что связано с высокими динамическими нагрузками и тем, насколько выражена нелинейность заданной траектории. Для привода координаты ψ моменты нагрузки по абсолютному значению имеют наибольшие значения, однако система обрабатывает траекторию лучше, поскольку задание положения имеет второй порядок, а у динамических моментов нагрузки относительно небольшие значения.

Заключение

Создана электромеханическая модель звена переменной длины с параметрами, соответствующими голени среднестатистического человека. Подобраны электроприводы и передачи, позволяющие реализовать

движение, близкое к антропоморфному. Модель может использоваться при создании телескопических манипуляторов, антропоморфных роботов, экзоскелетов и для изучения опорно-двигательного аппарата человека.

Литература

References

1. **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.
2. **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. Серия «Теория и системы управления». 2018. № 2. С. 148—174.
3. **Борисов А.В., Розенблат Г.М.** Динамика механических стержневых систем со звеньями переменной длины применительно к эндо-, экзоскелетам и антропоморфным роботам на плоскости и в пространстве // Справочник. Инженерный журнал. 2019. № 10. С. 1—20; № 11. С. 1—20.
4. **Пат. № 2565101 РФ.** Экзоскелет с электропневматической системой управления / А.В. Месропян, А.Т. Оразов, Р.Л. Коновалов // Бюл. изобрет. 2015. № 29.
5. **Darpa** [Официальный сайт] www.darpa.com (дата обращения 26.07.2020).
6. **Ekso Bionics** [Официальный сайт] www.eksobionics.com (дата обращения 26.07.2020).
7. **Berkeley Robotics & Human Engineering Laboratory** [Официальный сайт] www.bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton (дата обращения 26.07.2020).
8. **Kazerooni H.** Exoskeletons for Human Power Augmentation // Proc. IEEE IRS/RSJ Intern. Conf. Intelligent Robots and Systems. 2005. Pp. 3120—3125.
9. **ReWalk Robotics** [Официальный сайт] www.rewalk.com (дата обращения 26.07.2020).
10. **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 Trans. Neural Systems and Rehabilitation Eng. 2015. V. 23. No. 2. Pp. 308—318.
11. **Hassan M., Kadone H., Suzuki K., Sankai Y.** Exoskeleton Robot Control Based on Cane and Body Joint Synergies // Proc. XXV IEEE/RSJ Intern. Conf. Robotics and Intelligent Systems. 2012. Pp. 1609—1614.
12. **Honda** [Официальный сайт] www.corporate.honda.com/innovation/walk-assist (дата обращения 26.07.2020).
13. **Rex Bionics** [Официальный сайт] www.rexbionics.com (дата обращения 26.07.2020).

1. **Borisov A.V., Rozenblat G.M.** Matrichnyy Metod Sostavleniya Differentsial'nykh Uravneniy Dvizheniya Ekzoskeleta i Upravlenie Im. Prikladnaya Matematika i Mekhanika. 2017;81;5:511—522. (in Russian).
2. **Borisov A.V., Rozenblat G.M.** Modelirovaniye Dinamiki Ekzoskeleta s Upravlyaemyimi Momentami v Sustavakh i Peremennoy Dlinoy Zven'ev s Ispol'zovaniem Rekurrentnogo Metoda Sostavleniya Differentsial'nykh Uravneniy Dvizheniya. Izvestiya RAN. Seriya «Teoriya i Sistemy Upravleniya». 2018;2:148—174. (in Russian).
3. **Borisov A.V., Rozenblat G.M.** Dinamika Mekhanicheskikh Sterzhnevyykh Sistem so Zven'yami Peremennoy Dliny Primenitel'no k Endo-, Ekzoskeletam i Antropomorfnyim Robotam na Ploskosti i v Prostranstve. Spravochnik. Inzhenernyy Zhurnal. 2019;10:1—20; 11:1—20. (in Russian).
4. **Pat. № 2565101 RF.** Ekzoskelet s Elektropnevmaticheskoy Sistemoy Upravleniya. A.V. Mesropyan, A.T. Orazov, R.L. Konovalov. Byul. izobret. 2015;29. (in Russian).
5. **Darpa** [Ofits. Sayt] www.darpa.com (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
6. **Ekso Bionics** [Ofits. Sayt] www.eksobionics.com (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
7. **Berkeley Robotics & Human Engineering Laboratory** [Ofits. Sayt] www.bleex.me.berkeley.edu/research/exoskeleton (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
8. **Kazerooni H.** Exoskeletons for Human Power Augmentation. Proc. IEEE IRS/RSJ Intern. Conf. Intelligent Robots and Systems. 2005;3120—3125.
9. **ReWalk Robotics** [Ofits. Sayt] www.rewalk.com (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
10. **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 Trans. Neural Systems and Rehabilitation Eng. 2015;23;2:308—318.
11. **Hassan M., Kadone H., Suzuki K., Sankai Y.** Exoskeleton Robot Control Based on Cane and Body Joint Synergies. Proc. XXV IEEE/RSJ Intern. Conf. Robotics and Intelligent Systems. 2012;1609—1614.
12. **Honda** [Ofits. Sayt] www.corporate.honda.com/innovation/walk-assist (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
13. **Rex Bionics** [Ofits. Sayt] www.rexbionics.com (Data Obrashcheniya 26.07.2020).

14. **Bortole M. e. a.** A robotic Exoskeleton for Overground Gait Rehabilitation // Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. 2013. Pp. 3356—3361.
15. **Gupta V., Chaudhary H., Saha S.K.** Dynamics and Actuating Torque Optimization of Planar Robots // J. Mechanical Sci. and Technol. 2015. V. 29. Pp. 2699—2704.
16. **Ноккома** [Официальный сайт] www.hocoma.com/solutions/lokomat (дата обращения 26.07.2020).
17. **Тихоплав О.А., Иванова В.В., Гурьянова Е.А., Иванов И.Н.** Эффективность роботизированной механотерапии комплекса «Lokomat Pro» у пациентов, перенёвших инсульт // Вестник восстановительной медицины. 2019. № 5(93). С. 57—64.
18. **Павловский В.Е. и др.** Биомехатронный комплекс нейрореабилитации – концепция, конструкция, модели и управление // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. № 111. С. 1—21.
19. **Алисейчик А.П. и др.** Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // Материалы XI Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань: Изд-во АН Республики Татарстан, 2015. С. 132—134.
20. **Karfidov Lab** [Официальный сайт] www.karfidovlab.com/projects/exochair (дата обращения 26.07.2020).
21. **Лавровский Э.К., Письменная Е.В.** Алгоритмы управления экзоскелетом нижних конечностей в режиме одноопорной ходьбы по ровной и ступенчатой поверхностям // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2014. № 1. С. 44—51.
22. **Лавровский Э.К., Письменная Е.В.** Алгоритм управления, обеспечивающий задание произвольных траекторий экзоскелета нижних конечностей // Сб. трудов XII Всерос. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Изд-во Башкирского гос. ун-та, 2019. Т. 1. С. 218—219.
23. **ExoAtlet** [Официальный сайт] www.exoatlet.com (дата обращения 26.07.2020).
24. **Яцун С.Ф. и др.** Подъем груза в экзоскелете с гравитационной компенсацией // Известия Юго-Западного гос. ун-та. 2019. Т. 23. № 2. С. 8—17.
25. **Яцун С.Ф., Антипов В.М., Карлов А.Е.** Моделирование подъема груза с помощью промышленного экзоскелета. // Известия Юго-Западного гос. ун-та. 2018. Т. 22. № 6 (81). С. 14—20.
26. **Пат. № 190786 РФ.** Пассивный грузовой экзоскелет / С.Ф. Яцун, В.Я. Мищенко, А.С. Яцун // Бюл. изобрет. 2019. № 20.
27. **Пат. № 189145 РФ.** Стопа экзоскелета // С.Ф. Яцун и др. // Бюл. изобрет. 2018. № 14.
28. **Maxon** [Официальный сайт] www.maxongroup.com/maxon/view/content/index (дата обращения 26.07.2020).
14. **Bortole M. e. a.** A robotic Exoskeleton for Overground Gait Rehabilitation. Proc. IEEE Intern. Conf. Robotics and Automation. 2013:3356—3361.
15. **Gupta V., Chaudhary H., Saha S.K.** Dynamics and Actuating Torque Optimization of Planar Robots. J. Mechanical Sci. and Technol. 2015;29:2699—2704.
16. **Hocoma** [Official Site] www.hocoma.com/solutions/lokomat (Data Obrashcheniya 26.07.2020).
17. **Tikhoplav O.A., Ivanova V.V., Gur'yanova E.A., Ivanov I.N.** Effektivnost' Robotizirovannoy Mekhanoterapii Kompleksa «Lokomat Pro» u Patsientov, Pereneshikh Insul't. Vestnik Vosstanovitel'noy Meditsiny. 2019;5(93): 57—64. (in Russian).
18. **Pavlovskiy V.E. i dr.** Biomekhatronnyy Kompleks Neyrореабилитatsii – Kontseptsiya, Konstruktsiya, Modeli i Upravlenie. Preprinty IPM im. M.V.Keldysha. 2014;111:1—21. (in Russian).
19. **Aliseychik A.P. i dr.** Mekhanika i Upravlenie Ekzoskeletami Nizhnikh Konechnostey dlya Neyrореабилитatsii Spinal'nykh Bol'nykh. Materialy XI Vseros. S'ezda po Fundamental'nym Problemam Teoreticheskoy i Prikladnoy Mekhaniki. Kazan': Izd-vo AN Respubliki Tatarstan, 2015:132—134. (in Russian).
20. **Karfidov Lab** [Official Site] www.karfidovlab.com/projects/exochair (Data Obrashcheniya 26.07.2020). (in Russian).
21. **Lavrovskiy E.K., Pis'mennaya E.V.** Algoritmy Upravleniya Ekzoskeletom Nizhnikh Konechnostey v Rezhime Odnopornoy Khod'by po Rovnoy i Stupenchatoy Poverkhnostyam. Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie. 2014;1:44—51. (in Russian).
22. **Lavrovskiy E.K., Pis'mennaya E.V.** Algoritm Upravleniya, Obespechivayushchiy Zadanie Proizvol'nykh Traektoriy Ekzoskeleta Nizhnikh Konechnostey. Sb. Trudov XII Vseros. S'ezda po Fundamental'nym Problemam Teoreticheskoy i Prikladnoy Mekhaniki. Izd-vo Bashkirskogo Gos. Un-ta, 2019;1:218—219. (in Russian).
23. **ExoAtlet** [Official Site] www.exoatlet.com (Data Obrashcheniya 26.07.2020). (in Russian).
24. **Yatsun S.F. i dr.** Pod'em Gruza v Ekzoskelete s Gravitatsionnoy Kompensatsiey. Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gos. Un-ta. 2019;23;2:8—17. (in Russian).
25. **Yatsun S.F., Antipov V.M., Karlov A.E.** Modelirovanie Pod'ema Gruza s Pomoshch'yu Promyshlennogo Ekzoskeleta. Izvestiya Yugo-Zapadnogo Gos. Un-ta. 2018;22;6 (81):14—20. (in Russian).
26. **Pat. № 190786 RF.** Passivnyy Gruzovoy Ekzoskeleton. S.F. Yatsun, V.Ya. Mishchenko, A.S. Yatsun. Byul. Izobret. 2019;20. (in Russian).
27. **Pat. № 189145 RF.** Stopa Ekzoskeleta. S.F. Yatsun i dr. Byul. Izobret. 2018;14. (in Russian).
28. **Maxon** [Official Site] www.maxongroup.com/maxon/view/content/index (Data Obrashcheniya 26.07.2020).

Сведения об авторах:

Борисов Андрей Валерьевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Смоленского филиала МЭИ, e-mail: BorisowAndrej@yandex.ru

Филиппенков Константин Дмитриевич — магистрант кафедры электромеханических систем Смоленского филиала МЭИ, e-mail: colonel.engineer@yandex.ru

Information about authors:

Borisov Andrey V. — Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of Higher Mathematics Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: BorisowAndrej@yandex.ru

Filippenkov Konstantin D. — Master's Degree of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: colonel.engineer@yandex.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ и Смоленской области (проект № 19-48-670002)

The work is executed at support: RFBR and the Smolensk Region (Project No. 19-48-670002)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 28.08.2020

The article received to the editor: 28.08.2020