

Номер 1

ISSN: 2658-5782

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org



ISSN 2658-5782

Многофазные системы

http://mfs.uimech.org/mfs2025.1.006 DOI 10.21662/mfs2025.1.006 УДК / UDC 621.865.8, 004.942 Получена / Received 3.02.2025 Принята / Accepted 13.03.2025



20 (2025) 1: 33-44

Синтез конструкции инспекционного модульного робота

Н.О. Круглов^{1,2}, Д.Р. Богданов¹[™], И.Ш. Насибуллаев³

¹ Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

³ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

E-mail: dr_bog@mail.ru

В работе представлена методика проектирования компьютерных моделей мобильных роботов предлагаемой конструкции, а также показаны результаты компьютерных симуляций с использованием алгоритмов по определению траектории движения. Методика включает в себя создание конструкции модульного робота с использованием системы проектирования Solidworks, его компьютерной модели в пакете программирования ROS и проведение симуляции поведения полученной модели в среде Gazebo. Разработан алгоритм перемещения модульного колесного робота, состоящего из модулей с подвижной колесной парой. Преимуществом предлагаемой реализации конструкции модулей по сравнению с модулями с фиксированной колесной парой является то, что ведомые модули приобретают возможность точного повторения траектории ведущего модуля. Следствием чего являются повышение проходимости при движении робота на плоскости с обходом препятствий и увеличение точности выполнения работы («сканирование» поверхности, ремонт, очистка и т.д.) при его использовании в качестве трубного инспекционного робота. Результаты компьютерной симуляции показали, что поведение полученной модели робота соответствует вычислительным экспериментам, проведенным на базе ранее разработанных математических моделей. В статье раскрыты все этапы методики в применении к разработке компьютерной модели колесного модульного мобильного робота. В ходе проведенных симуляций было подтверждено, что наличие поворотных колесных пар в модулях робота действительно позволяет исключить отклонения траекторий ведомых модулей от траектории ведущего модуля. С учетом полученных результатов построен макет трехзвенного колесного робота на базе модулей с подвижной колесной парой. Для проверки работоспособности собранного макета и корректности установки приводов собрана управляющая схема на базе отладочной платы STM32F407 Discovery и драйверов шагового двигателя. Показаны возможности применения методики для проведения компьютерных экспериментов по исследованию кинематики и динамики перспективных конструкций модульных роботов в рабочих пространствах со сложной топологией, например, в трубопроводах.

Ключевые слова: мобильный модульный колесный робот, математическая и компьютерная модель, прототип робота, ROS, Gazebo

Работа выполнена в рамках государственного задания № 123020700078-8 (FMRS-2023-0016).

Synthesis of an inspection modular robot's design

N.O. Kruglov^{1,2}, D.R. Bogdanov¹[™], I.Sh. Nasibullayev³

¹ Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa

² Ufa State Oil Technical University, Ufa

³ Ufa University of Science and Technology, Ufa

E-mail: dr_bog@mail.ru

The paper presents a methodology for designing computer models of mobile robots, and also shows the results of computer simulations using mathematical algorithms to determine the trajectory of the robot. The methodology includes creating a modular robot design using the Solidworks design system, creating its computer model in the ROS programming software, and simulating the behavior of the model in the Gazebo simulation environment. An algorithm for moving a modular wheeled robot consisting of modules with a movable wheel pair has been developed. The advantage of this algorithm compared to the previous one (with modules with a fixed wheel pair) is that the slave modules follow strictly along the trajectory of the leading module. This increases the cross-country ability when the robot moves on a plane bypassing obstacles and increases the accuracy of work (scanning, repair, cleaning, etc.) in the configuration of a pipe inspection robot. The simulation results showed that the behavior of the robot model corresponds to computational experiments conducted on the basis of previously developed mathematical models. The technique was applied to the development of a computer model of a

wheeled modular mobile robot. During the simulations, it was found that the presence of movable wheel pairs in the robot modules allows eliminating deviations in the trajectories of slave modules from the trajectory of the leading module. Taking this into account, a model of a three-link wheeled robot was built based on modules with a movable wheel pair. To check the operability of the assembled model and the correctness of the drive installation, a control circuit was assembled based on the STM32F407 Discovery debug board and stepper motor drivers. The resulting technique can be used to conduct computer experiments to study the kinematics and dynamics of the developed designs of modular robots in workspaces with a complex topology, for example, in pipelines.

Keywords: mobile modular wheeled robot, mathematical and computer model, robot prototype, ROS, Gazebo

1. Введение

Большая часть материальных ресурсов и энергоносителей для современного производства доставляется или распределяется внутри предприятий посредством развитой системой трубопроводов, конструкция которых и используемые материалы зависят от типа транспортируемых продуктов: воздух, вода, газ, нефтепродукты, отходы производства и т.д. Многие технологии имеют критическую зависимость от поставок энергоносителей, поэтому поддержание работоспособности трубопроводов (а именно, постоянный оперативный контроль, периодическая диагностика, предупреждение аварийных ситуаций) является актуальной задачей, реализация которой большинством эксплуатантов (м.б. субъектов, осуществляющих эксплуатацию) видится в использовании специализированных роботов и робототехнических комплексов (РТК). От магистральных нефтегазопроводов системы жилищных и производственных трубопроводов отличаются более сложной топологией, большим разнообразием материалов и типоразмеров используемых труб, что ведет к необходимости разработки специфических РТК, эксплуатационные характеристики которых должны удовлетворять следующим требованиям:

- сохранение возможности эффективной работы в широком диапазоне размеров труб;
- высокая толерантность к материалу трубопроводов;
- высокая адаптивность к форме внутреннего пространства трубопровода и наличию препятствий;
- достаточно высокая скорость перемещения (учитывая протяженность трубопроводов) и т.д.

Существующие в настоящее время инспекционные роботы [1] имеют ряд особенностей и ограничений:

- Магистральные роботы используются в нефтепроводах и ориентированы на трубы фиксированного диаметра с малой кривизной [2].
- Инспекционные роботы используются на заводах с трубопроводами со сложной топологией. Также роботы состоят из последовательно связанных активных (обеспечивающих движение модуля с помощью прижимающихся к стенке трубы радиально расположенных колес) и пассивных (для проведения сканирования, ремонта, очистки и т.п. стенки

трубы) модулей [3], могут переходить в ответвления трубы и двигаться в трубах с небольшим изменением диаметра. Если ответвление имеет значительно меньший диаметр, чем основная труба, то робот не сможет в нее перейти.

- 3. За счет специальной распорной конструкции модульные роботы для муниципальных трубопроводов могут работать в более широком диапазоне диаметров труб. Например, в [4] дано описание робота, состоящего из активных и пассивных модулей, который может перемещаться в трубах с Ø130 ÷ 200 мм, а в работе [5] представлен робот, состоящий из двух модулей, перемещающийся в трубах с Ø300 ÷ 500 мм со скоростью до 18 см/с, что меньше, чем у колесных роботов классической компоновки;
- 4. Змееподобные роботы состоят из нескольких модулей и двигаются с помощью последовательности изменений конфигурации, что ограничивает их скорость перемещения. В работе [6] представлен робот, способный перемещаться по внутренней или внешней поверхности трубы с Ø7.5 ÷ 30 см со скоростью до 2 см/с.
- 5. Магнитные роботы удерживаются на поверхности трубы с помощью магнитов и, по сравнению с модульными роботами, могут перемещаться по системе труб с более широким диапазоном диаметров. В работе [7] представлен робот для перемещения в металлических трубопроводах с Ø5 ÷ 125 см. Применение таких роботов в коммунальных трубопроводах, изготовленных в большей степени из немагнитных материалов, сильно ограниченно.
- Колесные роботы могут развивать скорость, достаточную для перемещения по протяженным трубопроводам, но имеют ограниченную проходимость, связанную с дефектами поверхности и препятствиями.
- По сравнению с колесными роботами гусеничные роботы имеют более высокую проходимость, но меньшую скорость перемещения при значительном расходе энергии. Кроме того, высокая сила трения гусениц при контакте с поверхностью трубы может ее повредить.

Для преодоления этих ограничений авторами работы была предложена новая конструкция модульного колесного робота (МКР), который перемещается по внутренней поверхности трубы по траектории винтовой линии [8]. Для создания этого робота необходимо разработать динамические модели, учитывающие возможность реконфигурации (изменения взаимного положения) модулей.

В.Е. Павловским [9] была предложена двумерная динамическая модель модульного колесного робота в виде системы дифференциальных уравнений связей, допускающих два частных решения: движение по прямой и по окружности. В следующей работе [10] получены аналитические решения с использованием специальных функций (интегралы Френеля) для движения робота по траекториям (прямая, окружность, спираль) и определены моменты, которые необходимо приложить к колесам модулей для реализации движения по заданным траекториям.

В работе [11] построена математическая модель динамики модульного робота (один или два жестко связанных активных или пассивных модуля) в трубе круглого сечения на базисе уравнений Эйлера–Лагранжа, а также проведена ее экспериментальная проверка. Были определены параметры, влияющие на движение (силы трения качения и скольжения; момент инерции робота), и параметры самого движения (время остановки робота, ширина зоны застоя, скорость движения, ускорение, период и количество колебаний, амплитуда колебаний). Аналитические и численные результаты находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов.

Трехмерная компьютерная модель конфигурации модулей робота вне и внутри трубы представлена в работе [8] в виде базовых шаблонов траекторий перемещения (по плоскости, окружности, винтовой линии, вдоль трубы) и их комбинаций (переход робота с одной конфигурации, соответствующей некоторому шаблону, на другую). В рассмотренных работах было показано, что ведомые модули отклоняются от траектории движения ведущего модуля в зависимости от выбранного шаблона движения (аналогичная особенность присутствует и в макросистемах, например, при движении автопоезда [12]).

Использование специальных функций в аналитических решениях при движении по шаблонам траекторий и численное решение системы дифференциальных уравнений при движении по произвольной траектории требуют больших вычислительных ресурсов, что затрудняет использование моделей в системе управления роботом. В работе [13] представлены быстросчетные алгоритмы расчета траекторий перемещения модулей мобильного модульного колесного робота на плоскости.

Для визуализации результатов моделирования и для исследования динамического поведения робота с учетом окружающей среды используются различные специализированные программные продукты, называемые робототехническими симуляторами. Среди существующих программ симуляции можно выделить как проприетарное ПО (RoboDK [14], CoppeliaSim [15],

RoboLogix [16] — для моделирования промышленных роботов), так и свободное ПО (SimSpark [17] — моделирование взаимодействия многоагентных систем, Webots [18] и Gazebo [19]).

Главной задачей большинства робототехнических симуляторов являются непосредственно расчет и симуляция взаимодействия компонентов робота между собой и с окружающей средой, что ограничивает их возможности по проектированию функциональных компонентов роботов и их управляющих систем некоторым набором готовых решений. По этой причине в настоящее время разработка новых модельных решений в области робототехники проводится на базе специализированной операционной системы по разработке роботов — Robotics Operation System, ROS [20]. Данный программный продукт предоставляет пользователю набор базовых функций и алгоритмов для создания новых моделей роботов в виде взаимосвязи отдельных узлов графа и поддерживается наиболее популярными на данный момент робототехническими симуляторами (CoppeliaSim, Webots, Gazebo). Разработанную цифровую модель робота можно привязать к его физическому прототипу (с использованием его контроллеров, приводов, датчиков и т.д.), реализуя тем самым концепцию проектирования с использованием цифровых двойников. Создание модели робота в симуляторе с использованием ROS заключается в разработке проекта, включающего в себя файлы геометрии составных частей робота (форматы STL, Collada, OBJ) и файлы с информацией об элементах робота в формате URDF (Unified Robot Description Format). Формат URDF — это унифицированный формат описания робота, содержащий информацию по связям между элементами (жесткое соединение, контакт, шарнир и т.д.) и свойства самих элементов (координаты элемента, ориентация, масса, тензор момента инерции). Стандартные средства ROS позволяют создавать простую геометрию, основанную на примитивах (параллелепипед, цилиндр, сфера), которая прописывается вручную в виде URDF файла.

Однако для создания более сложной геометрии робота используют сторонние программы, такие как программа трехмерной графики Blender или различные САПР (Salome Meca [21], FreeCAD [22], Solidworks [23]). При помощи Blender [24] можно создать модель конструкции робота путем соединения ее компонентов при помощи шарниров, а встроенный язык программирования Blender Python API позволяет программировать цифровой двойник робота, считывать его кинематику и управлять через USB реальным роботом (пример моделирования и управления рукой-манипулятором показан в [25]). Преимуществом использования САПР при разработке модели робота, помимо создания сложной геометрии, является возможность автоматического расчета массы и тензора момента инерции его компонентов, которые необходимы при симуляции модели.

В настоящей работе показаны результаты выполнения первых этапов проекта по разработке инспекционного РТК, удовлетворяющего большинству предъявляе-

мых к ним требований. По результатам проведенного анализа известных конструкторских и технологических решений в качестве базового варианта разработки был выбран класс змееподобных роботов (мобильных модульных роботов) как обладающий высоким потенциалом обслуживания трубопроводов в широком диапазоне диаметров. На практике реализуются два варианта перемещения таких роботов внутри трубы: во-первых, за счет изменения взаимного положения звеньев робота с опорой на стенки (бесколесные роботы) [26, 27] вовторых, за счет качения (колесные роботы) [28]. Немаловажным фактором в пользу сделанного выбора является то, что модульные РТК обладают свойством реконфигурироваться, что позволяет им легко адаптироваться в соответствии с изменениями внешней среды, окружающей обстановки или специфическими конструктивными требованиями для выполнения заданной функции. Реконфигурируемость роботов реализуется за счет следующих конструктивных решений:

- использование универсальных соединительных механизмов, силовых и информационных интерфейсов [28] (конфигурация модулей меняется за счет изменения соединений модулей друг относительно друга);
- применение многостепенных сочленений между модулями [29, 30] (конфигурация меняется за счет изменения взаимного положения модулей в сочленениях).

В статье показаны базовые подходы проектирования инспекционного мобильного робота, основные конструктивные решения, позволяющие реализовать принципы модульности и реконфигурируемости, в комплексе с моделями и алгоритмами управления.

2. Постановка задачи

Для удовлетворения требований, предъявляемых к инспекционным РТК, необходимо выполнить комплекс работ, который включает в себя разработку конструкции модуля робота, синтез универсальных механических и информационных интерфейсов между модулями, а также разработку алгоритмов формирования взаимного расположения модулей (конфигураций робота). Выбор конфигурации робота зависит от ряда факторов: типа участка трубы, выбранного способа перемещения (змеевидное, качение, шагание), выполняемой операции и пр. Так, для одного и того же участка трубы может потребоваться как движение робота с наиболее высокой скоростью, которая достигается при качении модулей (например, в виде спирали с опорой на стенки трубы), так и медленное перемещение за счет использования змееподобного движения с одновременным изменением конфигурации части робота (например, при сужениях трубы по ходу движения, наличии ответвлений или препятствий в трубе), т.е. реконфигурация робота должна быть динамической.

С учетом вышеизложенного был сформирован набор основных требований к конструкции и системе управления разрабатываемого РТК, часть из которых была ранее рассмотрена в работах [8, 11, 13], и определены задачи, которые необходимо решить, чтобы эти требования удовлетворить:

- разработка конструкции с возможностью наращивания количества модулей и обеспечивающей достаточную подвижность их друг относительно друга для перемещения по заданной траектории в трубопроводе и формирования необходимых конфигураций;
- обеспечение возможности жесткой фиксации модулей друг относительно друга при формировании статичной конфигурации части робота (например, для преодоления препятствий, перемещения в ответвлениях и т.д.);
- определение и разработка шаблонов движения робота для различных участков трубопровода и типов движения;
- формирование для каждого шаблона (по необходимости) своей конфигурации робота и алгоритма движения;
- обеспечение высокой скорости динамической реконфигурации во время движения в случае, когда робот одновременно реализует несколько разных шаблонов движения.

При проведении исследования необходимо использовать технологии цифровых двойников, что позволит сократить время разработки опытного образца, а разработка достоверной и адекватной модели трубопровода как рабочей среды предоставит возможность отладки алгоритмов управления уже на этапе компьютерного моделирования конструкции.

3. Математическая модель

На рис. 1 показаны геометрия робота и траектория движения первого модуля. Используется декартовая система координат: начало системы координат O соответствует положению геометрического центра (ГЦ) первого модуля при переходе с прямолинейной траектории L_1 на круговую L_c ; ось Ox направлена вдоль движения на первом участке траектории L_1 , а ось Oy — перпендикулярно, образуя правую систему координат.

В модели рассматривается движение робота, состоящего из *n* последовательно соединенных шаровыми шарнирами модулей, с координатами ГЦ модулей $(x_{j,i}, y_{j,i})$, где j = 1, ..., n, а i — номер шага по времени. Первый (ведущий) модуль движется по заданной траектории, состоящей из трех частей: прямолинейной с длиной L_1 ; дуги окружности с длиной $L_c = R\alpha$, где R радиус окружности и α — центральный угол; прямолинейной с длиной L_2 . Номер шага по времени, соответствующего началу движения по этим частям траектории,



Рис. 1. Геометрия робота и траектория движения ведущего модуля

обозначим i_1 , i_2 и i_3 . Геометрические размеры модулей $\tilde{L}_{j,i}$, определяемое из теоремы Пифагора (рис. 2): определяются расстоянием от ГЦ до центра шарнира L_b (вынос шарнира относительно ГЦ), расстоянием от ГЦ до крайней точки колеса *L*_w (2*L*_w – расстояние между колесами) и радиусом колес R_w .

Сначала перемещаем *j*-й модуль на величину $\lambda L_{i,i}$, где 0 ≤ λ ≤ 1. Новое положение ГЦ *j*-го модуля определяется координатами:

$$\tilde{x}_{j,i} = x_{j,i-1} + \lambda L_{j,i} \cos \beta_{j,i-1},$$

$$\tilde{y}_{i,i} = y_{i,i-1} + \lambda L_{i,i} \sin \beta_{i,i-1},$$

где

$$\begin{split} L_{j,i} &= \Delta x_{j,i} \cos \beta_{j,i} + \Delta y_{j,i} \sin \beta_{j,i} - \\ &- \Big\{ L_b^2 + \Delta x_{j,i} \Delta y_{j,i} \sin(2\beta_{j,i}) + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\Delta x_{j,i}^2 - \Delta y_{j,i}^2 \right) \cos(2\beta_{j,i}) - \\ &- \frac{1}{2} \left(\Delta x_{j,i}^2 + \Delta y_{j,i}^2 \right) \Big\}^{1/2}. \end{split}$$

Затем поворачиваем модуль по формуле

$$\beta_{j,i} = \arctan\left(\frac{y_{j-1,i} - \tilde{y}_{j,i} - L_b \sin \beta_{j-1,i}}{x_{j-1,i} - \tilde{x}_{j,i} - L_b \cos \beta_{j-1,i}}\right)$$

Для восстановления сцепления в шарнире с предыдущим модулем перемещаем *j*-й модуль на расстояние

$$\tilde{L}_{j,i} = \sqrt{\Delta \tilde{x}_{j,i}^2 + \Delta \tilde{y}_{j,i}^2} - L_b,$$

гле

$$\Delta \tilde{x}_{j,i} = x_{j-1,i} - L_b \cos \beta_{j-1,i} - \tilde{x}_{j,i},$$

$$\Delta \tilde{y}_{j,i} = y_{j-1,i} - L_b \sin \beta_{j-1,i} - \tilde{y}_{j,i}.$$

При движении по криволинейной траектории траектории ведомых модулей и ведущего будут отличаться друг от друга (рис. 3). Для того чтобы траектории совпадали, необходимо внести конструктивные изменения колесная пара должна иметь дополнительную степень свободы (поворот в плоскости движения робота относительно вертикальной оси).

Приведем описание алгоритма нахождения положения модулей с подвижной колесной парой, где ведомые модули точно повторяют траекторию движения ведущего модуля (рис. 4).

Пусть траектория движения ГЦ ведущего модуля задана в параметрическом виде:

$$x_0 = x(t), \quad y_0 = y(t),$$

где t — время.

Дополнительно введем угол между продольной осью модуля и горизонтальной осью α₀. Тогда положение шарового шарнира с выносом L_b будет

$$x_b = x_0 - L_b \cos \alpha_0, \quad y_b = y_0 - L_b \sin \alpha_0.$$
 (1)



Рис. 2. Схема алгоритма перемещения ведомого модуля с фиксированной колесной парой



Рис. 3. Начальное (сверху) и промежуточное (в середине) положение модулей. Траектории движения ведущего модуля (черные линии) и ведомых модулей (цветные линии) для робота, состоящего их 10 модулей (внизу)

Положение ведомого модуля определяется как пересечение окружности радиуса *L* с центром, заданным согласно (1), и параметрически заданной кривой

$$x_i = x(t_i), \quad y_i = y(t_i),$$

где параметр t_i неизвестен и определяется из уравнения окружности:

$$(x_0 - L_b \cos \alpha_0 - x_i(t_i))^2 + (y_0 - L_b \sin \alpha_0 - y_i(t_i))^2 = L_b^2$$

Угол поворота продольной оси ведомого модуля определяется как

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{y_0 - L_b \sin \alpha_0 - y_i(t)}{x_0 - L \cos \alpha_0 - x_i(t)}\right)_{t=t_i}$$

Угол поворота колесной пары ведомого модуля определяется кривизной поверхности:



Положения всех последующих модулей определяются по положению предыдущего модуля аналогичным образом. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4.

4. Реализация конструкции

Исходя из результатов математического моделирования эскизного проекта модульного колесного робота (МКР) и с учетом необходимости обеспечить пространственную реконфигурацию робота во время его движения, была выбрана следующая компоновка робота: соединение между модулями выполняется с помощью трехосевого шарнира, а для устранения отклонений траекторий ведомых и ведущего модулей на криволинейных участках траектории используется поворот колесной пары. Верификация конструкторских решений и отладка элементов проводилась на рабочем макете робота, состоящего из 3-х модулей (рис. 5), компоненты которого были разработаны с помощью САПР Solidworks. Шарнир реализован как комбинация сферического подшипника скольжения и вращательного шарнира, при этом изменение положения модулей по двум координатам осуществляется четырьмя линейными сервоприводами (рис. 6(в)), а вращение выполняется шаговым двигателем с редуктором, находящимся внутри одного из сопряженных модулей (рис. 6(a)).

Перемещение робота осуществляется с помощью мотор-колес (МК) с интегрированными шаговыми двигателями (ШД) (рис. 6г), при изменении соотношения скоростей вращения или направления которых возможно получение любых траекторий. Поворот колесной пары (КП) осуществляется с помощью системы тяг, управляемых сервоприводом (рис. 6(б)). При этом оси поворота колес проходят через их геометрический центр, что позволяет повысить маневренность модуля и минимизировать его размеры.

Из разработанных компонентов конструкции робота, изготовленных на 3D принтере Form3 фирмы



Рис. 4. Схема алгоритма перемещения ведомого модуля с подвижной колесной парой (слева) и результат компьютерного моделирования (справа)



Рис. 5. САПР модель МКР



Рис. 6. Конструкция модуля робота и его составных частей: а) привод поворота вокруг оси *Оу*; б) привод поворота осей колес; в) линейный привод; г) мотор-колесо



Рис. 7. Макетный образец трехсекционного МКР



Рис. 8. Электрическая схема приводов одного модуля МКР

FormLabs, был собран макетный образец МКР, состоящий из 3-х модулей с установленными в них двигателями (рис. 7).

Для проверки работоспособности собранного макета и корректности установки приводов была собрана управляющая схема на базе отладочной платы STM32F407 Discovery и драйверов шагового двигателя (рис. 8). Расчет скоростей колес модулей и углов, задающих положение модулей друг относительно друга, осуществляется на уровне управляющего компьютера (PC). Результаты расчета в последующем используются для формирования необходимых управляющих воздействий для шаговых двигателей (сигналы DIR1-DIR3, PULS1-PULS3) и сервоприводов (сигналы PWM1-PWM5) с помощью микроконтроллера STM32F407.

Результаты экспериментов в виде перемещения модулей робота друг относительно друга в результате вращения в шарнире (соединяющем модули) относительно его осей Ox, Oz с помощью линейных приводов и относительно оси Oy с помощью шагового двигателя показаны на рис. 9(а) и 9(б).

Дальнейшая модификация конструкции и получение требуемых динамических параметров требуют проведения верификации полученных моделей, создания модели окружающей среды и инкапсуляции цифровых двойников в систему управления.

5. Компьютерное моделирование

Изготовление реального робота, синтез архитектуры, алгоритмов системы управления и ее реализация, изготовление модели трубопровода для проведения полномасштабных натурных экспериментов являются многопараметрической и трудоемкой задачей. Поэтому параллельно с изготовлением прототипа робота и его математических моделей была поставлена задача по созданию его компьютерной модели, а также компьютерной модели окружающей среды, в которой можно провести полноценную симуляцию всех режимов его работы.

На первом этапе была создана упрощенная модель конструкции модульного колесного робота с использованием САПР Solidworks, отдельные компоненты которого показаны на рис. 10. Для упрощения модели конструкция поворота колес за счет системы тяг (как в конструкции макета МКР) была заменена поворотной платформой, на которой расположена ось колес. Пример сборки



Рис. 9. Демонстрация работы макетного образца модуля МКР: а) работа линейных приводов для поворота модуля вокруг осей Ox и Oz; б) работа привода для поворота модуля вокруг оси Oy



Рис. 10. Компоненты МКР: а) корпус; б) колесо; в) платформа подвижной колесной пары



Рис. 11. Пример модели трехсекционного МКР



Рис. 12. Подготовленная к экспорту модель конструкции МКР



Рис. 13. Пример модели МКР в среде симулятора Gazebo

модульного мобильного робота, состоящего из трех секций, представлен на рис. 11.

Количество секций мобильного робота может варьироваться в зависимости от поставленной задачи. Для моделирования робота в виртуальной среде с использованием робототехнического симулятора требуется модель, основанная на поверхностных геометрических моделях, поскольку вычислительные алгоритмы симуляторов не позволяют работать с твердотельными моделями напрямую. Данная цель достигается с помощью специального инструмента, встроенного в функционал пакета Solidworks [31], который на базе информации о конструкции робота (масса, инерция, свойства кинематических связей) генерирует URDF-файл описания компьютерной модели робота для программной среды ROS. Перед применением экспортера необходимо провести предварительную подготовку экспортируемой модели в САПР. Для всех компонентов сборки указываются связанные с ними системы координат. За начало координат рекомендуется принять центр симметрии детали, точку на оси симметрии или центр масс. Для моделирования и расчета инерционных параметров сегментов (масса, координаты центра масс, а также тензор инерции) экспортер будет использовать данные о материалах деталей в САПР, заданные для деталей сборки [32]. На рис. 12 представлен пример модели, подготовленной к процедуре экспорта.

После выполнения процедуры экспорта получено URDF-описание робота, в котором отражаются кинематические связи между компонентами конструкции, а также параметры массы и инерции используемой модели для визуализации в среде симуляции и расчета физических взаимодействий для звеньев модели между собой. Для учета взаимодействия полученной модели с другими объектами в среде симуляции к описанию (при необходимости) вручную добавляются необходимые параметры, например, коэффициент трения.

Полученный в результате экспорта проект робота в ROS уже может быть загружен в среду симуляции (рис. 13). Модель семисекционного модульного мобильного робота, загруженная в среду симуляции Gazebo имеет следующую структуру:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<robot name="..."
xmlns:xacro="http://www.ros.org/wiki/xacro">
<link name="..."
<link name="...">
<inertial>
...
</inertial>
...
</visual>
...
</visual>
...
</visual>
...
</collision>
...
</link>
<joint name="..." type="...">
...
<parent link="..." />
<child link="..." />
...
```

```
</joint>
<gazebo reference="..._link">
<sensor type="..." name="...">
...
<ray>
...
</ray>
<plugin name="..." filename="...">
<topicName>..._link</frameName>
<frameName>..._link</frameName>
</plugin>
</sensor>
</gazebo>
<gazebo>
<plugin name="..." filename="...">
...
</plugin>
</gazebo>
</gazebo>
</rable>
</rable>
```

Однако компьютерная модель робота на данном этапе является неполной, поскольку в ее описании отсутствуют данные о системе управления, приводах и сенсорах, а также описание условий (свойств) виртуальной среды симуляции.

Для обеспечения движения модели робота в его URDF-описание необходимо добавить контроллеры приводов, которые обеспечивают управление движением модулей робота в среде симуляции. На официальном сайте робототехнического симулятора Gazebo приведен список готовых контроллеров, подходящих для использования совместно с ROS, например, контроллеры дифференциального привода и гусеничного привода [33]. В этом случае в URDF-описание модели необходимо добавить элемент <gazebo> с описанием параметров подключаемого контроллера. В параметрах указываются имена шарниров, которыми управляет контроллер, динамические характеристики создаваемого привода и входной топик, через который осуществляется управление шарнирами робота. Характеристики робота для контроллера приводов могут быть заданы как непосредственно в URDF-описании (внутри элемента <gazebo>), так и переданы отдельно в виде файла конфигурации формата *.yaml.

Существующий готовый драйвер ROS для Gazebo позволяет управлять только двумя шарнирами модели, образующими дифференциальный или гусеничный привод. Для разрабатываемой модели модульного мобильного робота данного функционала недостаточно, поскольку в проектируемой модели, помимо дифференциального привода колес, предполагается управление шарнирными соединениями между модулями для обеспечения реконфигурации робота при движении в пространстве со сложной топологией. Также предполагается управление подвижной платформой, на которой размещаются колеса модуля для исключения отклонений траекторий ведомых модулей робота от траектории ведущего модуля. Для реализации данных функций необходимо разработать собственный контроллер приводов на языках программирования *Python* или *C*++, который поддерживает ROS для создания пользовательских плагинов. В качестве объектов используются файлы с опи-

санием их поверхности в форматах STL, Collada и OBJ.

Для формирования команд управления приводами модели робота и обеспечения ее перемещения в среде симуляции в компьютерную модель необходимо добавить систему управления. Система управления может обеспечивать как прямое управления моделью робота, например, с клавиатуры, так и автономную навигацию в виртуальной среде на основе обработки информации с датчиков.

Для автоматического управления и навигации компьютерной модели ROS в среде симуляции Gazebo применяется готовый набор библиотек «move base» [34], включающий набор алгоритмов построения карты стоимостей и поиска путей в графе между целевой точкой и текущим положением робота. Принцип работы системы навигации ROS основывается на создании двух карт стоимостей (глобальной и локальной), в которых строятся оптимальные траектории перемещения к целевой точке при помощи алгоритмов поиска пути.

Для обеспечения системы управления необходимой информацией об окружающей среде для построения траектории в URDF-описание модели робота необходимо добавить датчики. В случае использования робототехнического симулятора Gazebo датчики можно выбрать на официальном сайте симулятора из списка готовых датчиков ROS [33], например, лазерный дальномер, гироскоп, бамперный датчик и др.

Для описания окружающей среды, в которой действует модель робота, в Gazebo используется файл формата *.world. Данный файл представляет собой описание свойств симуляции (скорость симуляции, шаг симуляции, параметры окружающей среды, положение камеры для визуализации, положение источников света) и иерархическое описание объектов и поверхностей, выступающих в роли окружения робота в формате XML. В качестве объектов используются либо поверхности, либо модели в формате: *.stl, *.obj, *.dae.

Мир Gazebo может быть создан следующими способами:

- С использованием готовых моделей миров и объектов из официальной библиотеки Gazebo [35].
- Вручную при помощи создания файла *.SDF с использованием готовых моделей формата *.STL. В этом случае необходимо самостоятельно разработать конфигурацию объектов в пространстве и указать их координаты в коде.

Поскольку формат описания мира Gazebo идентичен описанию модели робота URDF, то имеется возможность автоматизации процесса генерации мира путем экспорта конфигурации объектов в пространстве из САПР. В частности, для создания рабочего пространства рассматриваемой модели робота предполагается создание трубопроводов сложной топологии в среде Solidworks с использованием готовых моделей и их комбинаций. На рис. 14 представлен пример структуры трубопровода, созданного в САПР Solidworks и добавленного в среду симуляции Gazebo в формате *.STL.



Рис. 14. Модель трубопровода сложной топологии в Gazebo



Рис. 15. Симуляция движения компьютерной модели семисекционного мобильного робота в Gazebo



Рис. 16. Прохождение МКР с зафиксированными колесами по круговой траектории



Рис. 17. Прохождение МКР с управляемыми колесами по круговой траектории

В рамках проведенной работы была создана компьютерная модель семисекционного модульного робота с прямым управлением дифференциальным приводом первого сегмента, реализующая движение на плоскости. На рис. 15 представлена симуляция движения полученной модели в среде симулятора Gazebo.

В разработанной модели шарнирные соединения сегментов имеют только одну вращательную степень свободы относительно вертикальной оси для обеспечения свободного поворота в горизонтальной плоскости. Для возможности параметризации числа секций робота код URDF-описания модели был дополнен XML-макросами.

Симуляция разработанной модели проводилась с двумя состояниями подвижной платформы с колесами: с зафиксированными колесами и управляемыми. В качестве цели симуляции было поставлено успешное прохождение робота по круговой траектории без отклонения сегментов от траектории.

На рис. 16 представлено прохождение робота по круговой траектории подвижной платформы с зафиксированными колесами, на рис. 17 — с подвижной платформой, положением колес которой можно управлять.

В ходе проведенных симуляций было установлено, что наличие подвижной платформы с колесами в модулях робота позволяет уменьшить колебания траектории модулей, начиная со второго, относительно траектории первого модуля. Аналогичные результаты были получены ранее при симуляции математической модели.

6. Заключение

В ходе выполненных работ были получены следующие результаты: разработан новый алгоритм перемещения модульного колесного робота, состоящего из модулей с подвижной колесной парой; разработана методика проектирования компьютерных моделей мобильных роботов; проведены компьютерные симуляции с использованием математических алгоритмов по определению траектории движения робота.

Предлагаемый подход к конструированию модульного робота позволил оценить работоспособность и адекватность технологических приемов, скорректировать базовые параметры, уточнить требования к приводам и управляющей бортовой системе. Решаемые задачи являются взаимосвязанными: полученные параметры конструкции служат исходными данными для разработки динамических моделей робота, которые, в свою очередь, необходимы в качестве базы для синтеза системы управления.

Использование технологий цифровых двойников и комплексного моделирования (когда объект и окружающая среда рассматриваются во всем комплексе взаимодействия) позволяют значительно сократить время разработки и удовлетворить противоречивые требования к конечному продукту разработки.

По окончании этапа моделирования и верификации моделей планируется продолжить работы в следующих направлениях: коррекция математических моделей с учетом выбранной конструкции модуля робота; разработка полной динамической модели робота; синтез архитектуры системы управления с учетом ее физической реализации и новых подходов к реализации интерфейсов [36]; разработка информационной системы робота; экспериментальная проверка модернизированных математических моделей робота и создание натурного испытательного стенда с макетами трубопроводов произвольной топологии.

Список литературы / References

- [1] Ogai H., Bhattacharya B. Pipe Inspection Robots for Structural Health and Condition Monitoring // Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering. 2018. V. 89. P. 213. DOI: 10.1007/978-81-322-3751-8
- [2] Li H., Li R. Zhang J., Zhang P. Development of a Pipeline Inspection Robot for the Standard Oil Pipeline of China National Petroleum Corporation // Appl. Sci. 2020. V. 10. P. 2853. DOI: 10.3390/app10082853
- [3] Tubot LLC, part of TechnoSpark and Sigma Group of Companies. Novosibirsk, Russia. http://tubot.pro/
- [4] Tatar O., Cirebea C., Alutei A. The Modular Robotic System for In-pipe Inspection / In: Pisla D., Ceccarelli M., Husty M., Corves B. (eds.) // New Trends in Mechanism Science. Mechanisms and Machine Science. 2010. V. 5. Pp. 583–591. DOI: 10.1007/978-90-481-9689-0_67
- [5] Min J., Setiawan Y.D., Pratama P.S., Kim S.B., Kim H.K Development and Controller Design of Wheeled Type Pipe Inspection Robot // Proceedings of the 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. 2014. Pp. 789–795. DOI: 10.1109/ICACCI.2014.6968543
- [6] Enner F., Rollinson D., Choset H. Motion estimation of snake robots in straight pipes // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013. Pp. 5168-5173. DOI: 10.1109/ICRA.2013.6631316
- [7] Mills G.H., Liu J.H.W., Kaddouh B.Y. et al. Miniature Magnetic Robots For In-Pipe Locomotion / In: Montes H., Tokhi M.O., Virk G.S., Armada M., Rodriguez H., Fernandez R., Gonzalez de Santos P., Sanchez V. and Silva M. (eds.) // Robotics Transforming the Future: Proceedings of CLAWAR 2018. 2018. Pp. 289–300.
- [8] Nasibullayev I., Darintsev O., Bogdanov D. (2022) In-Pipe Modular Robot: Configuration, Displacement Principles, Standard Patterns and Modeling / In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds.) // Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. V. 232. Pp. 85–96. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_8
- [9] Павловский В.Е., Петровская Н.В. Исследование динамики движения цепочки «Робопоезд». Уравнение движения, частные решения. М.: ИПМ, 2005. 31 с. Pavlovsky V.E., Petrovskaya N.V. Study of the dynamics of the "Robotrain" chain motion. Equations of motion, particular solutions. Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2005. 31 p. (in Russian).
- [10] Евграфов В.В., Павловский В.Е., Петровская Н.В. Исследование динамики движения цепочки «Робопоезд». Управляемое движение. М.: ИПМ, 2005. 31 с. Evgrafov V.V., Pavlovsky V.E., Petrovskaya N.V. Study of the dynamics of the movement of the chain "Robotrain". Controlled motion. Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. 2005. 31 p. (in Russian).
- [11] Darintsev O.V., Nasibullayev I.S., Bogdanov D.R. Inspection of Pipelines of Complex Topology Using an Adaptive, Scalable Multi-segment Mobile Robot / In: Yuschenko A. (eds.) // Modern Problems of Robotics. MPoR 2020. Communications in Computer and Information Science. 2021. V. 1426. Pp. 137–150. DOI: 10.1007/978-3-030-88458-1_11

- [12] Аюпов В.В. Исследование маневренных свойств автопоездов на основе системного подхода: монография. Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. 96 с. Ауироv V.V. Study of maneuvering properties of road trains based on a systems approach: monograph. Perm: Publishing house FGBOU VPO Perm State Agricultural Academy, 2012. 96 p. (in Russian).
- [13] Nasibullayev I., Darintsev O. Algorithms for Planning Trajectory of a Modular Wheeled In-Pipe Robot / In: Ronzhin A., Savage J., Meshcheryakov R. (eds.) // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2024. Lecture Notes in Computer Science. 2024. V. 14898. Pp. 251–264. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_19
- [14] RoboDK homepage. https://robodk.com/pricing (дата обращения: 30.01.2025).
- [15] Rohmer E., Singh S, Freese M. V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520
- [16] RoboLogix homepage. https://www.robologix.com/ (дата обращения: 30.01.2025).
- [17] SimSpark homepage. robocup-sim.gitlab.io/SimSpark/index.html (дата обращения: 30.01.2025).
- [18] Michel O. Webots: Professional Mobile Robot Simulation // Journal of Advanced Robotics Systems. 2004. V. 1, No. 1. Pp. 39–42. DOI: 10.5772/5618
- [19] Gazebo Sim homepage. http://gazebosim.org/home (дата обращения: 30.01.2025).
- [20] ROS Robot Operating System homepage. http://www.ros.org (дата обращения: 30.01.2025).
- [21] Salome-Meca homepage. https://code-aster.org/ (дата обращения: 30.01.2025).
- [22] FreeCAD homepage. https://www.freecad.org/ (дата обращения: 30.01.2025).
- [23] Solidworks homepage. https://www.solidworks.com/ (дата обращения: 30.01.2025).
- [24] Blender homepage. https://www.blender.org/ (дата обращения: 30.01.2025).
- [25] Andrade A., Alvarez Cedillo J., Lozada J.H., Zarate I.R. Robotic Arm Control With Blender 1 // Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences. 2013. V. 4, No. 4. Pp. 382–386.
- [26] Matsuno F. et al. Development of Tough Snake Robot Systems / In: Tadokoro S. (eds.) // Disaster Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics. 2019. V. 128. Pp. 267–326. DOI: 10.1007/978-3-030-05321-5 6
- [27] Sawabe H., Nakajima M., Tanaka M., Tanaka K., Matsuno F. Control of an articulated wheeled mobile robot in pipes // Advanced Robotics. 2019. V. 33(20). Pp. 1072–1086. DOI: 10.1080/01691864.2019.1666737
- [28] Liu Ch., Whitzer M., Yim M. A Distributed Reconfiguration Planning Algorithm for Modular Robots // IEEE Robotics and Automation Letters. 2019. V. 4. Pp. 4231-4238. DOI: 10.1109/LRA.2019.2930432
- [29] Hauser S., Mutlu M., Léziart P-A., Khodr H., Bernardino A., Ijspeert AJ. Roombots extended: Challenges in the next generation of selfreconfigurable modular robots and their application in adaptive and assistive furniture // Robotics and Autonomous Systems. 2020. V. 127. P. 103467. DOI: 10.1016/j.robot.2020.103467

43

- [30] Pfotzer L., Ruehl S., Heppner G., Roennau A., Dillmann R. KAIRO 3: A modular reconfigurable robot for search and rescue field missions // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014), Bali, Indonesia. 2014. Pp. 205-210. DOI: 10.1109/ROBIO.2014.7090331
- [31] SolidWorks to URDF Exporter. https://wiki.ros.ora/sw orter (дата обращения 30.01.2025).
- [32] Export a SolidWorks Assembly to URDF. https://wiki.ros.org/sw_urdf_exporter/Tutorials/Export%20an%20Assembly (дата обращения 30.01.2025).
- [33] Gazebo plugins in ROS. https://classic.gazebosim.org/tutorials?tut=ros_gzplugins (дата обращения 30.01.2025).
- [34] Библиотека move base. Library move_base.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Никита Олегович Круглов

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Динар Рафаэльевич Богданов

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Ильдар Шамилевич Насибуллаев

кандидат физ.-мат. наук Уфимский университет науки и технологий, Уфа

https://wiki.ros.org/move_base (дата обращения 30.01.2025).

- [35] Библиотека Gazebo Dashboard. Library Gazebo Dashboard. https://app.gazebosim.org/dashboard (дата обращения 30.01.2025).
- [36] Туровский Я.А., Харченко С.С., Мещеряков Р.В. и др. Алгоритмическое обеспечение интерфейса управления робот-человек при выделении зрительных вызванных потенциалов на основе многомерного индекса синхронизации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1(211). C. 66-78. Turovsky Y.A., Kharchenko S.S., Meshcheryakov R.V. et al. Algorithmic support of the interface of management of robot-human with the steady state visual evoked potentials based on the multivariate synchronization index // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2020. No. 1(211). Pp. 66-78 (in Russian) DOI: 10.18522/2311-3103-2020-1-66-78.

Nikita Olegovich Kruglov

Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia//Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia

nikitakruglov0477@gmail.com ORCID: 0009-0009-0438-0059

Dinar Rafaeljevich Bogdanov

Ufa Federal Research Centre of the RAS, Ufa, Russia dr_bog@mail.ru ORCID: 0000-0003-4481-7103

Ildar Shamilevich Nasibullayev

Ph.D. (Phys. & Math.) Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia sp.ishn@gmail.com ORCID: 0000-0003-0084-5313