

Модель киберфизической системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями

К.С. Маслова^{1*}, А.М. Соколов²

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

*maslowaksusha1@yandex.ru

Аннотация. При рассмотрении движения статически неустойчивых объектов, примером которого является киберфизическая система в виде экзоскелетного семизвенного механизма, значительную роль играет решение проблемы сцепления с опорной поверхностью при ходьбе антропоида, поскольку в процессе движения условия эксплуатации меняются: чередуются фазы ходьбы, изменяются характеристики опорной поверхности, действуют внешние возмущения. Для повышения устойчивости движения и обеспечения отсутствия проскальзывания необходимо принимать во внимание особенности движения стоп, поэтому наличие весомых инерционных стоп обеспечивает новизну и актуальность предложенной модели. В работе представлена модель киберфизической системы экзоскелетного механизма, движущаяся в вертикальной плоскости и создающая предпосылки для реализации ситуационного подхода к управлению движением. Модель включает семь подвижных звеньев, соединенных шарнирами, что обеспечивает максимальное приближение модели к реальному экзоскелету. Целью исследования является разработка и описание алгоритмов проектирования управления движением экзоскелетного механизма программным методом с учетом ситуационных параметров, с применением ранее разработанного метода управления роботизированным антропоидным механизмом в виде программных движений. Апробирование разработанных алгоритмов проводилось в среде Wolfram Mathematica с использованием инструментов математического моделирования, численных методов и визуализации. В ходе исследования разработана модель экзоскелетного механизма, который совершает движение в вертикальной плоскости. Механизм включает семь звеньев, в том числе подвижные весомые стопы. Для описания разработанной модели используются значения углов поворота, которые образуются между подвижными звеньями. Для составления системы дифференциальных уравнений используются матрицы поворота осей координат, этим обуславливается оригинальность предложенной модели. Разработана математическая модель представленного звена экзоскелетного механизма и алгоритмы решения прямой и обратной задач динамики для нее. Создана подпрограмма для визуализации движения, которая позволяет демонстрировать процесс движения рассматриваемой модели в соответствии с заданными функциями. Показана необходимость учета ситуационных параметров при эксплуатации экзоскелета. Описана актуальность применения методов нечеткой логики, нейронных сетей для оптимизации моделирования при адаптации к условиям неопределенности окружающей среды.

Ключевые слова: алгоритмы проектирования, программы управления движением, модель экзоскелетного механизма, программный метод, программа визуализации движения, ситуационное управление, численные методы, киберфизическая система, весомые стопы, семь подвижных звеньев

Для цитирования: Маслова К.С., Соколов А.М. Модель киберфизической системы экзоскелетного механизма с семью подвижными звеньями // Прикладная информатика. 2026. Т. 21. № 3. С. 65–86. DOI: 10.37791/2687-0649-2026-21-3-65-86.

© Маслова К.С., Соколов А.М., 2026.

A model of a cyber-physical system of an exoskeletal mechanism consisting of seven movable links

K. Maslova^{1*}, A. Sokolov²

¹National Research University "MPEI", Moscow, Russia

²Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia
*maslowaksusha1@yandex.ru

Abstract. When considering the motion of statically unstable objects, such as a cyberphysical system in the form of a seven-link exoskeleton mechanism, the problem of adhesion to the supporting surface plays a significant role during anthropoid walking. This is because operating conditions change during movement: gait phases alternate, the characteristics of the supporting surface change, and external disturbances occur. To improve stability and prevent slippage, it is necessary to consider the characteristics of foot motion. Therefore, the presence of weighty inertial feet ensures the novelty and relevance of the proposed model. This paper presents a model of a cyber-physical system for an exoskeleton mechanism moving in a vertical plane and creating the prerequisites for implementing a situational approach to movement control. The model includes seven moving links connected by hinges, ensuring the maximum approximation of the model to a real exoskeleton. The objective of the study is to develop and describe algorithms for designing motion control for an exoskeleton mechanism using a software method, taking into account situational parameters, applying a previously developed method for controlling a robotic anthropoid mechanism in the form of programmable movements. The testing of the developed algorithms was carried out in the Wolfram Mathematica environment using mathematical modeling tools, numerical methods and visualization. In the course of the work, a model of an exoskeletal mechanism with seven movable links was developed, including weighty feet moving in a vertical plane. The originality of the development lies in the use of angles between the links when describing the model and the use of rotation matrices of the coordinate axes when composing a system of differential equations. A mathematical model of the presented link of the exoskeletal mechanism and algorithms for solving direct and inverse dynamics problems for it have been developed. A motion visualization routine has been created that allows you to demonstrate the motion process of the model in question in accordance with the specified functions. The necessity of taking into account situational parameters when using an exoskeleton is shown. The relevance of using fuzzy logic methods and neural networks to optimize modeling while adapting to environmental uncertainty is described.

Keywords: design algorithms, motion control programs, model of an exoskeletal mechanism, software method, motion visualization program, situational management, numerical methods, cyberphysical system, weighty feet, seven movable links

For citation: Maslova, K., & Sokolov, A. (2026). A model of a cyber-physical system of an exoskeletal mechanism consisting of seven movable links. *Journal of Applied Informatics*, 21(3), 65–86. <https://doi.org/10.37791/2687-0649-2026-21-3-65-86>

© Maslova K., Sokolov A., 2026.