

УДК 531.8, 621.01

Моделирование и анализ качества системы управления приводами медицинского манипулятора*

В.В. Коровушкин, К.А. Пичугин, А.А. Романов, К.А. Шалюхин

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Modeling and quality analysis of a medical manipulator actuator control system

V.V. Korovushkin, K.A. Pichugin, A.A. Romanov, K.A. Shalyukhin

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Рассмотрены вопросы моделирования системы управления шаговым приводом манипулятора, используемого в медицинских робототехнических комплексах. Предложена конструкция испытательного стенда, в состав которого входят измерительные средства и устройства сопряжения с исследуемым шаговым двигателем. Разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в реальном времени собирать информацию о параметрах движения и процессах, происходящих в шаговом двигателе. Для получения прямоугольных импульсов, обеспечивающих вращение шагового двигателя, в программном обеспечении сформирована задача виртуального подприбора, использующего счетчик платы и физический порт персонального компьютера, служащий для вывода управляющего сигнала. Программный модуль работает в комплексе с платой сбора данных National Instruments, что позволяет отказаться от применения дополнительных плат управления. Предусмотрена функция плавного пуска и остановки двигателя. Разработаны методики испытаний для анализа точности и функциональности системы привода, позволившие получить значительный массив данных и сделать достоверные выводы о свойствах и параметрах объекта исследования.

EDN: IOZFNБ, <https://elibrary.iozfnb>**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, медицинский манипулятор, шаговый двигатель, система управления, плата сбора данных, инкрементальный энкодер

This paper examines the modeling of a stepper drive control system for a manipulator used in medical robotic systems. A test rig design is proposed, including measuring instruments and devices for interfacing with the stepper motor under study. Special software has been developed to collect real-time information on the motion parameters and processes occurring in the stepper motor. To generate rectangular pulses that rotate the motor under test, a virtual subdevice task is generated in the software that uses a board counter and a physical computer port for outputting a control signal. The software module works in conjunction with a National Instruments data acquisition board, eliminating the need for additional control boards. A soft start and stop function for the motor is included. Test methods have been developed to analyze the accuracy and functionality of the drive system, allowing for the acquisition of a significant amount of data and the drawing of reliable conclusions about the properties and parameters of the test object.

* Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0022.

EDN: IOZFNБ, <https://elibrary.iozfnb>

Keywords: robotics complex, medical manipulator, stepper motor, control system, data acquisition board, incremental encoder

В большинстве сфер деятельности человека автоматизация является тем фактором, который обеспечивает качественное расширение возможностей, повышение эффективности труда и улучшение его условий [1, 2]. Медицина, использующая достижения технического прогресса, получает в свое распоряжение все более совершенную технику, в том числе робототехнические комплексы [3–5]. Разработка такого оборудования требует особого отношения к механическим компонентам, в частности к системам и элементам электропривода, от качества которых существенно зависят результирующие характеристики всего комплекса [6, 7].

В Институте машиноведения им. А.А. Благоврадова РАН имеется опыт исследования и синтеза механизмов медицинских манипуляторов разного типа [8–11], в разработке находится ряд опытных образцов [11–14]. В ходе этой работы возникает потребность в качественных электроприводах и системах управления двигателями, в частности шаговыми (ШД). При испытаниях ШД необходимо не только собирать и анализировать параметры движения, но и генерировать управляющие импульсы для ШД. С помощью персонального компьютера (ПК) создается виртуальный аналог физической системы управления приводами с любыми необходимыми параметрами, что незаменимо на стадии проектирования, так как позволяет уменьшить время и затраты на разработку системы на базе микроконтроллера.

Цель работы — создание лабораторного комплекса, в состав которого входят испытательный стенд, измерительные средства и

устройства сопряжения, а также программное обеспечение для получения в реальном времени информации о параметрах движения ШД в различных режимах.

Схема системы управления ШД. Приведенная на рис. 1 схема системы управления ШД иллюстрирует взаимодействие ее компонентов, основными из которых являются ШГ, ПК, управляющая плата и драйвер ШД.

Плата генерирует прямоугольные импульсы, которые служат основным управляющим сигналом для драйвера ШД. Частота импульсов напрямую влияет на частоту вращения ШД, что позволяет точно регулировать его движение и позиционирование.

Аппаратная часть системы управления ШД. Внешний вид испытательного стенда, предназначенного для проведения комплексных тестов и оценки характеристик ШД, показан на рис. 2. Важной частью стенда является специально спроектированная оснастка, которая обеспечивает надежное и точное взаимодействие между тестируемыми элементами. Также установлен модуль для испытаний на проверку

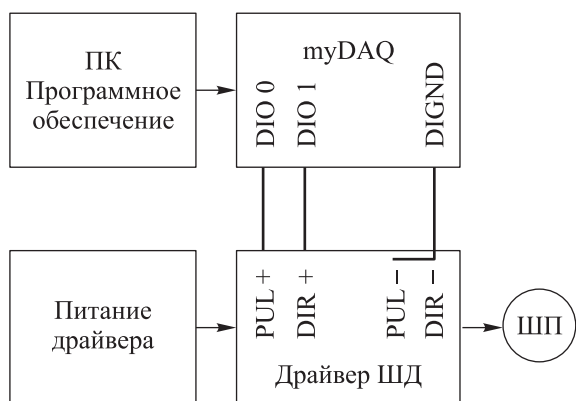


Рис. 1. Схема системы управления ШД

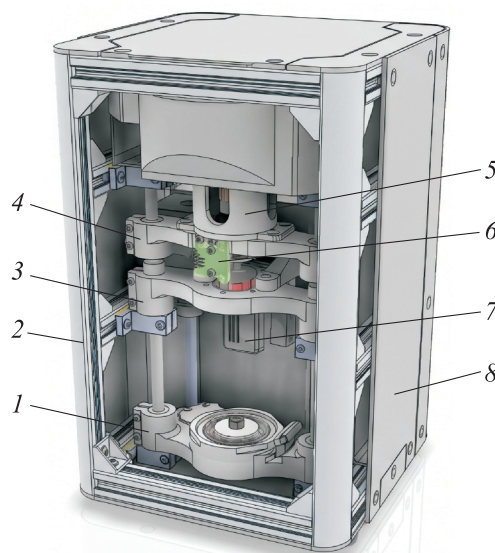


Рис. 2. Внешний вид испытательного стенда: 1 и 3 — подвижная и неподвижная опоры; 2 — силовая рама; 4 — испытательный модуль; 5 — энкодер; 6 — датчик скорости; 7 — датчик температуры и влажности; 8 — обшивка

позиционирования и качества отработки разработанной программы.

Тестируемый объект. В качестве объекта исследования выступал ШД NEMA17 с напряжением питания 24 В, широко применяемый в 3D-принтерах, станках с числовым программным управлением и других автоматизированных механизмах для создания вращательного движения. Вал ШД перемещается дискретно с шагом $1,8^\circ$, т. е. на его полный оборот требуется 200 шагов.

Сбор данных и управление. Для сбора данных использована плата NI myDAQ компании National Instruments (рис. 3), оснащенная одним встроенным счетчиком/таймером, позволяющим генерировать прямоугольные сигналы. Так как не все платы сбора данных обладают аналогичной функциональностью, потребовалось тщательное изучение технической характеристики выбранной платы для совместимости с написанной программой.

В плате сбора данных порт DIO 0 предназначен для генерации импульсов, что позволяет управлять ШД, порт DIO 1 — для задания направления вращения. Также есть возможность включения и выключения ШД.

Драйвер ШД. В драйвере TMC 2209 применены современные технологические решения. В частности, технология StealthChop обеспечивает существенное снижение уровня шума при работе ШД, а технология spreadCycle гарантирует прецизионно плавное вращение. Эти инновационные разработки позволили заметно уменьшить шумовое воздействие испытательного стенда и вибрации ШД, что способствова-

ло повышению достоверности результатов испытаний.

Датчик положения вала. Для определения положения вала применен оптический инкрементальный энкодер, поддерживающий разрешение 2500 импульсов за полный оборот, т. е. его дискретность составляет $0,144^\circ$. При использовании квадратурной обработки сигналов дискретность можно уменьшить в 4 раза. С помощью такого датчика оценивают пропуск шагов. Если шаг будет пропущен, то фактический угол будет отличаться от заданного.

Датчик частоты вращения. Для определения стабильности частоты импульсов использован датчик частоты вращения HC-020K. Даже если нет пропуска шагов, частота вращения может отличаться от заданной или меняться в процессе движения, т. е. вращение будет неравномерным, что связано с нестабильностью частоты импульсов.

Программная часть системы управления ШД. Для управления ШД и проведения испытаний написан драйвер в программной среде ПК.

Шаговая частота вращения (или частота генерации импульсов) определяется выражением

$$f = \frac{nS}{60},$$

где n — частота вращения, мин^{-1} ; S — шаговое число.

Число управляющих импульсов, необходимое для поворота на заданный угол, рассчитывается как

$$N = \frac{\alpha S}{360},$$

где α — угол перемещения.

Пример использования драйвера приведен на рис. 4. Эта программа управления задает частоту и направление вращения ШД.

Чтобы задать прямоугольный сигнал, необходимо создать задачу с помощью виртуального подприбора (ВПП) DRIVER PWM RUN, указав счетчик платы и физический порт, на который будет выводиться этот сигнал. Далее надо скорректировать этот сигнал, указав необходимые обороты ШД и выбранное шаговое число в ВПП DRIVER CONT SIMPLE, отвечающем за постоянное вращение ШД. В этом же ВПП происходит пуск и остановка ШД, причем в последнем случае питание с обмоток не снимается. При завершении программы необходимо

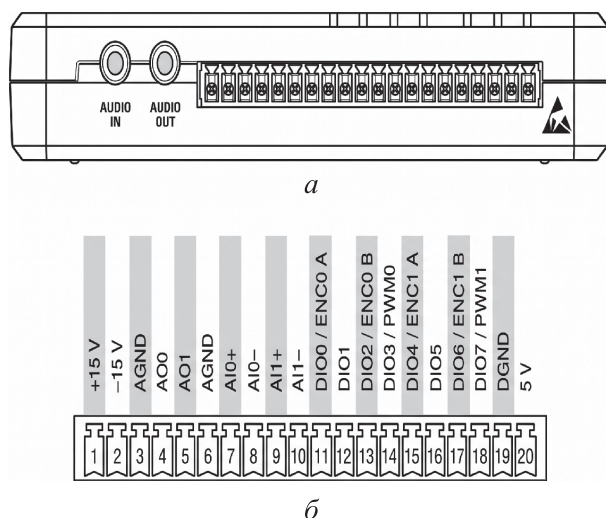


Рис. 3. Внешний вид платы сбора данных NI myDAQ (а) и схема вывода портов (б)

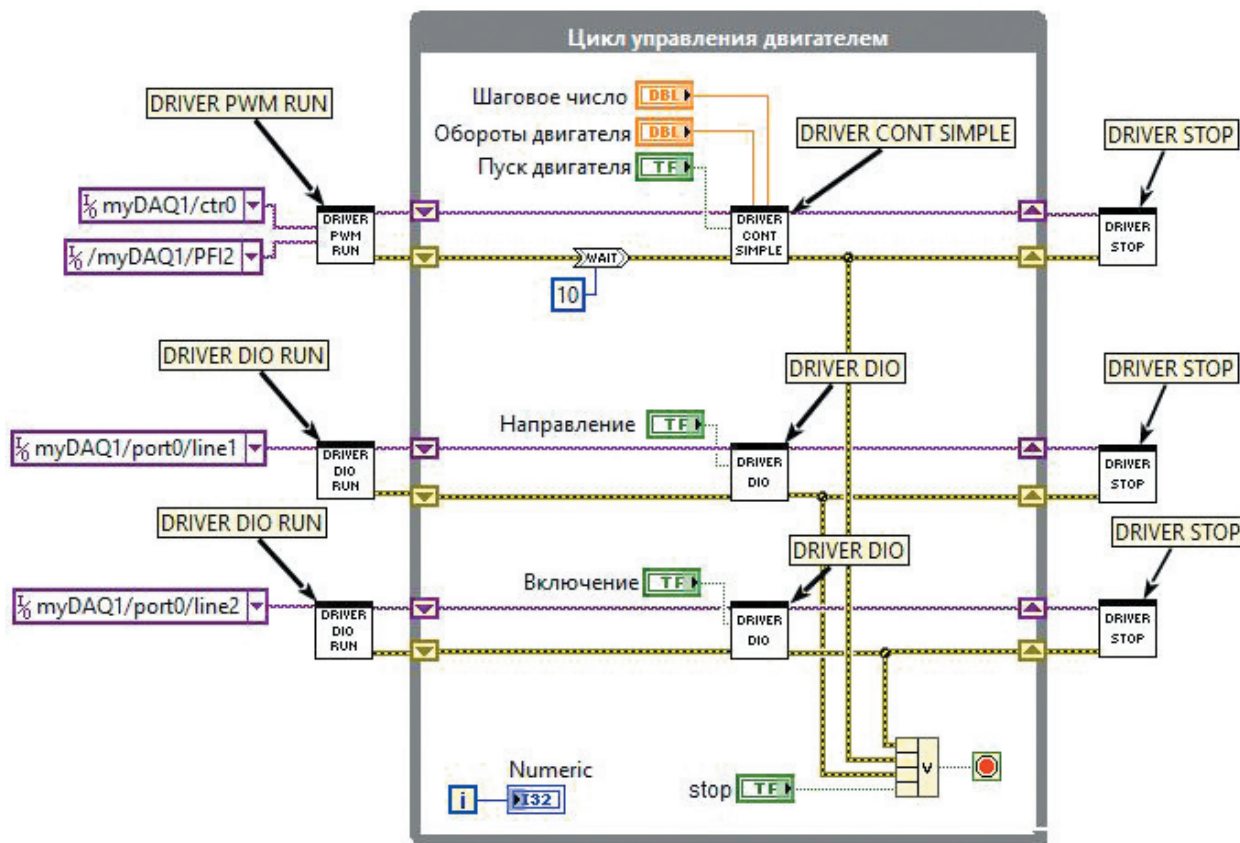


Рис. 4. Блок-диаграмма программы управления ШД

правильно закрыть задачу и освободить от нее память ПК, используя ВПП DRIVER STOP.

Для задания булевых операций, таких как смена направления или включение/отключение питания обмотки ШД, использована ВПП DRIVER DIO RUN, где указан физический порт, на который будет выводиться этот сигнал. Далее в ВПП DRIVER DIO задается состояние порта.

Также программа отслеживает ошибки, при возникновении которых происходит автоматическая остановка во избежание аварийных состояний.

Пример блок-диаграммы программы для испытаний ШД показан на рис. 5.

Методика испытания. Испытания ШД NEMA17 проводили при различных значениях шагового числа. Чем оно меньше, тем легче отследить пропуск шагов. Например, при шаговом числе $S = 200$, т. е. в полношаговом режиме управления, на один импульс управляющего сигнала приходится поворот на $1,8^\circ$.

Отклонение на $1,8^\circ$ от заданного угла свидетельствует о наличии ошибки в управлении.

Это отклонение можно обнаружить, используя инкрементальный энкодер невысокого разрешения, пренебрегая влиянием сцепления и несовершенством установки.

Однако с увеличением шагового числа точность поворота возрастает, что требует применения энкодера с более высоким разрешением и снижения влияния механических помех.

Получаемая погрешность зависит от характеристик ШД, драйвера и способа измерения, другие параметры системы управления на нее не влияют. Поэтому можно принять допущение, что отсутствие пропуска шагов и других нежелательных эффектов из-за системы управления при малом значении шагового числа гарантирует их отсутствие и на более высоких значениях шагового числа при условии работы драйвера и платы управления в допустимых пределах.

Для испытаний выбраны шаговые числа $S = 200, 800$ и 1600 . При шаговом числе $S = 200$ и разрешении энкодера $10\,000$ отклонение на более чем $1,8^\circ$ от заданного угла принято пропуском шага, тогда как допустимое отклонение по энкодеру составляет $0,036^\circ$.

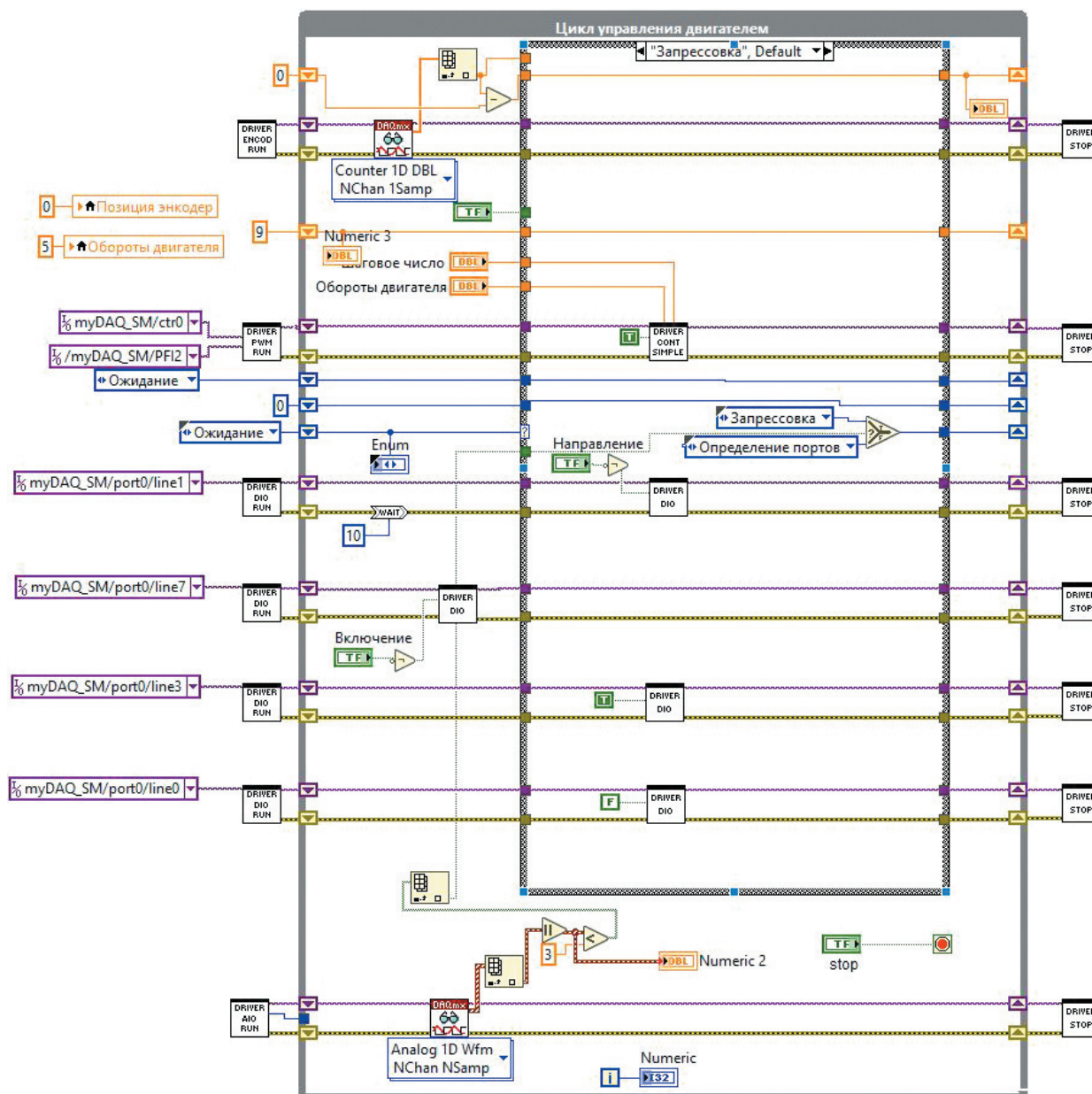
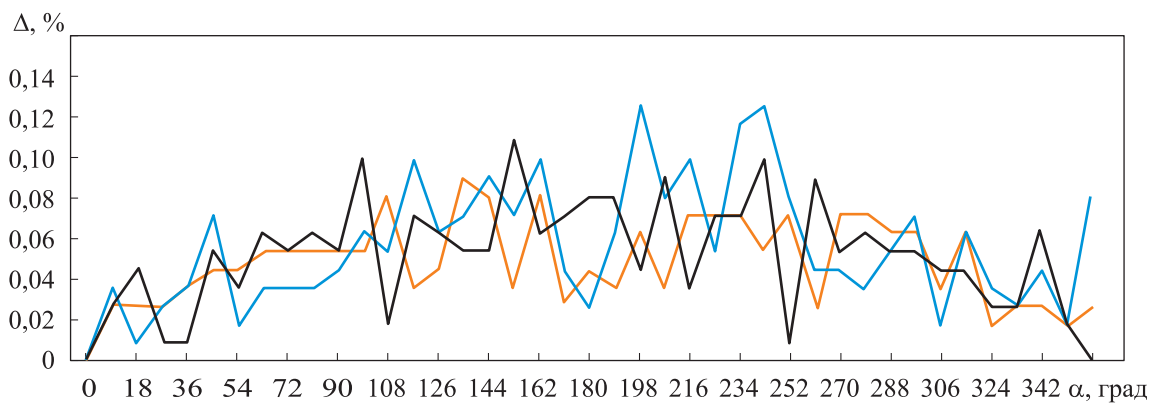


Рис. 5. Блок-диаграмма программы для испытаний ШД

Рис. 6. Зависимости ошибки позиционирования ШД Δ от угла перемещения α при шаговом числе $S = 200$ (—), 800 (—) и 1600 (—)

Ввиду того, что ШД управляется целым числом импульсов и энкодер регистрирует целое число импульсов, физически эти устройства сложно соединить так, чтобы на один импульс ШД приходился один импульс энкодера. Обычно они различны. В рассматриваемом случае минимальное значение этого расхождения, которое можно зарегистрировать, равно разрешению энкодера ($0,036^\circ$). Также из-за различных механических воздействий установки возможно большее отклонение от этого значения. Единственное условие обнаружения ошибки позиционирования, когда отклонение от заданного угла на 1° больше, чем разрешение ШД.

При шаговом числе $S = 800$ и разрешении энкодера 10 000 пропуском шага считается отклонение более $0,45^\circ$, а при $S = 1600$ — более $0,225^\circ$.

При дальнейшем увеличении шагового числа разрешение энкодера не позволяет определить пропуск шага с высокой достоверностью.

Также значительный эффект вносит конструкция стенда.

Результаты испытаний. Полученные результаты в виде зависимости ошибки позиционирования ШД Δ от угла перемещения α при шаговом числе $S = 200, 800$ и 1600 приведены на рис. 6. Они показывают высокую повторяемость данных, а также минимальную погрешность, сравнимую с погрешностью датчика, что свидетельствует об отсутствии пропуска шагов или иных дефектов в управлении на разных режимах работы ШД.

Выводы

1. Разработана управляющая программа, которую можно использовать в различных режимах работы ШД с одновременным сбором данных о параметрах движения.

2. Выполнен анализ свойств ШД NEMA17 при работе с различными шаговыми числами.

Литература

- [1] Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А., Филиппов Г.С. Актуальные проблемы машиноведения и пути их решения. Волновые и аддитивные технологии, станкостроение, робототехника. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2018, № 5, с. 16–25.
- [2] Freschi C., Ferrari V., Melfi F. et al. Technical review of the daVinci surgical telemanipulator. *Int. J. Med. Robot. And Comput. Assist. Surg.*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 394–406, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.1468>
- [3] Kuo C.H., Dai J.S., Dasgupta P. Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview. *Int. J. Med. Robot.*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 127–145, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.453>
- [4] Yang C., Ye W., Li Q. Review of the performance optimization of parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 2022, vol. 170, art. 104725, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104725>
- [5] Botello-Aceves S., Valdez S.I., Becerra H.M. et al. Evaluating concurrent design approaches for a Delta parallel manipulator. *Robotica*, 2018, vol. 36, no. 5, pp. 697–714, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574717000674>
- [6] Asadizeidabadi A., Hosseini S., Vetshev F. et al. Comparison of Da Vinci 5 with previous versions of Da Vinci and Sina: a review. *Laposc. Endosc. Robot. Surg.*, 2024, vol. 7, no. 2, pp. 60–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lers.2024.04.006>
- [7] Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Глазунов В.А. и др. Перспективные малоинвазивные робототехнические комплексы параллельной структуры. *Доклады РАН. Физика, технические науки*, 2020, т. 495, № 1, с. 84–88, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740020060206>
- [8] Angeles J. *Fundamentals of robotic mechanical systems*. Springer, 2007. 550 p.
- [9] Глазунов В.А., Филиппов Г.С., Шалюхин К.А. и др. Управление движением роботов и манипуляторов, применяемых в медицине. *Инновационное развитие подъемно-транспортного машиностроения «Подъемная сила»*. Мат. межд. форума. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, с. 67–69.
- [10] Шалюхин К.А., Левин С.В., Скворцов С.А. Разработка эндоскопического захвата для сшивания тканей при лапароскопических операциях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 7, с. 40–45, EDN: VJQZMP

- [11] Глазунов В.А., Ковалева Н.Л., Шалюхин К.А. Решение задачи о положении хирургического робота-ассистента для манипулирования эндоскопом SOLOASSIST® (AKTORMED). *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2024, № 4, с. 93–99, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2024_4_93
- [12] Антонов А.В., Ларюшкин П.А., Фомин А.С. Кинематический анализ нового пятипо-движного робота параллельной структуры типа “дельта”. *Известия РАН. МТТ*, 2024, № 4, с. 135–149.
- [13] Shalyukhin K.A. Control of a four-coordinate manipulator with a remote center of motion. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2024, vol. 53, no. 1, pp. 73–79, doi: <https://doi.org/10.1134/S1052618824010102>
- [14] Рабичева Т.С., Бровкина Ю.И., Глазунов В.А. и др. *Механизм параллельно-последовательной структуры с дополнительным линейным приводом*. Патент РФ 234496. Заявл. 29.05.2025, опубл. 29.05.2025.

References

- [1] Ganiev R.F., Glazunov V.A., Filippov G.S. Urgent problems of machine science and ways of solving them: wave and additive technologies, the machine tool industry, and robot surgery. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 5, pp. 16–25. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2018, vol. 47, no. 5, pp. 399–406, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618818050059>)
- [2] Freschi C., Ferrari V., Melfi F. et al. Technical review of the daVinci surgical telemanipulator. *Int. J. Med. Robot. And Comput. Assist. Surg.*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 394–406, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.1468>
- [3] Kuo C.H., Dai J.S., Dasgupta P. Kinematic design considerations for minimally invasive surgical robots: an overview. *Int. J. Med. Robot.*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 127–145, doi: <https://doi.org/10.1002/rcs.453>
- [4] Yang C., Ye W., Li Q. Review of the performance optimization of parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 2022, vol. 170, art. 104725, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104725>
- [5] Botello-Aceves S., Valdez S.I., Becerra H.M. et al. Evaluating concurrent design approaches for a Delta parallel manipulator. *Robotica*, 2018, vol. 36, vol. no. 5, pp. 697–714, doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574717000674>
- [6] Asadizeidabadi A., Hosseini S., Vetshev F. et al. Comparison of Da Vinci 5 with previous versions of Da Vinci and Sina: a review. *Laporosc. Endosc. Robot. Surg.*, 2024, vol. 7, no. 2, pp. 60–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lers.2024.04.006>
- [7] Veliev E.I., Ganiev R.F., Glazunov V.A. et al. Promising minimally invasive robotic surgical complexes with parallel structure. *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2020, vol. 495, no. 1, pp. 84–88, doi: <https://doi.org/10.31857/S2686740020060206> (in Russ.). (Eng. version: *Dokl. Phys.*, 2020, vol. 65, no. 11, pp. 409–412, doi: <https://doi.org/10.1134/S1028335820110099>)
- [8] Angeles J. *Fundamentals of robotic mechanical systems*. Springer, 2007. 550 p.
- [9] Glazunov V.A., Filippov G.S., Shalyukhin K.A. et al. [Motion control of robots and manipulators used in medicine]. *Innovatsionnoe razvitie pod'emno-transportnogo mashinostroeniya "Podemnaya cila". Mat. mezhd. foruma* [Innovative Development of Lifting and Transport Engineering "Lifting force". Proc. Int. Forum]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2025, pp. 67–69 (In Russ.).
- [10] Shalyukhin K.A., Levin S.V., Skvortsov S.A. Design and development of an endoscopic gripper for tissue suturing in the laparoscopic operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 7, pp. 40–45, EDN: VJQZMP (In Russ.).
- [11] Glazunov V.A., Kovaleva N.L., Shalyukhin K.A. Solution to the problem of positioning the surgical assistant robot for manipulation of the Soloassist® endoscope (Aktormed). *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2024, no. 4, pp. 93–99, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2024_4_93 (in Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2025, vol. 54, no. 7, pp. 812–820, doi: <https://doi.org/10.1134/S1052618825700360>)

- [12] Antonov A.V., Laryushkin P.A., Fomin A.S. Kinematic analysis of a novel 5-DOF delta-type parallel robot. *Izvestiya RAN. MTT*, 2024, no. 4, pp. 135–149. (In Russ.). (Eng. version: *Mech. Solids*, 2024, vol. 59, no. 4, pp. 1920–1929, doi: <https://doi.org/10.1134/S0025654424603355>)
- [13] Shalyukhin K.A. Control of a four-coordinate manipulator with a remote center of motion. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2024, vol. 53, no. 1, pp. 73–79, doi: <https://doi.org/10.1134/S1052618824010102>
- [14] Rabcicheva T.S., Brovkina Yu.I., Glazunov V.A. et al. *Mekhanizm parallelno-posledovatelnoy struktury s dopolnitelnyim lineynym privodom* [Mechanism of parallel-serial structure with additional linear drive]. Patent RU 234496. Appl. 29.05.2025, publ. 29.05.2025. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 03.04.2026

Информация об авторах

КОРОВУШКИН Вадим Валерьевич — младший научный сотрудник отдела механики машин и управления машинами. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, email: korovushkin00@mail.ru).

ПИЧУГИН Кирилл Александрович — научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: pichugin-ka@yandex.ru).

РОМАНОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории теории механизмов и структуры машин. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

ШАЛЮХИН Константин Андреевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и управления машинами. ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: constmeister@gmail.com).

Information about the authors

KOROVUSHKIN Vadim Valerievich — Junior Researcher, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, email: korovushkin00@mail.ru).

PICHUGIN Kirill Alexandrovich — Researcher, Laboratory of Theory of Mechanisms and Structures of Machines. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: pichugin-ka@yandex.ru).

ROMANOV Andrey Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher, Laboratory of Theory of Mechanisms and Structures of Machines. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: Dru.ny@mail.ru).

SHALYUKHIN Konstantin Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of Machine Mechanics and Machine Control. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101001, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: constmeister@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Коровушкин В.В., Пичугин К.А., Романов А.А., Шалюхин К.А. Моделирование и анализ качества системы управления приводами медицинского манипулятора. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 10, с. 28–35.

Please cite this article in English as:

Korovushkin V.V., Pichugin K.A., Romanov A.A., Shalyukhin K.A. Modeling and quality analysis of a medical manipulator actuator control system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 10, pp. 28–35.