

Анализ существующих конструкционных решений внутритрубных инспекционных роботов: выбор оптимального типа движения и шасси для 3D-сканирования рельефа сварного шва в сварных прямошовных трубах большого диаметра с использованием лазерного триангуляционного датчика

И.В. Михайлов, М.С. Яснов

Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева

Аннотация: В данной статье представлен обзор существующих конструкционных решений внутритрубных роботов, предназначенных для инспекционных работ. Основное внимание уделено анализу различных механизмов движения и типов шасси, используемых в таких роботах, а также выявлению их преимуществ и недостатков применительно к задаче сканирования продольного сварного шва. Рассмотрены такие типы роботов, как гусеничные, колесные, винтовые и те, которые движутся под действием давления внутри трубы. Особое внимание уделяется проблеме обеспечения стабильного и точного перемещения робота вдоль сварного шва, минимизации боковых смещений и выбору оптимальной системы позиционирования. На основании проведенного анализа предлагаются рекомендации по выбору наиболее подходящего типа движения и шасси для выполнения задачи построения 3D-модели сварного шва с использованием лазерного триангуляционного датчика.

Ключевые слова: внутритрубные роботы, инспекционные роботы, 3D сканирование, сварные швы, конструкционные решения, типы движения, шасси, гусеничные роботы, колесные роботы, винтовые роботы, продольные сварные швы, лазерный триангуляционный датчик.

Введение. Современное производство сварных труб требует высокого качества сварки и контроля сварных швов, чтобы избежать дорогостоящих последствий, таких как отзыв продукции, штрафы и ущерб репутации. Для этого используются различные методы неразрушающего контроля, включая визуальный осмотр, ультразвуковую дефектоскопию, рентгенографию и магнитопорошковый метод. Визуальный контроль важен как первый шаг в оценке качества сварного шва перед применением более сложных методов. Этот вид контроля, регламентированный международным стандартом ISO 17637/2003, позволяет быстро обнаруживать поверхностные дефекты и осуществлять предварительный отбор сварных швов для последующих испытаний.

Одним из перспективных направлений развития технологий визуального контроля качества сварных швов является использование автоматизированных систем визуального контроля с применением лазерной триангуляции [1]. Важная составляющая таких систем – устройства, способные перемещать внутри трубы лазерный триангуляционный датчик (ЛТД) вдоль поверхности сварного шва. Применение таких устройств позволит получать детальные трехмерные модели сварных швов в автоматическом режиме, что значительно повышает эффективность и точность контроля качества продукции.

Цель исследования заключается в анализе конструкционных решений внутритрубных инспекционных роботов и выборе оптимальных типов движения и шасси для 3D сканирования рельефа сварного шва в сварных прямошовных трубах большого диаметра с использованием лазерного триангуляционного датчика. В рамках исследования были рассмотрены различные типы роботов: гусеничные, колесные, винтовые, а также роботы, работающие под давлением. Анализировались их преимущества и недостатки, а также возможности использования для решения задач инспекции сварных швов. На основании анализа были сделаны выводы о выборе наиболее подходящего типа движения и шасси для построения трехмерной модели сварного шва. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых конструкционных решений внутритрубных инспекционных роботов, способных эффективно контролировать качество сварных швов в промышленных условиях.

Для достижения цели был проведен литературный обзор научных трудов и патентов за последние 5 лет с использованием ресурсов поисковых систем Google Scholar, Scopus, Web of Science, eLibrary, Google Patents по ключевым словам: внутритрубные инспекционные роботы; in-pipe inspection robots; типы движения роботов; types of robot movement; движение роботов

внутри труб; robot motion inside pipes; автоматизированные системы для реконструкции 3D модели сварного шва внутри трубы; automated systems for reconstructing a 3D model of the weld seam inside the pipe; автоматическое определение качества сварного шва; automatic determination of weld quality; реконструкция 3D модели сварного шва; reconstruction of a 3D model of the weld seam; анализ конструкционных решений роботов; analysis of robot design solutions.

Требования к системе перемещения ЛТД. Задача реконструкции трехмерной модели сварного шва с использованием ЛТД сводится к получению информации о траектории движения датчика или его носителя (например, автоматизированной тележки) и сопоставлению этой информации с данными лазерной триангуляции в каждый момент времени. Для эффективной работы системы перемещения ЛТД вдоль сварного шва необходимо учитывать следующие критические факторы:

1. Точность позиционирования датчика: система должна гарантировать высокую точность позиционирования, что обеспечит получение точных данных о геометрических параметрах сварного шва.
2. Стабильность и плавность движений: боковые и угловые отклонения в движении датчика могут привести к значительным ошибкам в измерениях, поэтому стабильность и плавность движений являются крайне важными аспектами.
3. Минимизация вибраций и колебаний: вибрации и колебания должны быть сведены к минимуму, чтобы обеспечить точность измерений.
4. Низкая инерционность: система должна обладать низкой инерционностью, что позволит ей оперативно реагировать на изменения в траектории движения.

5. Надежность и долговечность: механизмы системы перемещения должны быть надежными и долговечными, чтобы обеспечить бесперебойную работу в условиях интенсивной эксплуатации.
6. Компактность и простота монтажа: система должна быть компактной и легкой в установке, чтобы минимизировать влияние на производственную линию и облегчить интеграцию в существующую инфраструктуру.
7. Гибкость и адаптивность: система должна быть способна адаптироваться к трубам различного диаметра (530 - 1420 мм).

Существующие решения для внутритрубной инспекции.

Внутритрубные инспекционные роботы делятся на несколько категорий в зависимости от способа их передвижения: работающие под давлением (Pipeline Inspection Gauge - PIG), гусеничные (caterpillar), колесные (wheel), винтовые (screw), червячные (inchworm), разжимающие (wall press) и шагающие (walking) [2] (рис.1).

Основной принцип действия PIG основан на использовании потока транспортируемой среды (жидкости или газа) для перемещения устройства вдоль трубопровода. PIG запускается в трубу с помощью специального пускового устройства (PIG launcher) и перемещается под давлением потока продукта, который проходит через трубопровод. Это позволяет PIG двигаться на значительные расстояния без использования собственного источника энергии или сложной системы приводов, делая их эффективными для длинных трубопроводов, где требуется регулярная инспекция и очистка [2].

Гусеничные роботы отличаются высокой проходимостью и способностью преодолевать сложные участки трубопровода, включая вертикальные и горизонтальные участки. Они равномерно распределяют вес, что снижает риск повреждения трубопровода, и обеспечивают хорошее

сцепление с внутренними стенками, поддерживая стабильное движение. Однако их сложная конструкция, ограниченная маневренность и большой вес могут затруднять управление и эксплуатацию, а возможность накопления грязи и мусора в гусеницах требует дополнительного обслуживания [2].

Примером такого робота является "FAMPER", который использует четыре гусеничных модуля для передвижения по трубопроводам различной конфигурации. Он способен эффективно проходить через элементы с разными радиусами кривизны, включая эллиптические и квадратные секции [2].

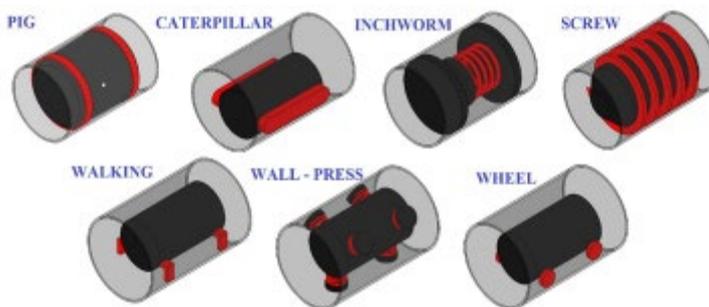


Рис. 1. - Разные типы передвижения внутритрубных инспекционных [2]

Шагающие роботы, использующие ноги для передвижения, обладают способностью адаптироваться к различным условиям окружающей среды. Среди преимуществ отмечаются возможность подъема по вертикальным поверхностям, преодоление препятствий и неровностей, а также минимальный контакт с поверхностью, что снижает риск повреждений. Однако они характеризуются сложной механикой и управлением, высокой стоимостью разработки и производства, а также потребностью в мощных источниках питания. Пример шагающего робота — шестиногая модель, которая планирует маршрут и передвигается по изогнутым трубам [2].

Червячные роботы, имитирующие движение червей посредством расширения и сокращения тела, выделяются высокой силой сцепления с поверхностью и способностью передвигаться по узким и извилистым трубам.

Тем не менее, они обладают низкой скоростью передвижения, ограниченной маневренностью, а также сложностью в управлении и навигации. Примером такого робота является червячный робот с самоблокирующимся механизмом, который усиливает сцепление и позволяет передвигаться по трубам с различными диаметрами [2].

На рис.1 представлены различные типы колесных внутритрубных роботов: (a) магнитные колеса, (b) стандартные колеса, (c) сферическое колесо, (d) самоориентирующееся колесо, всенаправленные колеса, (e) механум колеса.

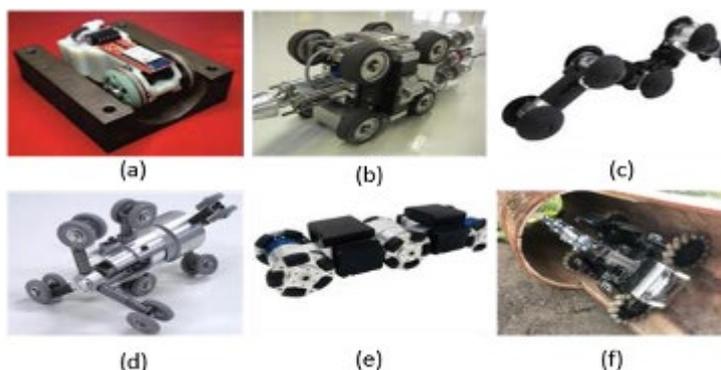


Рис. 2. - Разные типы колесных внутритрубных роботов [3]

Роботы колесного типа для внутритрубного контроля в последние годы приобрели значительную популярность благодаря нескольким ключевым преимуществам, которые делают их пригодными для выполнения различных инспекционных задач. Колесные модели известны своей простой конструкцией, которая упрощает их изготовление и обслуживание. Такая простота позволяет ускорить развертывание и снизить затраты на изготовление устройства и обучение операторов [3].

Колесные роботы способны перемещаться по трубопроводам различной конфигурации: горизонтальным, вертикальным и изогнутым участкам, а также трубам разного диаметра. Это делает их универсальными для применения в разнообразных сценариях контроля [3]. В колесных

моделях используют различные типы колес: механум, стандартные и магнитные. Магнитные колеса особенно эффективны при преодолении вертикальных участков в ферромагнитных трубах, что значительно расширяет область их применения [3]. Конструкция таких роботов минимизирует трение со стенками труб, продлевая срок службы как самого устройства, так и трубопровода, снижая частоту техобслуживания [3].

Исследователи активно работают над совершенствованием колесных моделей, улучшая их конструкцию, механизмы управления и функциональность. Эти усилия поддерживают актуальность данной технологии. Простота конструкции и удобство эксплуатации делают колесные роботы экономически выгодными по сравнению с другими типами, что привлекает организации, стремящиеся минимизировать затраты на инспекцию трубопроводов [3].

В статье [4] авторы описывают конструкцию робота, которая включает в себя четыре колеса типа механум, которые позволяют ему перемещаться в плоскости и вращаться вокруг своей оси (рис.3). Колеса расположены таким образом, что их оси пересекаются в одной точке, что обеспечивает автоматическое выравнивание робота вдоль центральной оси трубы. Контроль скорости вращения колес осуществляется с помощью программного управления, что позволяет точно позиционировать датчик относительно стенки трубы. Для поддержания устойчивости во время вращения робот оборудован стабилизирующим рычагом с набором свободно вращающихся роликов. Рычаг соединен с корпусом робота через параллельный четырехзвенный механизм, поддерживаемый газонаполненными амортизаторами. Это решение компенсирует гравитацию и обеспечивает постоянный контакт всех роликов с поверхностью трубы. Такая конструкция позволяет роботу эффективно передвигаться внутри

трубопровода и контролировать положение сенсора относительно стенки трубы.

Авторы статьи [4] наблюдали за определенным поведением, связанным с движением робота вдоль оси трубы, особенно в том, что касается угловых перемещений и вибраций. Конструкция робота включает механизмы, предотвращающие угловое движение вокруг оси z . Это достигается за счет продольного расстояния между колесами, что позволяет поддерживать постоянное направление движения в направлении трубопровода. Авторы подчеркивают, что регулирование угловых скоростей диагонально противоположных колес имеет решающее значение для предотвращения чрезмерных нагрузок на двигатель, тем более что робот ограничен по оси z . Стенка трубы эффективно предотвращает боковое смещение робота. Вместо этого робот спроектирован так, чтобы выполнять полные окружные вращения, необходимые для выполнения контрольных задач. Выбор такой конструкции означает, что боковые перемещения не являются основной проблемой во время работы, поскольку робот предназначен для поддержания контакта со стенкой трубы и вращения по мере необходимости. Хотя в статье прямо не упоминаются вибрации при прямом движении, авторы отмечают, что отсутствие подвески в конструкции робота приводит к значительным нагрузкам, когда колеса прижимаются к стенке трубы. Это может вызвать вибрацию или нестабильность во время работы, особенно если робот сталкивается с неровными поверхностями или перекосами. Таким образом, авторы отметили, что робот спроектирован таким образом, чтобы минимизировать угловые перемещения за счет тщательной настройки колес и управления ими. Боковые перемещения ограничиваются стенкой трубы, что обеспечивает эффективное перемещение по окружности. Однако потенциальная вибрация из-за отсутствия подвески и сил, действующих на колеса, может повлиять на производительность робота во время проверок.

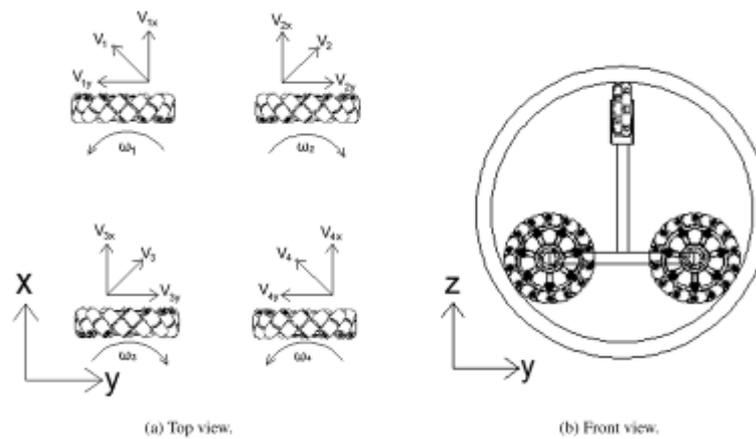


Рис.3. - Схема самоцентрирующихся меканум колес [4]

В работе [5] авторы подробно описывают конструкцию внутритрубного робота на стандартных колесах (рис.4). Авторы отмечают, что для эффективного перемещения робота важна синхронизация всех его частей. Ходовая часть обеспечивает линейное перемещение робота вдоль оси трубы, тогда как подъемная и сканирующая части отвечают за стабильность и точность позиционирования сенсора.

Во время движения робота авторы отмечают, что могут возникать некоторые отклонения от идеальной траектории, особенно если внутренняя поверхность трубы имеет неровности или другие дефекты. Также они указывают на возможные погрешности в работе механических компонентов робота, такие как люфты в зубчатых передачах и деформации колес, что может привести к небольшим угловым смещениям сенсора относительно оси трубы.

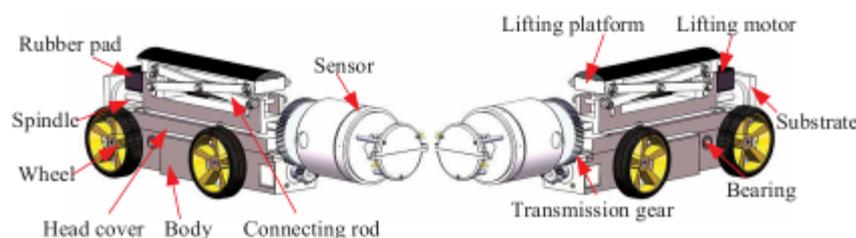


Рис. 4. - Структура внутритрубного колесного робота [5]

В работах [6,7,8] описаны внутритрубные роботы, использующие стандартные колеса для передвижения внутри трубопроводов, с добавлением опорного колеса на верхней части робота, как показано на рис. 5. Робот использует пружины, чтобы опорные колеса касались внутренней поверхности трубопровода. Эта опора помогает роботу перемещаться по горизонтальным и вертикальным трубопроводам.

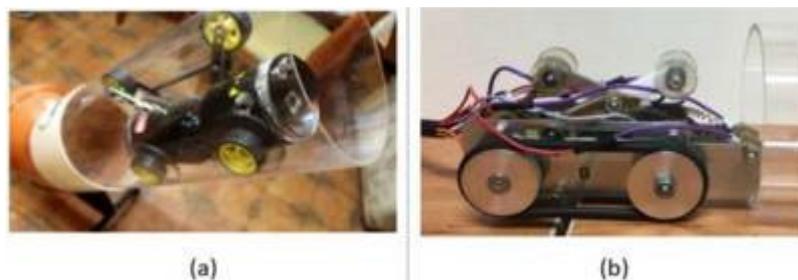


Рис.5. - Прототипы опрно-колесных типов внутритрубных роботов [3]

В статье [7] авторы упоминают, что при прямолинейном движении робота вдоль трубы угловые смещения отсутствуют, поскольку робот сохраняет свою ориентацию благодаря симметричной конструкции и использованию нескольких колес для поддержания стабильности. В статье напрямую не указано, возникают ли вибрации при движении робота. Однако авторы обсуждают проблемы, связанные с устойчивостью и маневренностью робота в сложных условиях, таких как изгибы и вертикальные участки труб. Они подчеркивают важность контроля контактных сил и угла наклона робота для обеспечения его стабильного движения. Вероятно, если бы вибрации возникали, это негативно сказалось бы на устойчивости и управляемости робота, поэтому можно предположить, что разработчики старались минимизировать этот эффект.

В статьях [9,10] описываются роботы для внутренней инспекции труб, способные передвигаться по сложным маршрутам внутри трубопроводов. Описаны три основных типа механизмов передвижения: винтовой привод,

параллельное многомодульное устройство и артикулированное колесное устройство. Каждый механизм имеет свои особенности и применяется в зависимости от условий эксплуатации.

Конструктивные особенности включают использование дифференциального механизма и комбинирование нескольких степеней свободы на одной оси для достижения компактности и эффективности роботов. Это позволяет создавать небольшие и высокоадаптируемые устройства, подходящие для работы в ограниченных пространствах. В своей работе [9] авторы упоминают о том, что роботы с винтовым приводом (рис. 6) могут испытывать угловое смещение при прохождении через прямые участки трубы.

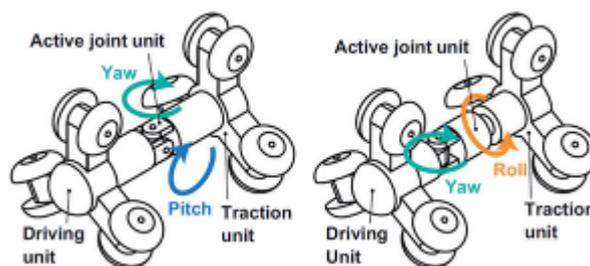


Рис.6. - Общий механизм передвижения в трубе [8]

Заключение. На основе проанализированных выше научных работ, посвященных конструктивным особенностям и механике движения внутритрубных роботов, выявлены следующие особенности, на которые можно ориентироваться при разработке системы автоматизированного визуального контроля сварных швов внутри труб на линии по производству сварных прямошовных труб большого диаметра:

- Метод перемещения робота типа PIG не подходит для системы сканирования сварного шва, так как: обеспечение потока жидкости или газа для перемещения датчика на линии по производству труб будет затруднительным; использование потока среды для перемещения не позволит

достичь нужного уровня контроля над положением и траекторией движения датчика; данный метод обычно рассчитан на стандартные размеры трубопроводов и не предусматривает возможности быстрого перехода между трубами разных диаметров.

- Гусеничные роботы демонстрируют хорошие показатели в плане проходимости и устойчивости, однако их применение связано с рядом технических сложностей, требующих учета при разработке и эксплуатации. Гусеничные роботы обладают большей инерцией, что затрудняет быструю реакцию на изменения в траектории движения, необходимые для точного следования вдоль сварного шва.

- Шагающие и червячные типы роботов испытывают сложности с поддержанием высокой точности позиционирования, необходимой для реконструкции сварного шва. Боковые и угловые отклонения могут привести к значительным ошибкам в измерениях. Червячные роботы, работающие на принципе расширения и сокращения, могут создавать нестабильные и прерывистые движения, что недопустимо для точной лазерной триангуляции. Шагающие роботы, несмотря на свою маневренность, также испытывают трудности с поддержанием плавности движений в узком пространстве трубопровода.

- Колесные модели обладают простой конструкцией, которая упрощает их изготовление и обслуживание. Колесные роботы могут перемещаться по трубопроводам различных конфигураций, включая горизонтальные, вертикальные и изогнутые трубы, а также трубы разных диаметров. Роботы, использующие механум колеса обеспечивают высокую мобильность, что позволяет обеспечить высокую точность позиционирования датчика, что гарантирует получение точных данных о геометрических параметрах сварного шва. Стабильное и плавное движение наблюдается и у роботов со стандартными колесами, это достигается за счет добавления прижимного

опорного колеса на верхней части робота, в этом случае боковые и угловые отклонения в движении робота не наблюдаются. Движение колесных роботов не создает вибраций конструкции, что также положительно влияет на работу ЛТД.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Астраханского государственного университета (Приоритет-2030).

Литература

1. Михайлов И.В., Алиагаев А.Р. Анализ и перспективы применения автоматизированных технологий и лазерной триангуляции для визуального контроля качества сварных швов на производстве прямошовных сварных труб большого диаметра // Инженерный вестник Дона. 2024. №. 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9324
2. Sugin Elankavi R., Dinakaran D., Jaise Jose Developments in inpipe inspection robot: a review // Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. 2020. №. 5. pp. 238-248.
3. Elankavi, R.S., Dinakaran, D., Chetty, R.K., Ramya, M.M., Samuel, D.H. A review on wheeled type in-conduit inspection robot // International journal of mechanical engineering and robotics research. 2022, 10, pp. 745–754.
4. VallsMiro J., Ulapane N., Shi L., Hunt D., and Behrens M. Robotic pipeline wall thickness evaluation for dense nondestructive testing inspection // Journal of field robotics. 2018. Vol. 35. pp. 1293–1310.
5. Zheng D., Tan H., Zhou F. A Design of endoscopic imaging system for hyper long pipeline based on wheeled pipe robot // 11TH Asian conference on chemical



sensors. Wuhan, China: AIP conference proceedings, 2017.
DOI:10.1063/1.4977316.

6. Roussialian M., Zanbarakji H.A., Khawand A., Rahal A., Owayjan M. Design and development of a pipeline inspection robot // Mechanism. Machine, robotics and mechatronics sciences. Cham: Springer, 2019. pp. 43-52.

7. Hadi A., Hassani A., Alipour K., Askari Moghadam R., Pourakbarian Niaz P. Developing an adaptable pipe inspection robot using shape memory alloy actuators // J. Intell. Mater. Syst. Struct.. 2020. vol. 31, no. 4. pp. 632–647.

8. Mohd Aras M. S. et al. Design and development of remotely operated pipeline inspection robot, in Proc. the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology. Singapore : Springer, 2021. pp. 15-23.

9. Kakogawa A. and Ma S. Unmanned robotic systems and applications. London: IntechOpen, 2020. - 110 pp.

10. Kazeminasab S., Akbari A., Jafari R., and Banks M. K. Design, Characterization, and Control of a Size Adaptable In-pipe Robot for Water Distribution Systems // 22nd IEEE International conference on industrial technology (ICIT). NY, USA: IEEE, 2019. pp. 39-46.

References

1. Mikhaylov I.V. , Aliagaev A.R.. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №. 7
URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9324

2. Sugin Elankavi R., Dinakaran D., Jaise Jose. Journal of mechanics of continua and mathematical sciences. 2020. №. 5. pp. 238-248.



3. Elankavi, R.S., Dinakaran, D., Chetty, R.K., Ramya, M.M., Samuel, D.H.. International journal of mechanical engineering and robotics research. 2022, 10, pp. 745–754.
4. VallsMiro J., Ulapane N., Shi L., Hunt D., and Behrens M.. Journal of field robotics. 2018. Vol. 35. pp. 1293–1310.
5. Zheng D., Tan H., Zhou F.. A 11TH Asian conference on chemical sensors. Wuhan, China: AIP conference proceedings, 2017. DOI:10.1063/1.4977316.
6. Roussialian M., Zanbarakji H.A., Khawand A., Rahal A., Owayjan M.. Mechanism. Machine, robotics and mechatronics sciences. Cham: Springer, 2019. pp. 43-52.
7. Hadi A., Hassani A., Alipour K., Askari Moghadam R., Pourakbarian Niaz P.. J. Intell. Mater. Syst. Struct.. 2020. vol. 31, no. 4. pp. 632–647.
8. Mohd Aras M. S. et al. In Proc. the 11th National Technical Seminar on Unmanned System Technology. Singapore : Springer, 2021. pp. 15-23.
9. Kakogawa A. and Ma S. Unmanned robotic systems and applications. London: IntechOpen, 2020. 110 pp.
10. Kazeminasab S., Akbari A., Jafari R., and Banks M. K.. 22nd IEEE International conference on industrial technology (ICIT). NY, USA: IEEE, 2019. pp. 39-46.

Дата поступления: 18.11.2024

Дата публикации: 26.12.2024