

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ СЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОТЕЗА СТОПЫ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Белосельский П.Д., Грачёв Д.А., Казаринова А.С., Сибирцев Н.А., Астахов С.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

Ключевые слова: обратная связь, протез стопы, серводвигатель, вибромотор, тензодатчик, инструментальный усилитель.

Аннотация. В рамках данной работы исследуется способ передачи сенсорной информации от протеза стопы к пациенту. Разработана система передачи сенсорной обратной связи, преобразующая механическое воздействие на протез в тактильные сигналы, передаваемые пациенту. Создана принципиальная схема управления, включающая инструментальный усилитель на базе LM324, тензодатчик, серводвигатель. Для устранения акустических шумов, выявленных в ходе первичных экспериментов, серводвигатель был заменен на вибромотор. Проведены эксперименты по изменению уровня сигнала, подаваемого на вибромотор, при варьировании силы механического воздействия на тензодатчик. Установлена линейная зависимость между выходным сигналом тензодатчика и величиной механической нагрузки. Зафиксированное в ходе исследования время отклика системы 20 мкс свидетельствует о высоком быстродействии разработанной системы. Предложенный метод обеспечивает эффективную адаптацию пациентов к протезу за счет тактильной обратной связи. Разработанная система передачи сенсорной информации по обратной связи может быть использована при создании адаптивных протезных систем с тактильной обратной связью.

DEVELOPMENT OF A SENSORY INFORMATION TRANSMISSION SYSTEM FOR A FOOT PROSTHESIS WITH FEEDBACK

Beloselsky P.D., Grachev D.A., Kazarinova A.S., Sibirtsev N.A., Astakhov S.V.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

Keywords: feedback, prosthesis foot, servomotor, vibration motor, strain gage, instrumental amplifier.

Abstract. This work investigates a method for transmitting sensory information from a foot prosthesis to a patient. A sensory feedback transmission system has been developed that converts mechanical action on the prosthesis into tactile signals transmitted to the patient. A control circuit diagram has been created that includes an instrumentation amplifier based on LM324, a strain gauge, and a servomotor. To eliminate acoustic noise detected during the initial experiments, the servomotor was replaced with a vibration motor. Experiments were conducted to change the signal level supplied to the vibration motor while varying the force of mechanical action on the strain gauge. A linear relationship was established between the output signal of the strain gauge and the magnitude of the mechanical load. The system response time of 20 μ s recorded during the study indicates the high response speed of the developed system. The proposed method ensures effective patient adaptation to the prosthesis due to tactile feedback. The developed system for transmitting sensory information via feedback can be used to create adaptive prosthetic systems with tactile feedback.

Введение

В современном мире область протезирования конечностей стремительно меняется под влиянием технологического прогресса. Внедрение новых методов восстановления утраченных конечностей способно улучшить адаптацию пользователей к двигательным способностям.

Современные пассивные протезы стопы обладают надежностью, но, несмотря на это, не способны обеспечить естественность движений, что увеличивает энергозатраты при ходьбе и снижает мобильность. Внедрение обратной связи в роботизированных элементах позволяет расширить их функционал и улучшить качество жизни пациентов с ампутациями конечностей.

В статье [1] обсуждается один из способов решения проблемы чувствительности – внедрение сенсорной обратной связи, позволяющей роботизированному протезу адаптироваться к изменяющимся условиям. Результаты экспериментов показывают, что после ходьбы по земле сенсорная обратная связь позволила на 23% снизить субъективное восприятие веса протеза пользователем по сравнению со случаем отсутствия обратной связи.

В работе [2] предложен алгоритм распознавания режима локомоции, основанный на адаптивных динамических базовых моделях движения.

В статье [3] разработана вибротактильная стелька, которая вибрирует в зависимости от силы, регистрируемой на пальцах протеза. Проведено исследование по оценке эффективности тактильной обратной связи для миоэлектрических протезов кисти. Результаты эксперимента показали, что управление протезом с вибротактильной обратной связью дают значительный положительный эффект при реабилитации пациентов.

В исследовании [4] обсуждается использование аддитивного производства и виртуальной реальности при разработке протезов для улучшения качества жизни пациентов. В предлагаемом алгоритме применяется визуальная обратная связь в режиме реального времени, что позволяет улучшить синхронизацию и силу мышечных сокращений.

В работе [5] рассматриваются современные миоэлектрические протезы верхних конечностей. Разработан программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий обратную связь для миоэлектрического протеза, с использованием тактильных сигналов, полученных с пленочных тензорезисторов.

В статье [6] обсуждается применение искусственного интеллекта и нейронных сетей в системах биологической обратной связи для реабилитации пациентов с ампутациями. Рассмотрены искусственные нейроны и нейросети, способные анализировать физиологические данные и адаптировать терапию под индивидуальные особенности пациентов.

В работе [7] рассматривается проблема отсутствия естественной сенсорной обратной связи в протезах конечностей. Анализируются нейротехнологические подходы для восстановления тактильных и проприоцептивных ощущений. Проведены исследования, демонстрирующие улучшение качества реабилитации пациентов при использовании нейропротезов.

В исследовании [8] обсуждается разработка нейроинтегрированных бионических систем. Рассматриваются алгоритмы распознавания намерений на основе электромиографии (ЭМГ), инерциальных датчиков и машинного обучения. В статье [9] обсуждаются методы управления протезами нижних конечностей на основе ЭМГ.

В статье [10] обсуждаются методы управления протезами нижних конечностей в сочетании автоматической настройки параметров протеза с визуальной обратной связью для контроля времени опоры, что позволяет пациенту достичь более естественной походки.

В статье [11] рассматривается система визуальной обратной связи для увеличения минимального зазора между стопой и землей (minimum Toe Clearance) у пациентов с трансфеморальной ампутацией, использующих пассивные протезы. Проведено исследование, в ходе которого пользователи изменяли положение центра давления (CoP) вдоль саггитальной плоскости с помощью визуальной обратной связи, проецируемой на экран. Результаты экспериментов подтвердили эффективность использования обратной связи в протезах.

В статье [12] обсуждается влияние протезов нижних конечностей на жизнь людей. Разработана адаптивная система управления бионическим протезом нижней конечности, основанная на анализе ЭМГ сигналов и биомеханических параметров ходьбы. Конструкция протеза реализует принцип перевернутого маятника с электроприводами коленного и голеностопного модулей.

В статье [13] рассматривается влияние смещения центра давления в момент касания пяткой на изменение углов поворота суставов в фазе переноса у здоровых людей и пациентов с ампутациями. Разработана система визуальной обратной связи в реальном времени, позволяющая участникам контролировать положение центра давления при ходьбе на беговой дорожке.

В статье [14] обсуждаются системы управления протезами нижних конечностей с обратной связью. Разработана система тактильной обратной связи HapticLink для улучшения баланса и восприятия протеза за счет передачи информации о распределении нагрузки на

стопу. Система включает четыре датчика силы, микроконтроллер и четыре вибрационных мотора, передающих информацию о нагрузке в режиме реального времени. Выполнена количественная оценка эффективности тактильной обратной связи посредством определения точности пространственной локализации сигналов – 94,44% и анализа восприятия частотных характеристик вибрационного воздействия – 79,17%.

В статье [15] обсуждаются оптимальные методы управления протезами нижних конечностей. Предложена стратегия управления в пространстве обобщённых координат для активного протеза голеностопного сустава.

Целью данной работы является исследование метода передачи сенсорной информации от протеза стопы к пациенту с целью улучшения процесса реабилитации. Для достижения цели была поставлена задача разработка системы передачи сенсорной обратной связи, включающей тензодатчик, инструментальный усилитель и вибромотор.

Материалы и методы исследований. Предлагаемый механизм передачи сенсорной информации пациенту с протезом стопы включает тензометрический датчик, сервомотор и управляющую плату Arduino Nano.

В ходе первичного эксперимента была выполнена обработка сигналов с тензодатчика, реализовано программное обеспечение в среде Arduino IDE с применением библиотеки HX711 и выявлен недостаток такого состава компонент механизма, заключающийся в появлении акустических шумов, вызванных механической работой сервопривода. Для преодоления скоростных ограничений аналого-цифрового преобразователя (АЦП) HX711 внедрен усилитель.

Для устранения недостатка сервопривод был заменен на вибромотор. Результирующий состав компонент механизма представлен на рисунке 1.

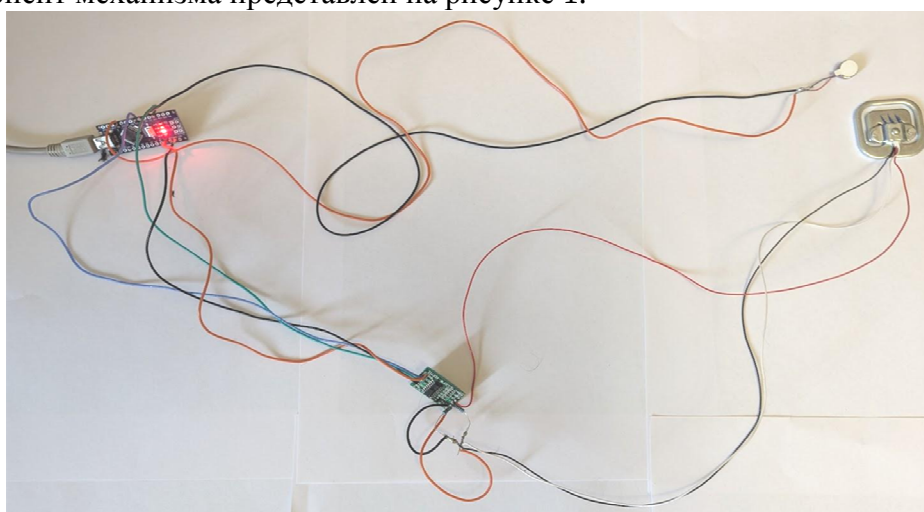
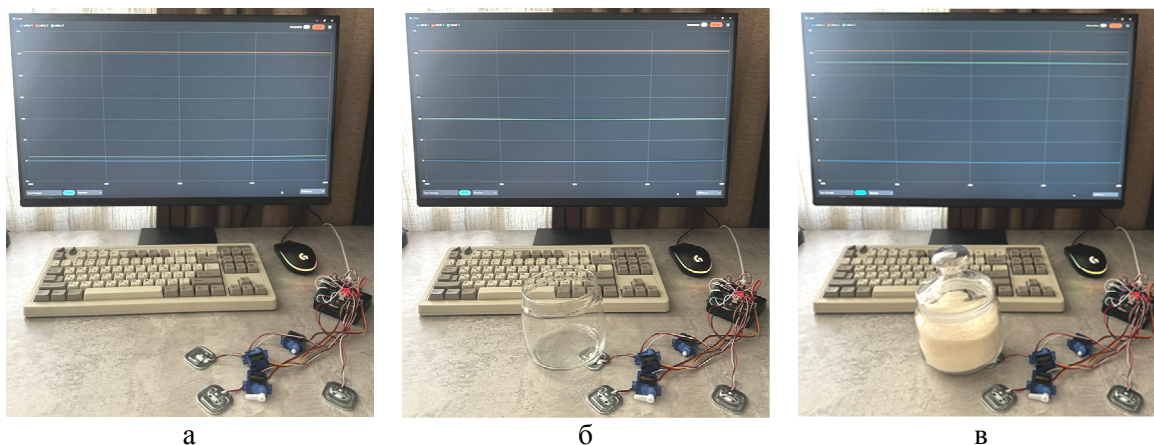


Рис. 1. Механизм передачи сенсорной информации

Для демонстрации работы механизма передачи сенсорной информации был проведен эксперимент, включающий три ключевых состояния механической нагрузки на тензодатчик: отсутствие воздействия, среднее воздействие (случай, когда человек опирается на две ноги) и максимальное воздействие (случай, когда человек опирается на ногу с протезом) при массе 100 кг.

Результаты. На экране компьютера, отслеживающего сигналы в частях системы, отображаются значения напряжения, соответствующие уровню механического воздействия, что позволяет визуализировать реакцию системы на изменение нагрузки. На рисунке 2 изображены состояния системы в положении отсутствия воздействия на тензодатчик, среднего воздействия на тензодатчик и сильного воздействия на тензодатчик.

На рисунке 3 отображены временные зависимости измеренного уровня сигнала с тензодатчика (в шкале от 0 до 255) и напряжения подаваемого на вибромотор в виде ШИМ сигнала.



а

б

в

Рис. 2. Демонстрация работы механизма при различных воздействиях на тензодатчик: а) отсутствие воздействия, б) среднее воздействие, в) максимальное воздействие (минимальный сигнал ШИМ – красная линия; максимальный сигнал ШИМ – синяя линия; сигнал с тензодатчика – зеленая линия)

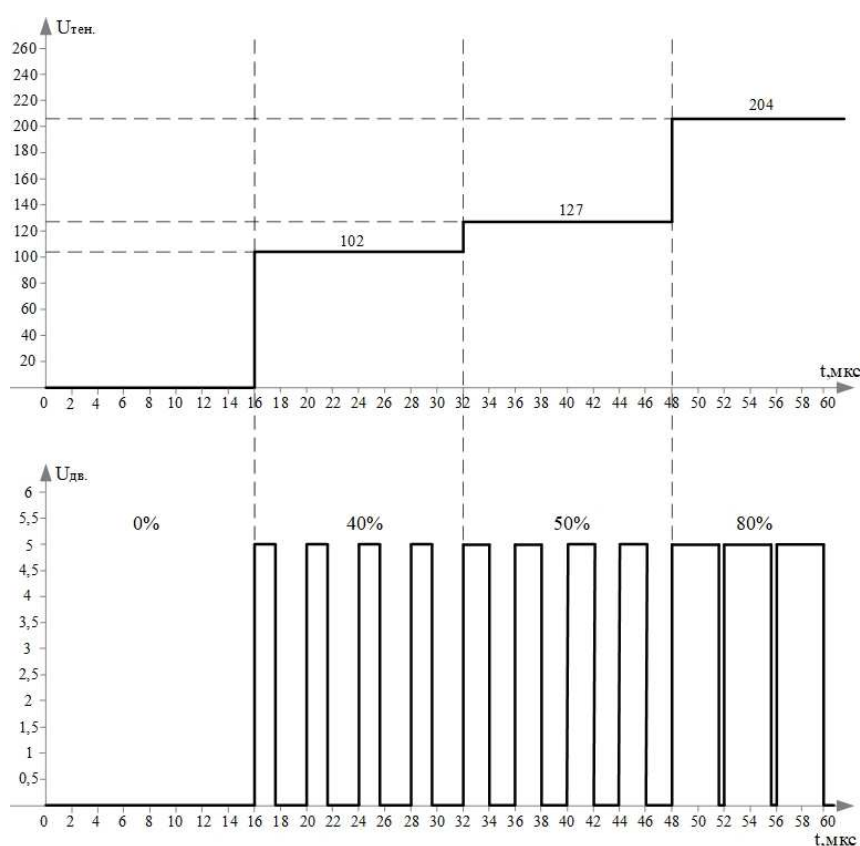


Рис. 3. График зависимости выходного напряжения тензодатчика и напряжения питания вибромотора (В) от времени

Случай отсутствия воздействия на тензодатчик соответствует отсутствию контакта с опорной поверхностью, когда происходит перенос протеза ноги. В качестве среднего уровня воздействия на тензодатчик задается уровень сигнала соответствующий силе, действующей на протез при стоянии человека на двух ногах. Случаю максимального воздействия на тензодатчик соответствует уровень сигнала, характеризующий силу, действующий на протез при стоянии человека на одной ноге.

На рисунке 3 изображена диаграмма управляющего ШИМ-сигнала, генерируемого микроконтроллером для регулирования работы вибромотора. Процентные значения (0%, 40%, 50%, 80%) соответствуют уровням механического воздействия относительно максимальной экспериментальной нагрузки. Сигнал обеспечивает пропорциональное управление интенсивностью вибротактильного отклика в соответствии с сенсорной обратной связью.

По результатам эксперимента наблюдается линейная зависимость выходного сигнала тензодатчика от механического воздействия, а время отклика системы составило 20 мкс.

Выводы. Замена серводвигателя на вибромотор в системе передачи сенсорной информации позволила устранить акустические шумы и повысить быстродействие системы в ходе проведения исследования. Экспериментально выявлена линейная зависимость сигнала тензодатчика от механической нагрузки. Полученное значение времени отклика системы управления свидетельствует о ее высоком быстродействии, необходимом управления протезом в режиме реального времени.

Заключение

В данной работе разработана система передачи сенсорной информации протеза стопы с обратной связью, включающая тензодатчик, инструментальный усилитель на основе LM324, микроконтроллер и вибромотор. Разработана принципиальная схема каскада усиления сигнала тензодатчика. Проведенное исследование подтверждает эффективность способа передачи обратной связи пациенту с протезом стопы.

Разработанная система обеспечивает высокую точность регистрации механического воздействия. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего развития систем управления протезов нижних конечностей с тактильной обратной связью.

Список литературы

1. Preaton G., Valle G., Petrini F.M. Lightening the Perceived Prosthesis Weight with Neural Embodiment Promoted by Sensory Feedback // *Current Biology*. 2021, vol. 31, pp. 1065-1071. DOI: 10.1016/j.cub.2020.11.069.
2. Eken H., Lanotte F., Papapicco V., Penna M.F., Gruppioni E., Trigili E., Crea S., Vitiello N. A Locomotion Mode Recognition Algorithm Using Adaptive Dynamic Movement Primitives // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2023, vol. 31, pp. 4318-4328. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3327751.
3. Morand R., Brusa T., Schnüriger N., Catanzaro S., Berli M., Koch V.M. FeetBack – redirecting touch sensation from a prosthetic hand to the human foot // *Frontiers in Neuroscience*. 2022, vol. 16, p. 1019880. DOI: 10.3389/fnins.2022.1019880.
4. Самман А., Шахнова В.А. Использование аддитивного производства и биологическая обратная связь при разработке протезов для улучшения результатов реабилитации // *Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы»*. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2022. – С. 211-214.
5. Туровский Я.А., Борзунов С.В., Крупенин С.С., МIRONKIN А.П., Токарев Р.А. Реализация системы обратной связи для миоэлектрических протезов верхней конечности // *Программная инженерия*. – 2025. – Т. 16, №1. – С. 39-46. – DOI: 10.17587/prin.16.39-46.
6. Кардаполова К.Г., Анянова Е.В. Применение нейронных сетей для систем с биологической обратной связью // *Материалы XV Международной научно-технической конференции «Современные тренды управления и цифровая экономика: от регионального развития к глобальному экономическому росту»*. – Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2024. – С. 476-484.
7. Raspopovic S., Valle G., Petrini F.M. Sensory feedback for limb prostheses in amputees // *Nature Materials*. 2021, vol. 20, pp. 925-939. DOI: 10.1038/s41563-021-00966-9.
8. Barberi F., Anselmino E., Mazzoni A., Goldfarb M., Micera S. Toward the Development of User-Centered Neurointegrated Lower Limb Prostheses // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2024, vol. 17, pp. 212-228. DOI: 10.1109/RBME.2023.3309328.
9. Cimolato A., Driessen J.J.M., Mattos L.S., De Momi E., Laffranchi M., De Michieli L. EMG-driven control in lower limb prostheses: a topic-based systematic review // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2022, vol. 19, no. 1, pp. 19-43. DOI: 10.1186/s12984-022-01019-1.
10. Fylstra B.L., Lee I.C., Li M., Lewek M.D., Huang H. Human-prosthesis cooperation: combining adaptive prosthesis control with visual feedback guided gait // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2022, vol. 19, p. 140. DOI: 10.1186/s12984-022-01118-z.
11. Tiwari A., Joshi D. Design and Validation of a Real-Time Visual Feedback System to Improve Minimum Toe Clearance (mTC) in Transfemoral Amputees // *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2021, vol. 29, pp. 1711-1722. DOI: 10.1109/TNSRE.2021.3105139.
12. Солодимова Г.А., Спиркин А.Н. Информационно-измерительная система бионического протеза нижней конечности // *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. – 2018. – №1(23). – С. 57-65.
13. Tiwari A., Kujur A., Kumar J., and Joshi D. Investigating the effect of Real-Time Center of pressure feedback training on the swing phase of lower limb kinematics in transfemoral prostheses with SACH foot // *Journal of Biomechanical Engineering*. 2022, vol. 144, no. 7, p. 071009. DOI: 10.1115/1.4053364.
14. Canton L.J.M., Gyllinsky J.V., Arredondo Z.A.A., Mankodiya K. HapticLink: A Force-based Haptic Feedback System for Single and Double Lower-Limb Amputees // *44th Annual International Conference of the IEEE*

Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). – Glasgow, Scotland, United Kingdom: IEEE, 2022. – P. 4226-4229. – DOI: 10.1109/EMBC48229.2022.9871460.

15. Kelly D.J., Posh R.R., Wensing P.M. Task-space Control of a Powered Ankle Prosthesis // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Yokohama, Japan: IEEE, 2024. – P. 3262-3268. – DOI: 10.1109/ICRA57147.2024.10611270.

References

1. Preaton G., Valle G., Petrini F.M. Lightening the Perceived Prosthesis Weight with Neural Embodiment Promoted by Sensory Feedback // Current Biology. 2021, vol. 31, pp. 1065-1071. DOI: 10.1016/j.cub.2020.11.069.
2. Eken H., Lanotte F., Papapicco V., Penna M.F., Gruppioni E., Trigili E., Crea S., Vitiello N. A Locomotion Mode Recognition Algorithm Using Adaptive Dynamic Movement Primitives // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2023, vol. 31, pp. 4318-4328. DOI: 10.1109/TNSRE.2023.3327751.
3. Morand R., Brusa T., Schnüriger N., Catanzaro S., Berli M., Koch V.M. FeetBack – redirecting touch sensation from a prosthetic hand to the human foot // Frontiers in Neuroscience. 2022, vol. 16, p. 1019880. DOI: 10.3389/fnins.2022.1019880.
4. Samman A., Shakhnov V.A. Using Additive Manufacturing and Biofeedback in Prosthetic Development to Improve Rehabilitation Outcomes // Proceedings of International Scientific and Technical Conference «Advanced Materials and Technologies». – Sevastopol: SevSU, 2022. – P. 211-214.
5. Turovsky Ya.A., Borzunov S.V., Krupenin S.S., Mironkin A.P., Tokarev R.A. Implementation of a Feedback System for Myoelectric Prostheses of the Upper Limb // Software Engineering. 2025, vol. 16, no. 1, pp. 39-46. DOI: 10.17587/prin.16.39-46.
6. Kardapolova K.G., Anyanova E.V. Application of neural networks for systems with biological feedback // Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Modern management trends and digital economy: from regional development to global economic growth». – Ekaterinburg: USFEU, 2024. – P. 476-484.
7. Raspopovic S., Valle G., Petrini F.M. Sensory feedback for limb prostheses in amputees // Nature Materials. 2021, vol. 20, pp. 925-939. DOI: 10.1038/s41563-021-00966-9.
8. Barberi F., Anselmino E., Mazzoni A., Goldfarb M., Micera S. Toward the Development of User-Centered Neurointegrated Lower Limb Prostheses // IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 2024, vol. 17, pp. 212-228. DOI: 10.1109/RBME.2023.3309328.
9. Cimolato A., Driessen J.J.M., Mattos L.S., De Momi E., Laffranchi M., De Michieli L. EMG-driven control in lower limb prostheses: a topic-based systematic review // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2022, vol. 19, no. 1, pp. 19-43. DOI: 10.1186/s12984-022-01019-1.
10. Fylstra B.L., Lee I.C., Li M., Lewek M.D., Huang H. Human-prosthesis cooperation: combining adaptive prosthesis control with visual feedback guided gait // Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation. 2022, vol. 19, p. 140. DOI: 10.1186/s12984-022-01118-z.
11. Tiwari A., Joshi D. Design and Validation of a Real-Time Visual Feedback System to Improve Minimum Toe Clearance (mTC) in Transfemoral Amputees // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2021, vol. 29, pp. 1711-1722. DOI: 10.1109/TNSRE.2021.3105139.
12. Solodimova G.A., Spirkin A.N. The information-measuring system of a bionic prosthesis of the lower limb // Measuring. Monitoring. Management. Control. 2018, no. 1(23), pp. 57-65.
13. Tiwari A., Kujur A., Kumar J., and Joshi D. Investigating the effect of Real-Time Center of pressure feedback training on the swing phase of lower limb kinematics in transfemoral prostheses with SACH foot // Journal of Biomechanical Engineering. 2022, vol. 144, no. 7, p. 071009. DOI: 10.1115/1.4053364.
14. Canton L.J.M., Gyllinsky J.V., Arredondo Z.A.A., Mankodiya K. HapticLink: A Force-based Haptic Feedback System for Single and Double Lower-Limb Amputees // 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). – Glasgow, Scotland, United Kingdom: IEEE, 2022. – P. 4226-4229. – DOI: 10.1109/EMBC48229.2022.9871460.
15. Kelly D.J., Posh R.R., Wensing P.M. Task-space Control of a Powered Ankle Prosthesis // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Yokohama, Japan: IEEE, 2024. – P. 3262-3268. – DOI: 10.1109/ICRA57147.2024.10611270.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Белосельский Павел Дмитриевич – студент	Beloselsky Pavel Dmitrievich – student
Грачёв Дмитрий Андреевич – студент	Grachev Dmitry Andreevich – student
Казаринова Анастасия Сергеевна – студентка	Kazarinova Anastasia Sergeevna – student
Сибирцев Никита Андреевич – студент	Sibirtsev Nikita Andreevich – student
Астахов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры Робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин AstakhovSV@mpei.ru	Astakhov Sergey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of robotics, mechatronics, dynamics and machine strength

Получена 13.08.2025