

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК: 681.5:62-5

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-26-34

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ ОСЕЙ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ ПОСРЕДСТВОМ МНОГОФАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО СТЕНДА

Илья Александрович Фролов¹, Денис Витальевич Тарасов²,
Андрей Александрович Воротников³, Юрий Викторович Подураев⁴

^{1, 2, 3, 4} Российский университет медицины Минздрава России, МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, Россия

¹ frol.451@yandex.ru

² demchok123@gmail.com

³ aavorotnikov90@gmail.com

⁴ poduraex@mail.ru

Аннотация. Целью данной работы является разработка методики многофакторных испытаний осей медицинских роботов с использованием инерционного стенда. Инерционный стенд представляет из себя комбинацию испытываемого мехатронного модуля, соединённой с массой нагрузки, приводимой в движение двигателем через электромагнитную муфту, силомоментного датчика и двух оптических датчиков положения. В ходе проведённых испытаний были определены характеристики номинальных параметров торможения, а также установлены зависимости параметров тормозного процесса от заданной скорости и величины внешнего момента инерции. Данные с датчиков, в ходе тестов, собирались и обрабатывались платой STM32, после чего записывались в файл формата .txt. Основываясь на результатах исследования, возможно дальнейшее изменение конструктивных параметров мехатронного модуля оси медицинского робота с целью изменения вида функциональной зависимости, определяющей качество работы устройства.

Ключевые слова: медицинские роботы, мехатронный модуль, методика испытаний, многофакторные испытания, инерционный стенд, роботизированные системы

Для цитирования: Фролов И.А. Тарасов Д.В. Воротников А.А. Подураев Ю.В. Методика испытания осей медицинских роботов посредством многофакторных испытаний с использованием инерционного стенда // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 26-34. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-26-34.

Original article

Open Access Article

METHODOLOGY FOR TESTING MEDICAL ROBOT AXES USING MULTIFACTORIAL TESTS WITH AN INERTIAL TEST BENCH

Ilya A. Frolov¹, Denis V. Tarasov², Andrey A. Vorotnikov³, Yuriy V. Poduraev⁴

^{1,2,3,4} Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

¹ frol.451@yandex.ru

² demchok123@gmail.com

³ aavorotnikov90@gmail.com

⁴ poduraex@mail.ru

Abstract. This work aims to develop a methodology for multi-factor testing of medical robot axes using an inertia test bench, which consists of a mechatronic module under test connected to a load mass driven by a motor through an electromagnetic clutch, along with a force-torque sensor and two optical position sensors. During the conducted experiments, the authors determine the characteristics of nominal braking parameters, as well as relationships between brake process parameters and given velocity and magnitude of external moment of inertia; collect data from the sensors and process it by an STM32 board, then record it in a text file format (.txt). Based on these findings, further adjustments can be made to the design parameters of the mechatronic axis module of a medical robot to modify its functional dependence and improve device performance.

Keywords: medical robots, mechatronic module, testing method, multi-factor tests, inertia test bench, robotic systems

For citation: Frolov I.A., Tarasov D.V., Vorotnikov A.A., Poduraev Yu.V. Methodology for Testing Medical Robot Axes Using Multifactorial Tests with an Inertial Test Bench. Automation and modeling in design and management,

Введение

Одной из основных задач мехатроники и робототехники является оптимизация характеристик мехатронных модулей, ключевых компонентов осей роботов. Актуальность данной задачи подчеркивается исследованием [1]. В данном научном труде объектом исследования являлся мехатронный модуль, применяемый для приведения в движение звеньев медицинского робота. Целью исследования выступала разработка и обоснование методологии проведения испытаний мехатронного модуля. Тестирование осуществлялось с использованием автоматизированного экспериментального стенда.

Мехатронные модули используются для реализации заданных законов движения и торможения. Область применения таких модулей достаточно обширна и определяется задачами, стоящими перед роботом [2]. Выбор компоновки и элементов, составляющих конструкцию мехатронного модуля, зависит от поставленных перед ним задач. Ряд общих требований, предъявляемых к мехатронным модулям, включает в себя компактность, энергоэффективность, способность к выполнению заданных законов движения и торможения, высокую скорость работы, высокий КПД, а также надежность и долговечность [3].

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов испытаний мехатронных модулей являются испытания с использованием инерционных систем [4]. Этот метод позволяет проводить многофакторные испытания, направленные на выявление соответствия заданных характеристик (движения, торможения, генерируемого момента и величины люфта) фактическим характеристикам мехатронных модулей.

Помимо этого, рассматриваются альтернативные подходы к испытаниям мехатронных модулей, включая использование механического воздействия на мехатронный модуль с помощью конструктивных элементов робота. Описание одного из таких методов представлено в исследовательской работе [5]. Однако данная методика обеспечивает возможность измерения ограниченного числа характеристик и обладает значительной погрешностью, т.к. измерения базируются на системе датчиков, встроенных непосредственно в модуль.

Альтернативным источником возмущающего воздействия может служить нагрузочный двигатель, напрямую соединенный с мехатронным модулем [6]. Тем не менее, применение данного подхода плохо поддается унификации из-за необходимости индивидуального подбора нагрузочного двигателя в зависимости от параметров конкретного модуля. Это приводит к необходимости кардинально менять конструктивные элементы стенда, что значительно увеличивает время, требуемое для проведения испытаний.

Разработанная в ходе данного исследования методика была направлена на изучение номинальных параметров торможения, а также установления зависимости параметров тормозного процесса от задаваемой скорости выходного фланца и величины внешнего момента инерции. Повышение точности медицинских роботов, при проведении хирургических манипуляций, имеет потенциал к уменьшению длительности операций и снижению травматического воздействия на ткани, расположенные внутри операционного поля. Уменьшение вероятности нежелательных последствий при работе медицинского робота способно положительно сказаться на сроке реабилитации пациентов. Анализ временных характеристик торможения дополнительно может быть использован для коррекции программного обеспечения системы управления медицинского робота.

Инерционный стенд и методика проведения испытаний осей медицинских роботов

Стенд испытания характеристик осей медицинских роботов включает набор маховиков с возможностью закрепления на основной вал, вращаемый электродвигателем. Основной вал присоединяется к электродвигателю посредством электромагнитной муфты и ременной передачи, обеспечивающей разьединение вала двигателя и основного вала при достижении требуемой скорости вращения. На выходе основного вала обеспечена возможность установки испытываемой оси медицинского робота. Также обеспечена возможность регистрировать угловое положение вала на входе и на выходе испытываемой оси. Стенд обеспечен защитным кожухом, установленным в плоскости вращения маховиков. Конструкция стенда, с установленной осью медицинского робота, показана на рис. 1.

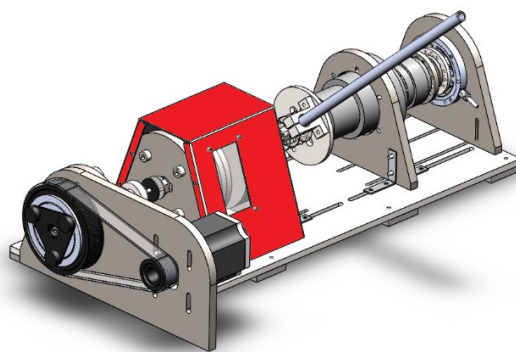


Рис. 1. Инерционный стенд для многофакторных испытаний
Fig. 1. Inertial stand for multifactorial tests

Стенд испытания осей медицинских роботов состоит из трёх подсистем:

1. Подсистема разгона. Подсистема предназначена для разгона основного вала до требуемых, согласно программе испытаний, величин угловой скорости при испытании осей медицинских роботов на воздействие внешних факторов. Встроенная электромагнитная муфта служит для расцепления вала двигателя непосредственно перед проведением испытаний. Это необходимо для исключения влияния вала двигателя на основной вал с закреплёнными маховиками во время проведения измерений. Соединяется с подсистемой маховиков посредством сильфонной муфты для компенсации осевого и радиального биения.

2. Подсистема маховиков. Подсистема предназначена для обеспечения требуемого для испытаний момента инерции основного вала. Возможна установка до пяти маховиков с совокупным моментом инерции до 0,015 кг/м². Оснащена защитным кожухом, защищающим оператора от вращающихся элементов подсистемы.

3. Подсистема измерения. Подсистема предназначена для измерения всего перечня исследуемых функциональных характеристик оси медицинского робота. За счёт встроенного датчика момента, а также двух угловых датчиков положения на входе и на выходе, подсистема позволяет регистрировать перемещение, величину момента торможения, а также тормозной путь испытываемой оси медицинского робота. Специальный переходник позволяет вручную создавать момент на входе испытываемой оси без участия подсистемы разгона и подсистемы маховиков. Подсистема измерения имеет несколько конфигураций, предназначенных для испытаний различных исследуемых функциональных характеристик.

Погрешность измерения параметров соответствует погрешности средств измерения, используемых для фиксации значений:

а) максимально допустимая погрешность измерения моментов при использовании однокомпонентного силомоментного датчика: $\pm 0,1\%$;

б) максимально допустимая погрешность измерения температуры поверхности корпуса мехатронного модуля при использовании пирометра: $\pm 1,5\%$;

в) максимально допустима погрешность измерения частоты вращения при использовании абсолютного углового энкодера: $\pm 30''$

В рамках исследования был выделен перечень ключевых функциональных характеристик, определение значений которых являлось необходимым для комплексной оценки характеристик оси медицинского робота. Обоснование выбора данных характеристик связано с их влиянием на эффективность функционирования системы. Наименование и размерность указанных характеристик приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые функциональные характеристики

Table 1

Functional characteristics under study

№	Функциональная характеристика	Тип измерения	Размерность
1	Номинальное время торможения	Прямое	мс
2	Номинальный тормозной путь оси медицинского робота	Прямое	°
3	Тормозной путь в зависимости от величины скорости выходного фланца оси медицинского робота	Прямое	°
4	Тормозной путь в зависимости от воздействия внешнего момента инерции на выходной фланец оси медицинского робота	Прямое	°

Для оценки влияния скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота на время торможения и длину тормозного пути в рамках сформированной методики был реализован комплекс функциональных испытаний, основанных на последовательном проведении экспериментов с изменением ключевых параметров движения. На первом этапе на тормозную систему мехатронного модуля подаётся номинальное напряжение, а скорость вращения выходного фланца устанавливается на уровне 10 % от номинальной. Далее выполняется контроль радиального биения вала на всём его диапазоне перемещения с использованием индикатора часового типа. В случае, если величина биения превышает допустимый уровень в 100 мкм, производится переналадка станда.

После подтверждения стабильности задаваемой скорости с помощью абсолютного углового энкодера фиксировались параметры тормозного процесса, время торможения и тормозной путь. Полученные данные фиксировались и систематизировались в таблице экспериментальных результатов. Температура наружной поверхности корпуса оси медицинского робота измерялась по завершении десяти последовательных испытаний. При условии, что заданная скорость составляет менее номинального значения, эксперимент повторяется с увеличением скорости на 10 %. Блок-схема проведения испытаний представлена на рис. 2.

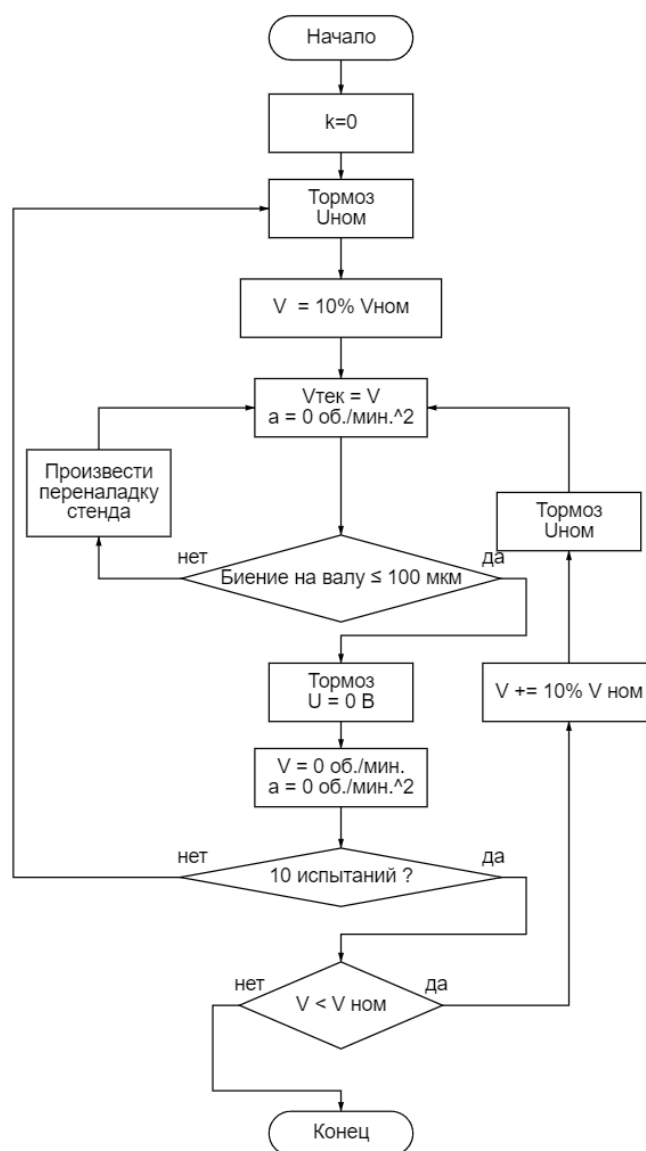


Рис. 2. Блок-схема испытаний, проводимых с целью определения зависимости между временем торможения, тормозным путём и скоростью выходного фланца оси медицинского робота

Fig. 2. Block diagram of tests conducted to determine the relationship between braking time, braking distance and output flange speed of the medical robot axis

На рис. 2: k – количество стальных дисков в подсистеме маховиков; U – напряжение на фрикционном тормозе мехатронного модуля (В); V – скорость вращения выходного фланца мехатронного модуля (об/мин); a – ускорение выходного фланца мехатронного модуля (об/мин²).

На следующем этапе исследования была проведена оценка влияния внешнего момента инерции на время торможения и тормозной путь. Для этого методика испытаний была дополнена комплексом функциональных испытаний, направленных на анализ динамики тормозного процесса при различных значениях момента инерции.

Испытания проводились при номинальной скорости вращения выходного фланца мехатронного модуля. Систематическое изменение момента инерции осуществлялось путём добавления стальных дисков в подсистему маховиков. Если количество установленных дисков было менее пяти, в подсистему добавлялся ещё один диск, и цикл экспериментов повторялся. Для повышения достоверности результатов на каждом этапе экспериментов фиксировался средний момент торможения на основе десяти последовательных испытаний. Полученные данные фиксировались и систематизировались в таблице экспериментальных результатов. Блок-схема испытаний представлена на рис. 3.

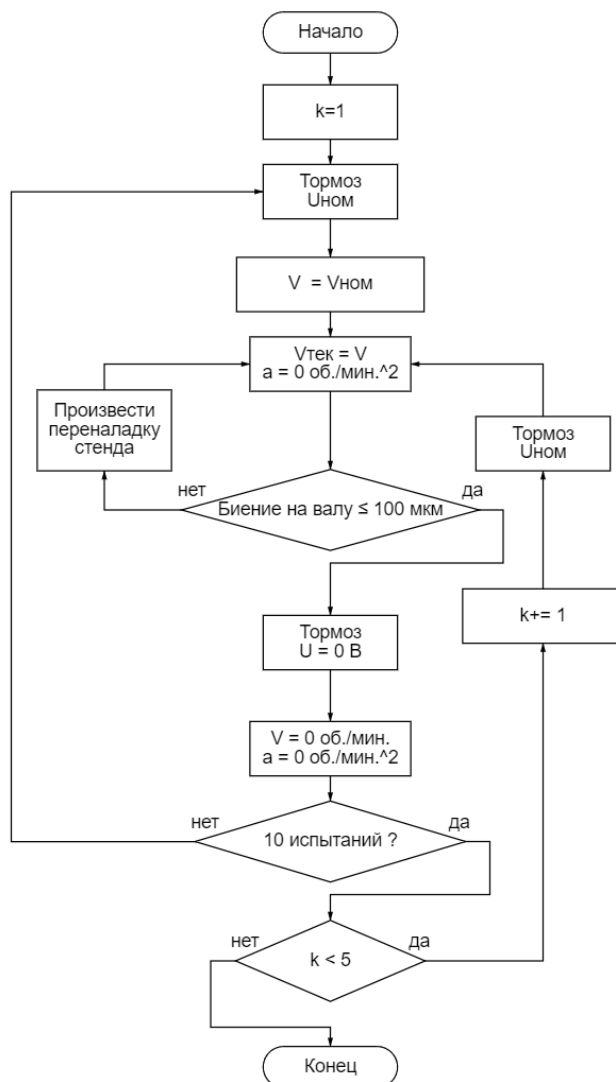


Рис. 3. Блок-схема испытаний, проводимых с целью определения зависимости между временем торможения, тормозным путём и моментом инерции на выходном фланце оси медицинского робота
Fig. 3. Block diagram of tests conducted to determine the relationship between braking time, braking distance and moment of inertia at the output flange of the axis of a medical robot

На рис. 3: k – количество стальных дисков в подсистеме маховиков; U – напряжение на фрикционном тормозе мехатронного модуля (В); V – скорость вращения выходного фланца мехатронного модуля (об/мин); a – ускорение выходного фланца мехатронного модуля (об/мин²).

Результаты

В процессе экспериментальных исследований, выполненных в соответствии с разработанной методикой, были изучены зависимости времени торможения и величины тормозного пути от скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота. Экспериментальные данные, полученные при номинальной скорости вращения выходного фланца представлены на рис. 4.

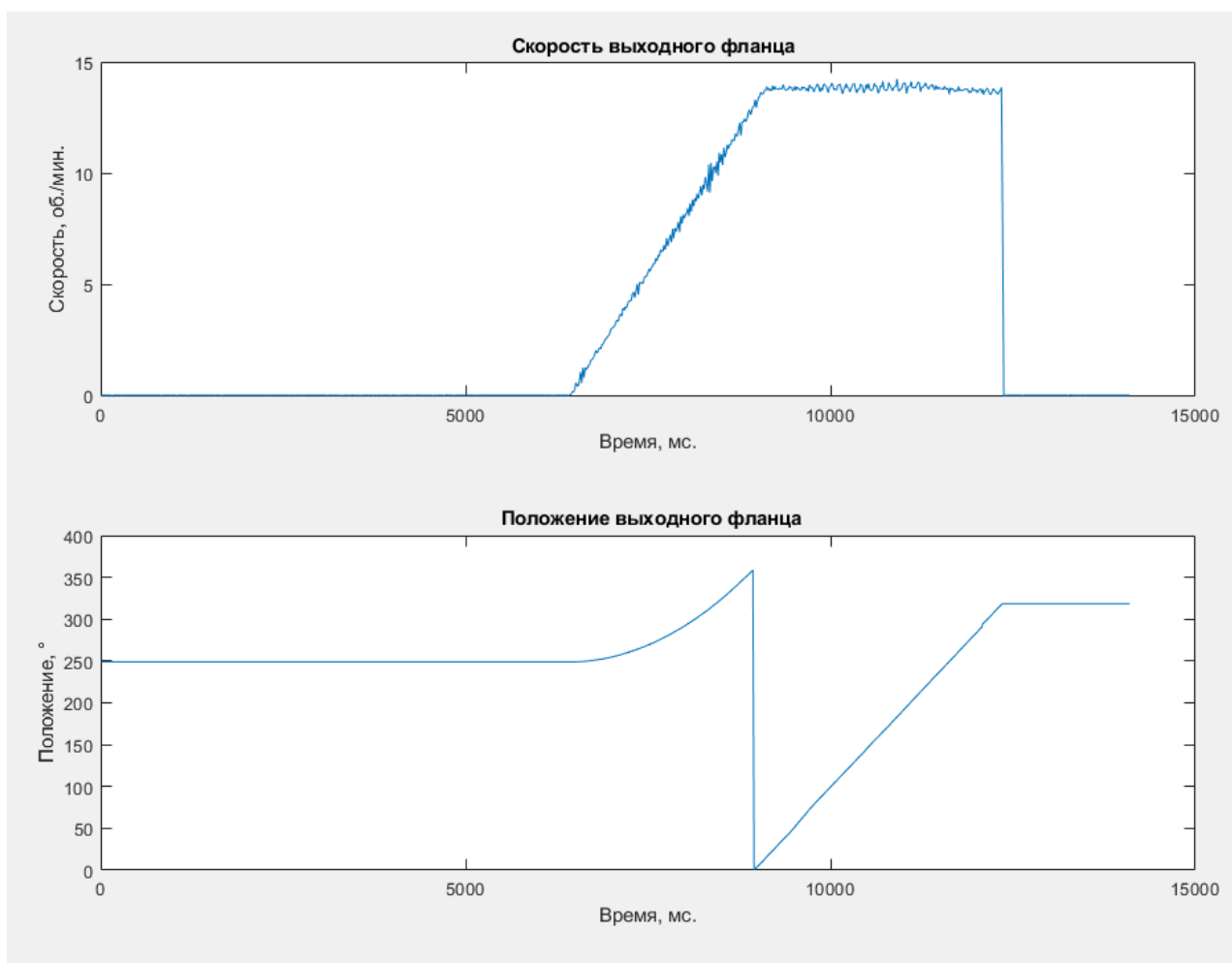


Рис. 4. Графическое представление данных, полученных при проведении испытаний, устанавливающих зависимость между скоростью вращения выходного фланца и его тормозного пути, для скорости вращения выходного фланца – 100 % от номинальной

Fig. 4. Graphical representation of data obtained during tests establishing the relationship between the output flange rotation speed and its braking distance, for an output flange rotation speed of 100% of the nominal

По завершении испытаний, проведённых для всех заданных значений скорости в соответствии с разработанной методикой, была построена зависимость тормозного пути от скорости вращения выходного фланца. Для повышения наглядности результатов экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второй степени. График зависимости представлен на рис. 5.

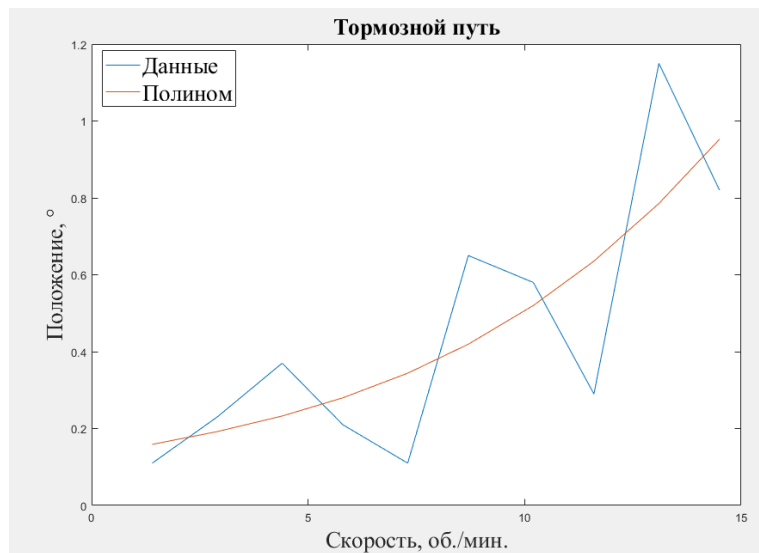


Рис. 5. Зависимость тормозного пути от скорости выходного фланца оси медицинского робота
Fig. 5. Dependence of the braking distance on the speed of the output flange of the axis of the medical robot

На рис. 6 представлены результаты испытаний, выполненных в соответствии с методикой, направленной на изучение зависимости тормозного пути от момента инерции, приложенного к выходному фланцу оси медицинского робота. Эксперимент проводился при номинальной скорости вращения выходного фланца и максимальном значении момента инерции, предусмотренном параметрами инерционного стенда.

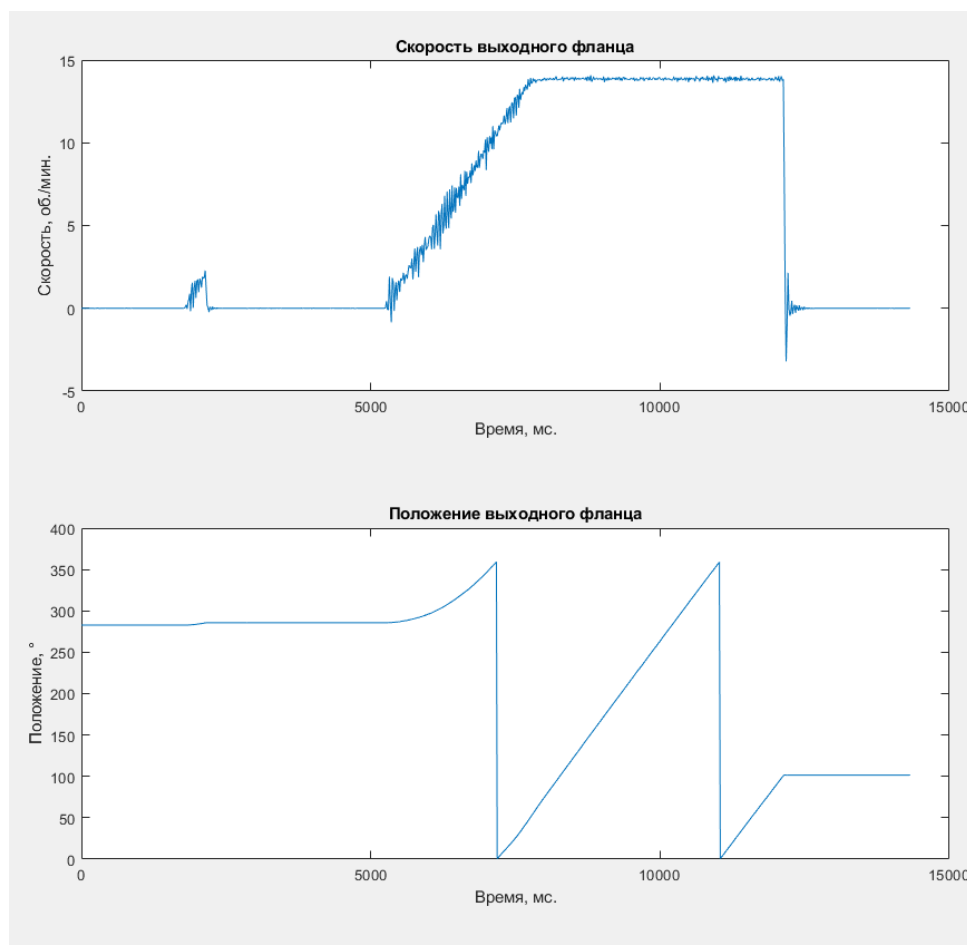


Рис. 6. Графическое представление данных, полученных при проведении испытаний, устанавливающих зависимость между моментом инерции на выходном фланце и его тормозного пути, при наличии 5-ти стальных дисков в подсистеме маховиков

Fig. 6. Graphical representation of data obtained during tests establishing the relationship between the moment of inertia on the output flange and its braking distance, in the presence of 5 steel disks in the flywheel subsystem

По завершении испытаний, проведённых для всех заданных значений моментов инерции в соответствии с разработанной методикой, была построена зависимость тормозного пути от момента инерции на выходном фланце оси медицинского робота. Для повышения наглядности результатов экспериментальные данные были аппроксимированы полиномом второй степени. График зависимости представлен на рис. 7.

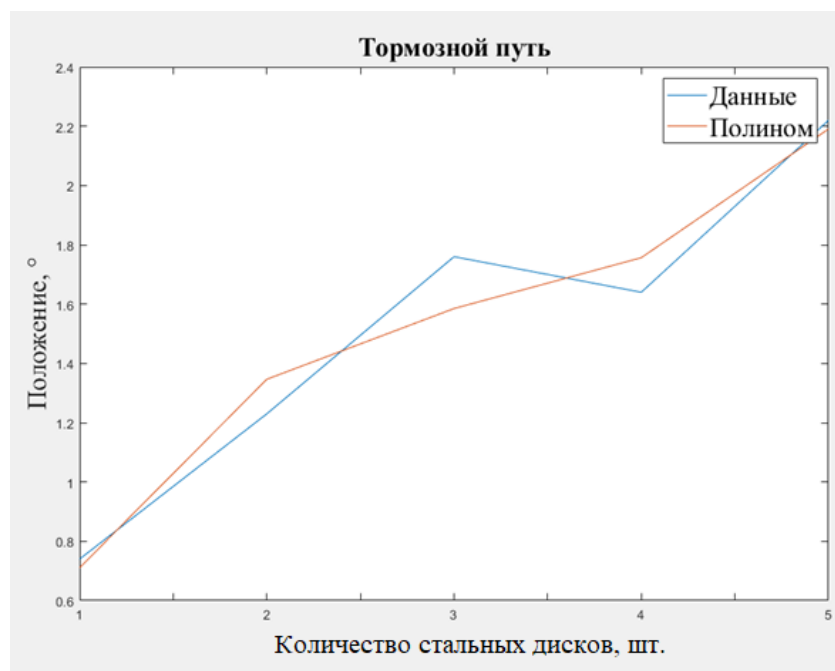


Рис. 7. Зависимость тормозного пути от количества стальных дисков устанавливаемых в подсистеме маховиков испытательного стенда, определяющих момент инерции на выходном фланце оси медицинского робота

Fig. 7. Dependence of the braking distance on the number of steel disks installed in the flywheel subsystem of the test bench, determining the moment of inertia on the output flange of the axis of the medical robot

Заключение

Анализ экспериментальных данных продемонстрировал, что предложенная методика является эффективным инструментом для оценки динамических характеристик осей медицинских роботов, обеспечивая получение воспроизводимых результатов. Экспериментальные исследования подтвердили её пригодность для тестирования осей медицинских роботов, что подчёркивает её значимость в задачах разработки подобных устройств.

Результаты испытаний выявили закономерность, согласно которой увеличение скорости вращения выходного фланца оси медицинского робота и внешнего момента инерции приводят к увеличению тормозного пути. Однако значительный разброс значений указывает на необходимость доработки программного обеспечения, используемого для обработки данных с углового датчика положения. Данный фактор связан с ограниченной частотой сбора данных и недостаточной точностью алгоритмов обработки.

В рамках дальнейших исследований планируется провести анализ возможностей модернизации программного обеспечения, отвечающего за регистрацию исследуемых характеристик. Особое внимание будет уделено повышению частоты дискретизации и оптимизации алгоритмов обработки данных, что позволит повысить качество анализа характеристик.

Список источников:

1. Mesmer P., Riedel P., Lechler A., Verl A. Investigation and Compensation of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives //MHI Colloquium. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 177-187.

References:

1. Mesmer P, Riedel P, Lechler A, Verl A. Investigation and Compensation of Hysteresis in Robot Joints with Cycloidal Drives. In: Schüppstuhl T, Tracht K, Fleischer J, editors. Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2022. Proceedings of Colloquium ChamMHI 2022; Springer, Cham: Springer International Publishing; 2022. p. 177-187.

2. Min J. K., Yu H. S., Ahn K. H., Song J. B. Robot joint module equipped with joint torque sensor with disk-type coupling for torque error reduction //Intelligent Robotics and Applications: 8th International Conference, ICIRA 2015, Portsmouth, UK, August 24-27, 2015, Proceedings, Part I 8. – Springer International Publishing, 2015. – С. 371-378.

3. Егоров О.Д. Конструирование механизмов роботов. – Москва: Абрис, 2012. – 444 с.

4. Kończak M., Kukla M., Warguła Ł., Rybarczyk D., Wieczorek B. Considerations for the Design of a Wheelchair Dynamometer concerning a Dedicated Braking System // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 13. – С. 7447.

5. Shi Z., Li Y., Liu G. Adaptive torque estimation of robot joint with harmonic drive transmission // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Т. 96. – С. 1-15.

6. Zhang G., Tong Q., Zhang T., Tao J., Qiu A. Design of a High Torque Density Robot Joint and Analysis of Force Control Method Applied for a Light Exoskeleton // Electronics. – 2023. – Т. 12. – №. 2. – С. 397.

2. Min JK, Yu HS, Ahn K.H., Song J.B. Robot Joint Module Equipped with Joint Torque Sensor with Disk-Type Coupling for Torque Error Reduction. In: Liu H, Kubota N, Zhu, X, Dillmann R, Zhou D, editors. Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Robotics and Applications: ICIRA 2015; 2015 Aug 24-27; Portsmouth, UK: Springer International Publishing; 2015; Part I, Section 8. p. 371-378.

3. Egorov O.D. Design of Robot Mechanisms. Moscow: Abris; 2012.

4. Kończak M., Kukla M., Warguła Ł., Rybarczyk D., Wieczorek B. Considerations for the Design of a Wheelchair Dynamometer Concerning a Dedicated Braking System. Applied Sciences. 2023;13(13):7447.

5. Shi Z., Li Y., Liu G. Adaptive Torque Estimation of Robot Joint with Harmonic Drive Transmission. Mechanical Systems and Signal Processing. 2017;96:1-15.

6. Zhang G., Tong Q., Zhang T., Tao J., Qiu A. Design of a High Torque Density Robot Joint and Analysis of Force Control Method Applied for a Light Exoskeleton. Electronics. 2023;12(2):397.

Информация об авторах:

Фролов Илья Александрович

Младший научный сотрудник НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, аспирант МГТУ «СТАНКИН».

Тарасов Денис Витальевич

Лаборант НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, магистрант МГТУ «СТАНКИН».

Воротников Андрей Александрович

Научный сотрудник НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, старший преподаватель МГТУ «СТАНКИН».

Подураев Юрий Викторович

Директор НИИ Технобиомед «Российский университет медицины» Минздрава России, доктор технических наук, профессор МГТУ «СТАНКИН».

Information about the authors:

Frolov Ilya Aleksandrovich

Junior Researcher at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Postgraduate Student at Moscow State University of Technology «STANKIN».

Tarasov Denis Vitalievich

Laboratory Assistant at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Master's Degree Student at Moscow State University of Technology «STANKIN».

Vorotnikov Andrey Aleksandrovich

Researcher at TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Senior Lecturer at Moscow State University of Technology «STANKIN».

Poduraev Yuriy Viktorovich

Director of TechnoBiomed Research Institute, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at Moscow State University of Technology «STANKIN».

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.02.2025; одобрена после рецензирования 18.03.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 23.02.2025; approved after reviewing 18.03.2025; accepted for publication 19.05.2025.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.