

7. Featherstone R. *Rigid Body Dynamics Algorithms*, Springer, 2007. 272 p.
8. Gronowicz A., Szrek. J. Idea of a quadruped wheel-legged robot. *Archive of Mechanical Engineering*, 2009, vol. 56, issue 3, pp. 253–278.
9. Heaston J. *Design of a novel tripedal locomotion robot and simulation of a dynamic gait for a single step. Master's thesis*, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University Publ. House, 2006. 75 p.
10. Heaston J. STriDER: Self-Excited Tripedal Dynamic Experimental Robot. *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2776–2777.
11. Kaiser. Available at: <http://www.kaiser.li/en/home/> (accessed 01.06.2016).
12. Meghdari A. Dynamics Modeling of a Humanoid Robot. *ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2005, pp. 153–158.
13. Muller G., Schneider M., Hiller M. Modeling, simulation, and model-based control of the walking machine ALDURO. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, pp. 142–152.
14. Ottaviano E., Vorotnikov S., Ceccarelli M., Kurenev P. Design Improvements and Control of a Hybrid Walking Robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, vol. 59, issue 2, pp. 128–141.
15. Ren P. *Kinematics analysis of two parallel locomotion mechanisms*, Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University Publ. House, 2010. 161 p.
16. Ren P., Hong D. Instantaneous Kinematics and Singularity Analysis of a Novel Three-Legged Mobile Robot with Active S-R-R-R Legs. *ASME 2008 International Design Engineering Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, 2008, pp. 1195–1206.
17. Siciliano B. *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008. 1611 p.
18. Silva M. Multi-legged walking robot modelling in MATLAB/SimMechanics and its simulation. *2013 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*, 2013, pp. 226–231.
19. *SimMechanics 2. User's Guide*, 2007. 840 p.
20. *Simulation of a humanoid robot*. Available at: <http://www.embeddedprogrammer.blogspot.ru/2012/08/simulation-of-humanoid-robot.html> (accessed 01.06.2016).
21. Szrek J., Wojtowicz P. Idea of wheel-legged robot and its control system design. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2010, vol. 58, issue 1, pp. 43–50.
22. Tavolieri C. A design of a new leg-wheel walking robot. *2011 Mediterranean Conference on Control & Automation*, 2007, pp. 1–6.

УДК 004.896.001.63

ВНУТРИТРУБНАЯ ДИАГНОСТИКА ГАЗОПРОВОДОВ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ. **ЧАСТЬ 1. ГИБРИДНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ** **ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РОБОТА ВНУТРИ ТРУБЫ**

Статья поступила в редакцию 07.05.2016, в окончательном варианте 22.06.2016.

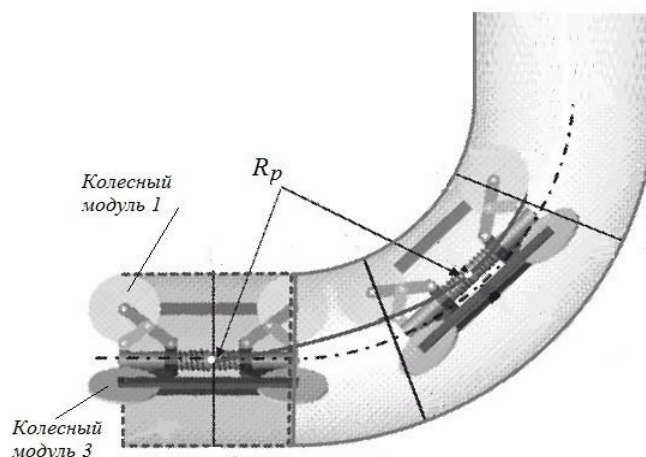
Голубкин Игорь Александрович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: golubkin@inbox.ru

Щербатов Иван Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Астраханский государственный технический университет, 414025, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, e-mail: sherbatov2004@mail.ru

Инспекция газопроводов с применением роботизированных устройств различных конструкций является крайне актуальной научной и практической задачей. Большая протяженность и сложная конфигурация трубопроводов обуславливают необходимость применения высокоэффективных систем диагностирования дефектов и неисправностей изнутри труб. В работе показана возможность построения математической модели перемещения колесного робота с трехопорным кинематическим механизмом внутри трубы на основе использования набора типовых ситуаций. Предложена гибридная математическая модель перемещения робота внутри трубы, основанная на анализе и описании набора типовых ситуаций, возникающих в процессе перемещения. Модель состоит из аналитической части (расчет радиуса робота и силы прижатия колес) и продукционной части. Показаны результаты моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода и адекватность построенной модели реальному процессу перемещения робота.

Ключевые слова: газопровод, внутритрубная диагностика, робот, перемещение в трубе, типовая ситуация, гибридная модель, нечеткие множества, диагностика, информационные технологии

Графическая аннотация



INTERNAL DIAGNOSTICS PIPELINE MOBILE ROBOTS.
PART 1. HYBRID MATHEMATICAL MODEL OF THE ROBOT MOVING INSIDE THE PIPE

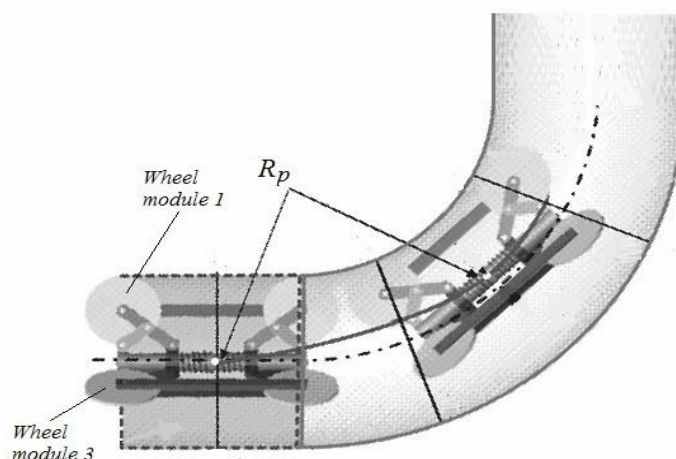
Golubkin Igor A., post-graduate student, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: golubkin@inbox.ru

Shcherbatov Ivan A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russian Federation, e-mail: sherbatov2004@mail.ru

Inspection of gas pipes with robotic devices of various constructions is extremely topical scientific and practical task. The big length and complex configuration of the pipelines cause the application of high-efficiency and fault diagnosis of defects inside the pipe. We justify the choice of mobile robot design for the diagnosis. The possibility of constructing a mathematical model of the wheeled robot with tricycle kinematic mechanism moving inside the pipe, based on typical situations. A hybrid model of the robot moving inside the pipe, based on the analysis and description of the types of situations that arise in the process of moving the robot inside the pipe. The model consists of the analytical part (calculation robot radius and the contact force of the wheels) and parts of Production. The results of the simulation, confirming the effectiveness of the proposed approach and the adequacy of the developed model the real process of the robot movement.

Keywords: gas pipeline, in-pipe diagnostics, robot, movement in pipeline; typical situation, hybrid model, fuzzy sets, diagnostics, information technologies

Graphical annotation



Введение. Российская Федерация является страной с наиболее протяженной сетью газопроводов в мире [11]. Проектирование и прокладка газопроводов осуществляются таким образом, чтобы они функционировали в течение нескольких десятилетий. Однако в течение всего срока эксплуатации трубопроводов необходима регулярная диагностика их состояния для определения необходимости замены вышедших из строя или потенциально опасных участков. Это позволяет снизить риски эксплуатации, избежать аварийных ситуаций. Поэтому затраты на проведение диагностики трубопроводов; повышение качества такой диагностики, в т.ч. с использованием роботов; уменьшение вероятностей «застревания» роботов в трубопроводах, неверного прохождения ими разветвлений и пр. оправданы за счет снижения возможных ущербов от неблагоприятных событий – связанных как с трубопроводами, так и с самими роботами [6]. Однако в существующей литературе вопросы управления роботами, предназначенными для проведения диагностики труб изнутри них, рассмотрены недостаточно полно. Поэтому цель данной работы – повышение эффективности проведения внутритрубной диагностики путем разработки системы управления мобильными роботами, обеспечивающей их перемещение в газопроводах различной конфигурации.

Общая характеристика существующих типов роботов. Для исследований трубопроводов используются различные виды диагностических устройств. Особое место среди них занимают роботизированные мобильные комплексы. В [6] приведены семь наиболее часто применяемых способов перемещения таких устройств внутри трубы. На эти устройства устанавливается оборудование для диагностирования различных типов дефектов. Для диагностики используются следующие типы роботов: колесный [14, 12], гусеничный [17, 19, 22, 24, 30], стено-нажимной [9, 13], шагающий [2, 21], ползущий [10, 15, 20, 23], винтообразный [18, 26] и др.

Из проведенного в [7] анализа типов диагностических устройств следует, что роботы с собственным двигателем обладают наибольшей маневренностью. При использовании схем и конструкций с изменяемой геометрией они могут обеспечить такие преимущества, как движение по наклонным (вертикальным) поверхностям и преодоление встречающихся в трубопроводе препятствий. Поэтому в данной работе выбран робот с многоопорным кинематическим механизмом. Существуют различные конструкции таких роботов [25, 27, 28, 31, 32].

Конструкция робота рассматриваемого робота. На основании проведенного в [7] анализа было выявлено, что конструкции колесных роботов с трехопорным кинематическим механизмом обладают необходимыми функциональными возможностями для прохождения всех встречающихся в газопроводах сложных участков, подробно описанных в [8]. В настоящей работе исследуется робот с конструкцией, описанной в [29], обеспечивающей прохождение поворотов и тройников в газопроводе. Описываемый ниже робот дополнен механизмом активной регулировки его диаметра по периметру колесных модулей и силы их прижатия к стенкам газопровода, что предложено в работе [32]. Также предлагаемое устройство оснащено муфтами предельного момента для обеспечения максимального контакта всех колес робота с внутренней поверхностью трубопровода при преодолении переходов между участками труб разных диаметров. В этом случае замена пружин двигателем для активной регулировки диаметра робота увеличивает возможный диапазон изменения его диаметра в 1,5–2 раза (до 30–40 %). Предлагаемый робот (рис. 1) имеет следующую конструкцию: три колесных модуля, расположенных под углом 120° относительно друг друга, которые предназначены для регулировки скоростей движения при преодолении поворотов и тройников (подсистема ситуационного уровня); механизм регулировки диаметра робота и силы прижатия колесных модулей к стенкам газопровода (подсистема регуляторного уровня).

Робот должен быть снабжен сенсорной подсистемой, которая включает необходимый набор датчиков и сенсоров для контроля состояния робота и окружающего его пространства.

В зависимости от диаметров труб, предназначенных для диагностики, возможна техническая реализация разработки в виде роботов разных размеров, но имеющих однотипную конструкцию. Это обеспечивает унификацию номенклатуры применяемых узлов и деталей; математических моделей и программного обеспечения, используемого для управления движением роботов внутри труб; технологий сервисного обслуживания роботов и пр. Как следствие, снижаются «стоимости владения» совокупностями описываемых роботов (включая возможные модификации программного обеспечения, сервисные операции, стоимости обучения персонала и пр.); уменьшаются риски неблагоприятных событий при эксплуатации роботов. Кроме того, использование однотипных конструкций роботов дает возможность унифицировать и номенклатуру навесных устройств, используемых совместно с ними для проведения диагностических работ. Таким образом, разработка и использование «линейки» однотипных роботов обеспечивает повышение экономической эффективности их применения [5].

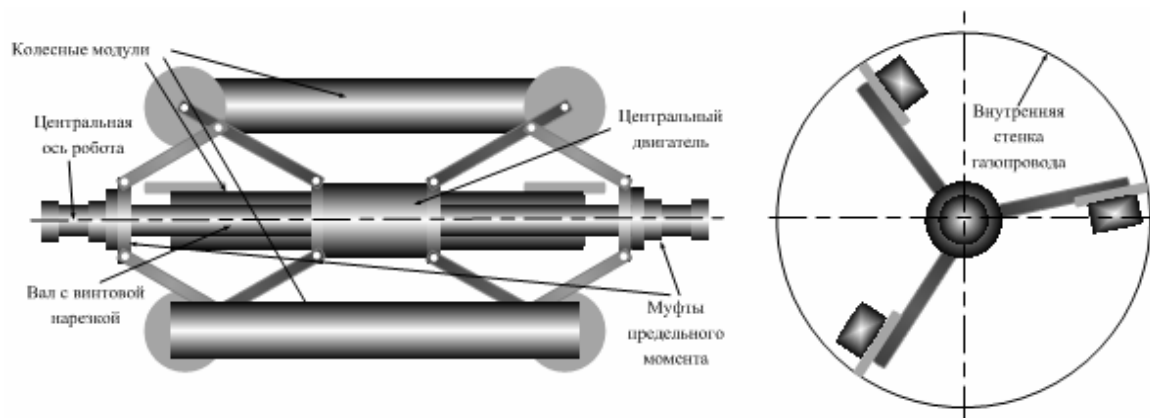


Рис. 1. Конструкция робота для внутритрубной диагностики

Технические характеристики рассматриваемого в качестве примера робота следующие: максимальная скорость – 9 м / мин; вес – 0.7 кг (включая установленную видеокамеру, используемую в качестве устройства для диагностики); тяговая сила – 10 Н; диапазон изменения диаметра робота – от 75 до 109 мм – это позволяет осуществлять движение в трубах с типизированными диаметрами 80 и 100 мм, включая участки переходов между трубами разных диаметров, а также встречающиеся внутренние подкладки, фланцы и другие изменения внутреннего диаметра труб.

Типовые ситуации при движении робота в газопроводе. При движении мобильного робота в трубопроводе ему приходится преодолевать различные типичные ситуации (препятствия) [8]: повороты трубопровода; тройники; сужения (увеличения) диаметра трубы (внутренние подкладки, сварные швы; гофры; изменение наклона трубы, вертикальные участки; изменения диаметра и формы трубы – вмятины, овальности, сплющивания).

Длинный прямой участок газопровода также может являться препятствием, поскольку при некорректном креплении трубопроводов в слабонесущих грунтах вместо прямолинейных участков трубопроводов будут изогнутые (провисание). Такая ситуация должна быть идентифицирована и рассматриваться как поворот с очень большим радиусом [1, 4]. В соответствии с [8] нами было выделено шесть типовых ситуаций $TS = \{ts_i\}, i = 1, 6$: «повороты трубопровода» ts_1 ; «тройники» ts_2 ; «сужения (увеличения) диаметра трубы» ts_3 ; «гофры» ts_4 ; «изменения наклона трубы», ts_5 ; «изменения формы сечения трубы» ts_6 .

При этом в газопроводе типичные ситуации могут встречаться как по отдельности, так и одновременно – в составе группы из двух и более объектов. Например, ts_1 зачастую встречается вместе с ts_5 . Таким образом, основным требованием к конструкции робота и его системе управления является возможность преодоления всех вышеописанных типичных ситуаций (в т.ч. в различных сочетаниях).

Постановка задачи управления роботом в типовых ситуациях. В процессе проведения диагностики газопроводов система управления мобильным роботом должна обеспечивать выполнение следующих функций: обработка и формализация данных сенсорной подсистемы о состоянии робота и внешней среды; определение типовых ситуаций и режимов функционирования мобильного робота; организация диалога с оператором посредством пользовательского интерфейса; формирование оперативных управляющих воздействий на сервоприводы робота для прохождения типовых ситуаций.

Задача управления роботом может быть формализована в виде:

$$\forall R_j, \exists U_{j \rightarrow k} : R_j \xrightarrow{MM, \{TS\}, \{N\}} R_k, \quad (1)$$

где R_j, R_k – текущий и конечный режимы робота соответственно; $U_{j \rightarrow k}$ – управляющее воздействие, обеспечивающее переход робота из режима R_j в режим R_k ; MM – математическая модель робота; $\{TS\}$ – множество типовых ситуаций; $\{N\}$ – множество целевых направлений, задаваемых оператором.

Таким образом, необходимо найти управляющее воздействие $U_{j \rightarrow k}$, обеспечивающее переход робота из режима R_j в режим R_k , на основе расчетов по математической модели MM , наличия различных типовых ситуаций TS и целевых направлений N , задаваемых оператором.

Разработка гибридной математической модели. Математическая модель (ММ) в своей структуре содержит две части [16]: аналитическая модель MM_1 подсистемы регуляторного уровня, которая учитывает работу центрального двигателя робота и механизма регулирования его радиуса, силы прижатия колесных модулей к стенкам трубопровода; продукционная модель MM_2 подсистемы ситуационного уровня, предназначенная для обеспечения прохождения роботом отводов и тройников путем изменения скоростей трех колесных модулей. Объединение аналитической и продукционной (интеллектуальной) моделей в рамках решения задачи управления приводит к появлению гибридной математической модели процесса перемещения мобильного робота внутри газопроводов сложной геометрической формы.

Аналитическая модель MM_1 состоит из двух блоков: расчета динамически изменяемого радиуса робота; расчета силы прижатия колесных модулей. Вычисления проводятся в соответствии с зависимостями, предложенными в работе [32], причем модель адекватно описывает рассматриваемый объект. Таким образом, аналитическая модель MM_1 предназначена для изменения радиуса робота в случае изменения внутреннего радиуса газопровода и для регулирования силы прижатия колесных модулей к стенкам газопровода в случае изменения наклона трубы.

Продукционная модель MM_2 является оригинальной. Ее построение обусловлено тем, что существует возможность формализации опыта оператора при прохождении типовых ситуаций с применением методов искусственного интеллекта. Данный подход обеспечивает получение требуемых результатов без необходимости решения дифференциальных уравнений высокого порядка.

Модель MM_2 может быть представлена в виде:

$$MM_2 = \langle (TSr, TSs), (\beta_p, \gamma, R_p, \beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), (N, Num, Np_i), P, V, FPR, PR \rangle, \quad (2)$$

где TSr, TSs – прецеденты регуляторного (входные параметры модели) и ситуационного уровня соответственно, включающие β_p – угол поворота; β_1, β_2 – углы первого и второго поворота в тройнике соответственно; γ – угол ориентации колесных модулей; R_p – радиус поворота газопровода; β – результирующий угол поворота; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – удаленности от поворота первого, второго и третьего колесных модулей соответственно; N – задаваемые оператором целевые направления (входные параметры модели), включающие Num – количество тройников на маршруте, Np_i – целеуказание на направления движения в каждом тройнике. Обозначения в (2) P – внутренние параметры модели: $V = \{V_1, V_2, V_3\}$ – выходные параметры – скорости колесных модулей робота; FPR – функция перевода – алгоритм вычисления скоростей колесных модулей; PR – продукционные правила.

Функциональные связи между входными, внутренними и выходными параметрами модели задаются с использованием графической структуры, представленной на рисунке 2а.

Входные параметры принимают следующие значения: $TSs = (1 - \text{тройник}, 2 - \text{поворот}, 3 - \text{прямой участок})$; $N = (1 - \text{вниз}, 2 - \text{направо}, 3 - \text{вверх}, 4 - \text{налево}, 5 - \text{прямо})$; β_p – угол поворота – он учитывается при управлении, если текущей TSs является поворот трубопровода (угол поворота представляет собой угол на плоскости, перпендикулярной центральной оси трубопровода); β_1 и β_2 – углы первого и второго поворотов в тройнике, учитываются при управлении, если текущей TSs является тройник (N не должен быть равен «прямо»).

Промежуточные параметры принимают следующие значения: β – определяется на основании значений TSs, N для различных $\beta_p, \beta_1, \beta_2$; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ на основании угла поворота и положения соответствующего колесного модуля. Выходные параметры принимают следующие значения: V_m – определяется на основании значений параметров TSs, N, R_p и удаленности от поворота m -го колесного модуля (α_m). От TSs зависит то, какие связи между параметрами модели будут активны. Например, при значении «1» – тройник (рис. 2-б), при «2» – поворот (рис. 2-в), при «3» – прямой участок (рис. 2г).

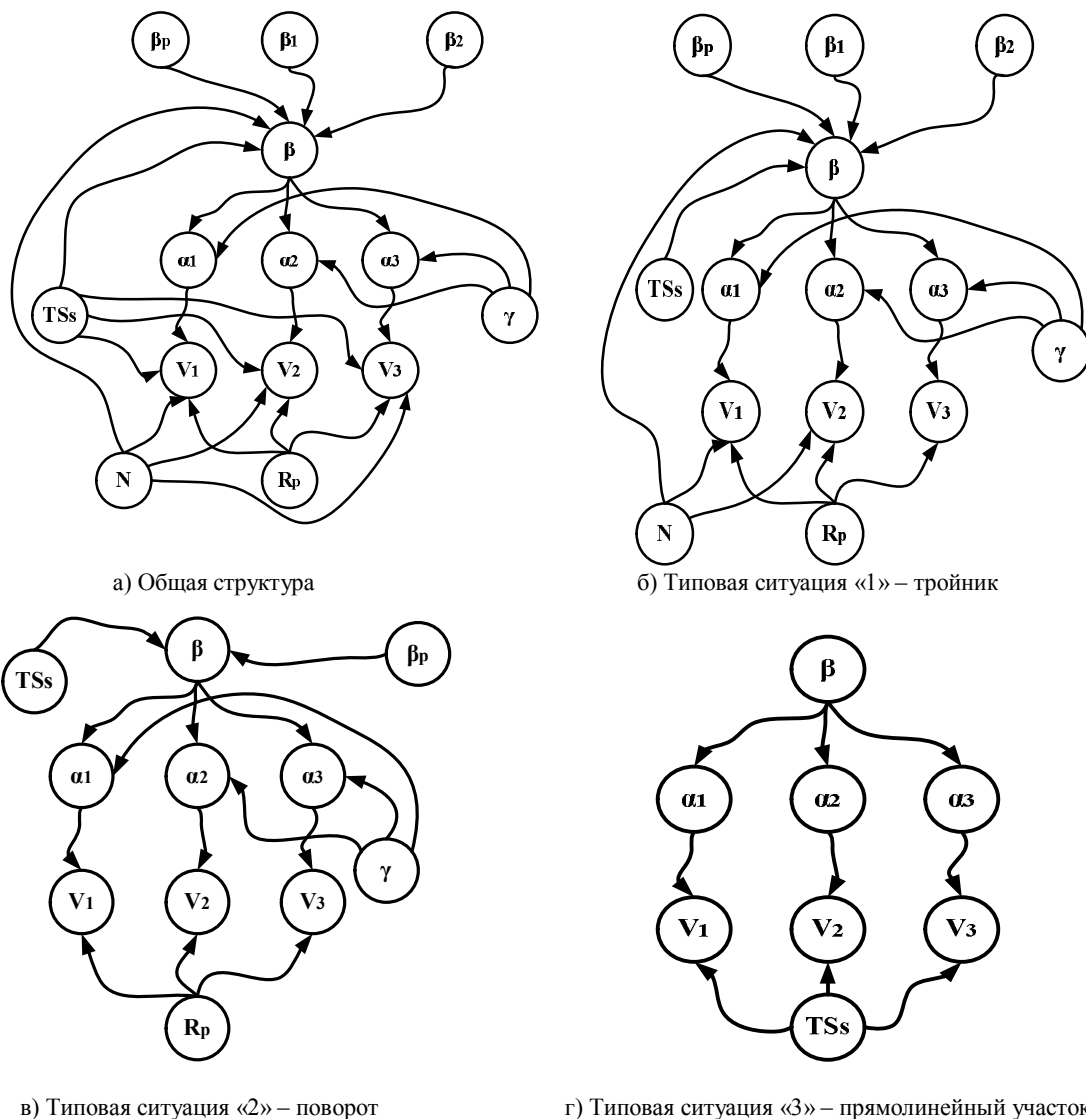


Рис. 2. Сетевая структура параметров модели ситуационного уровня

Все параметры, представленные в MM_2 , были формализованы с использованием теории нечетких множеств на основании применения лингвистических и экспертных методов извлечения знаний. Для удобства представим основные лингвистические переменные, входящие в MM_2 , в виде графического изображения соответствующих функций принадлежности в пакете FuzzyLogicToolbox среды инженерных расчетов MATLAB (рис. 3).

С использованием процедур экспертного опроса были составлены продукционные правила для блока расчета параметров, участвующих в построении продукционной модели. Например, для расчета скоростей колесных модулей используются правила вида:

ЕСЛИ « α_1 » = "Близко" И « R_p » = "Средний" ТО « V_1 » = "Очень малая"

Общее количество правил для расчета скоростей колесных модулей равно 25. Для расчета угла поворота в тройнике получено 24 правила вида:

ЕСЛИ « β_1 » = "Вниз1" И « β_2 » = "Вверх2" И « N_{pr} » = "Ц-вниз" ТО « β » = "P-вниз".

Учитывая вид функций принадлежности, количество правил, сложность вычислений и необходимость программной реализации в качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Мамдани.

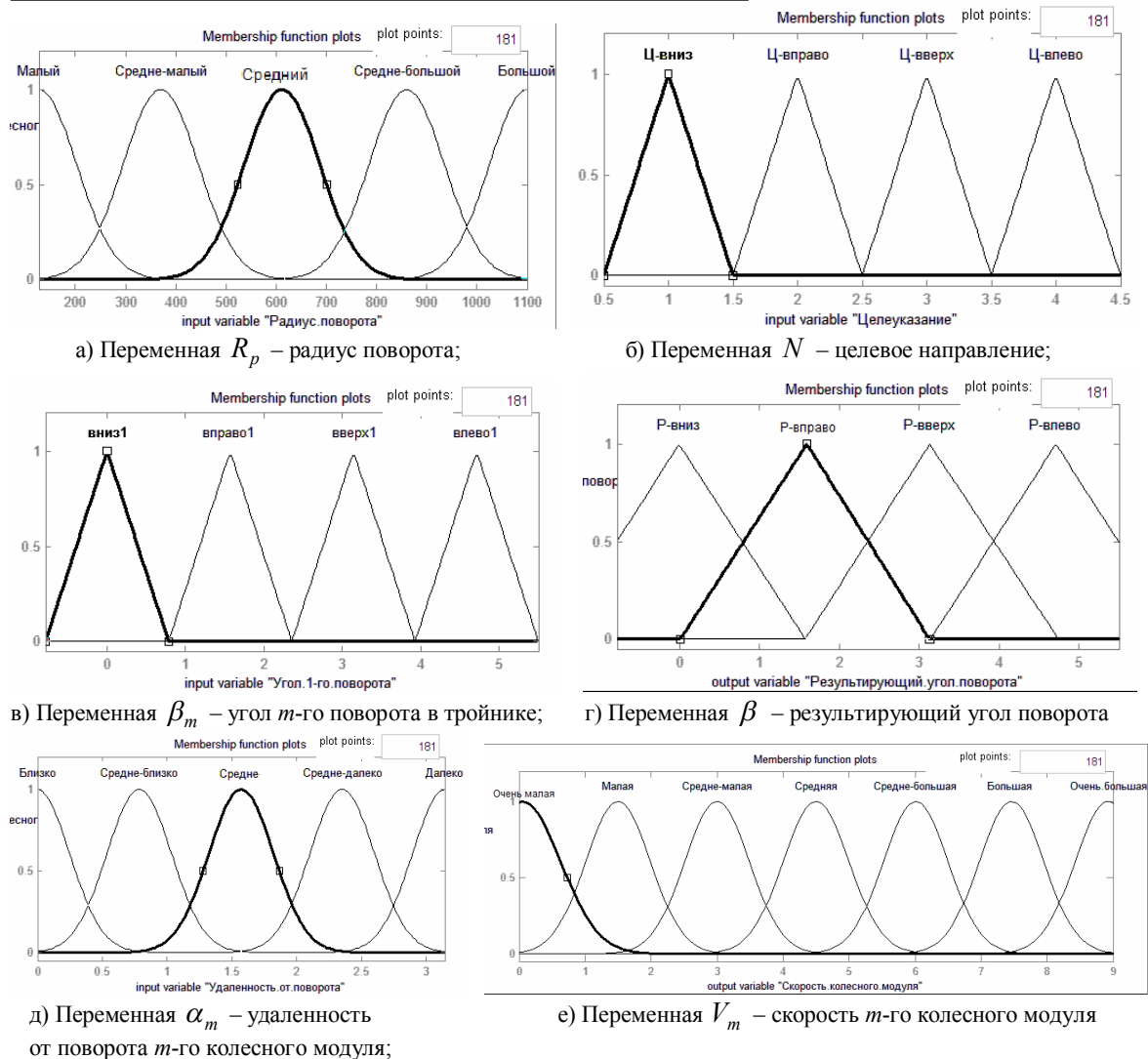


Рис. 3. Функции принадлежности термов лингвистических переменных

Алгоритмическое обеспечение расчетов по продукционной модели. На основании схемы взаимосвязей входных, внутренних и выходных параметров подсистемы ситуационного уровня, был разработан алгоритм вычисления скоростей для всех трех колесных модулей робота (рис. 4). При этом учитывалось, что часть параметров представлены в измеряемой числовой форме, а другие – описаны вербально.

Кроме того, учитывался тот факт, что связь между некоторыми параметрами представлена в явном виде (например, вычисление значений параметров «удаленность от поворота колесных модулей»), а между другими – с использованием продукционных правил (в блоках расчета скоростей колесных модулей и угла поворота в тройнике трубопровода). Из этого следует, что управляющие решения (необходимые значения скоростей колесных модулей) должны определяться по оригинальному алгоритму.

Применение нечеткой логики обусловлено тем, что нечеткие множества позволяют принять и формализовать опыт оператора по дистанционному управлению роботом, и, тем самым, снизив трудоемкость математических вычислений, уменьшить риски ошибок управления. Использование нечеткой логики при оценке появившихся ситуаций и построении логических заключений в рамках управления сложными объектами может облегчить решение задач хранения, обработки и накопления качественной информации [3]. Выбор способа построения модели ситуационного уровня на основе нечет-

кой логики, вполне обоснован. Причина – многообразие изменяющихся условий среды функционирования робота сложно описать ограниченным количеством правил, предназначенных для выполнения соответствующих команд, количество которых достаточно велико. Поэтому применение слабо детализированных, нечетких правил и определенных способов формирования управляющих решений имеет преимущество в виде существенного сокращения количества необходимых правил. Путем опроса экспертов определяется система нечетких продукционных правил, которые в дальнейшем используются оператором при управлении роботом. Эти правила связывают ситуацию, определяемую с помощью сенсорной подсистемы робота, и управление, соответствующее рассматриваемой (возникшей) ситуации.

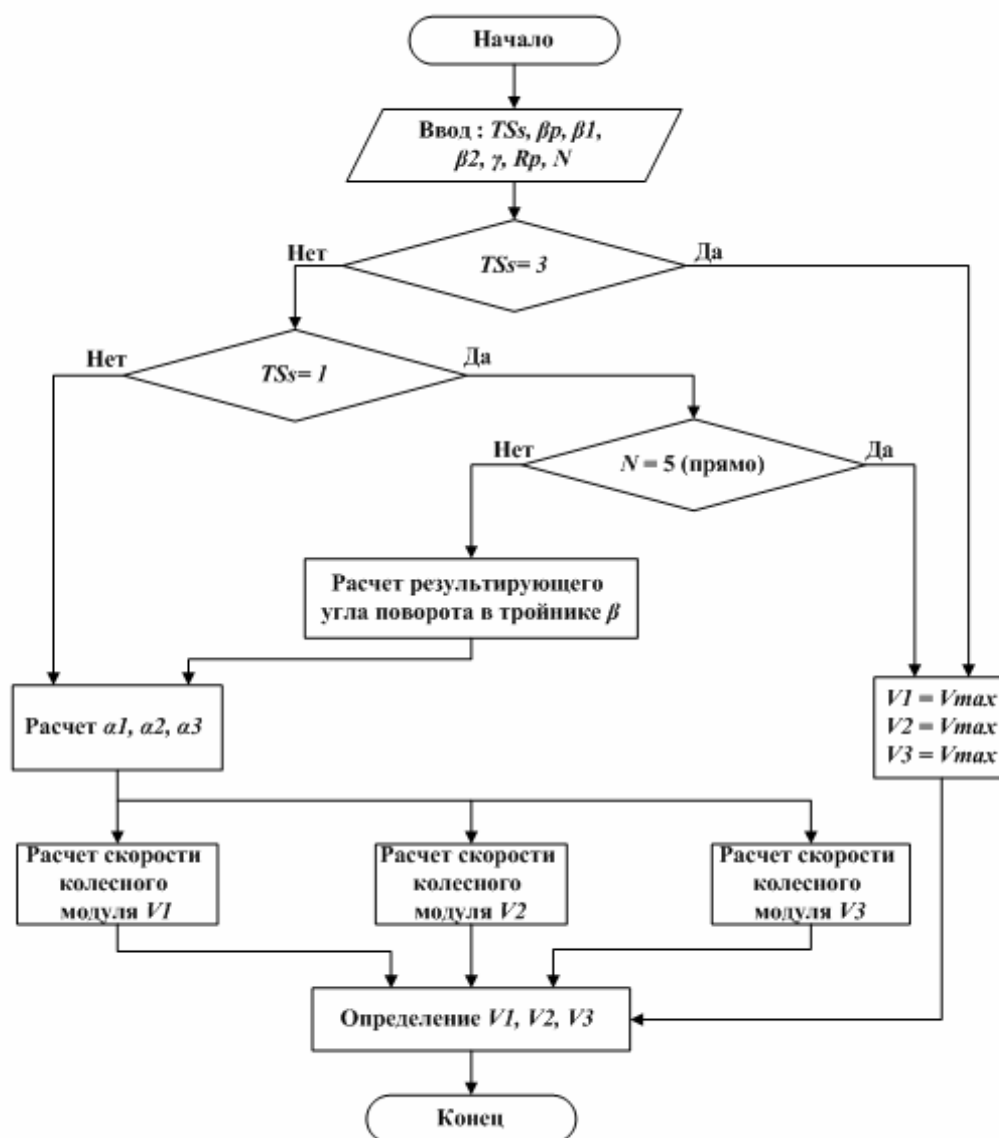


Рис. 4. Алгоритм вычисления скоростей колесных модулей робота, выполняемый на каждом шаге по времени

Экспериментальное исследование модели в MATLAB. В среде Simulink системы MATLAB была реализована математическая модель подсистемы ситуационного уровня для мобильного диагностического робота, которая представлена на рисунке 5.

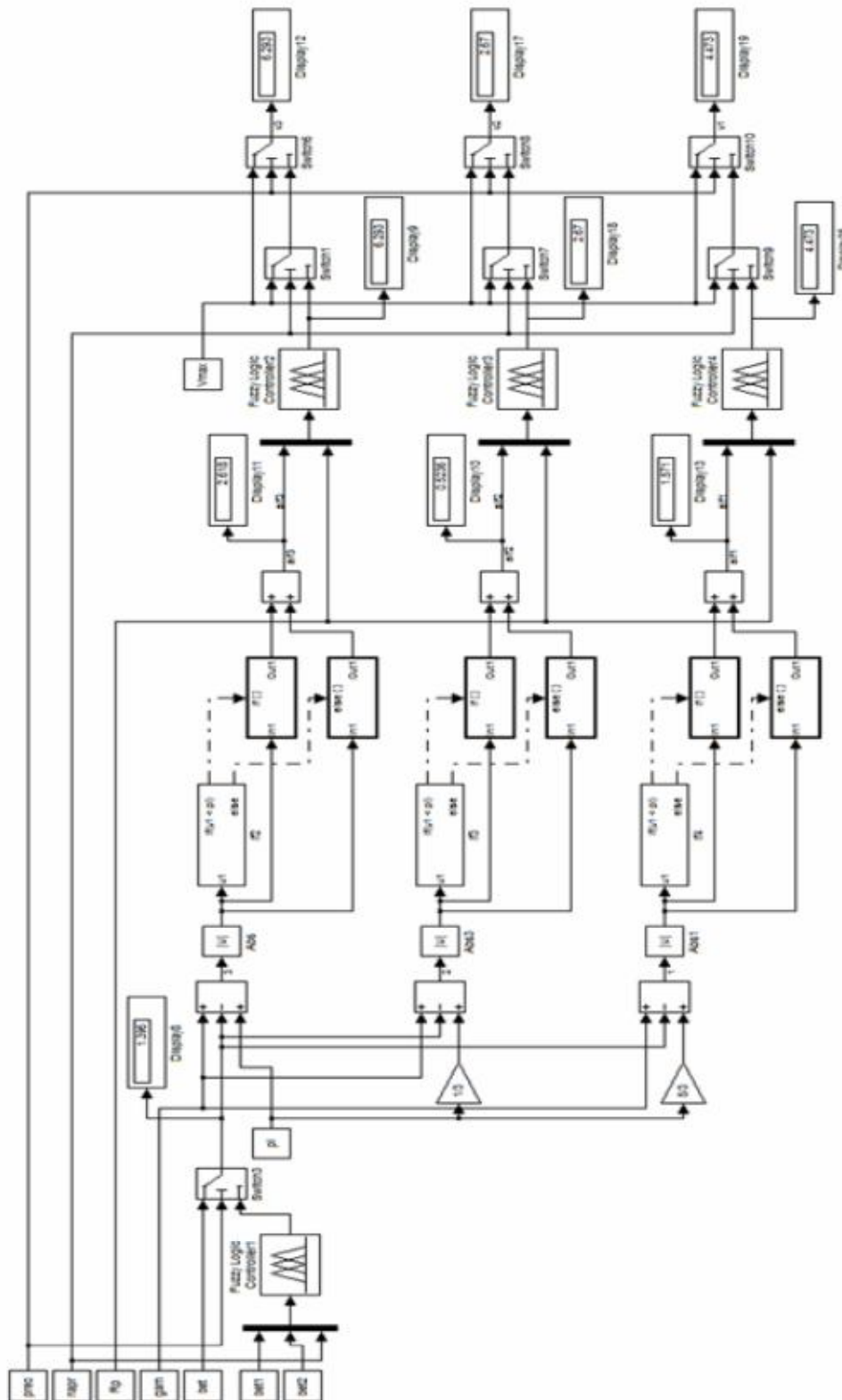


Рис. 5. Структурная схема модели MM_2 в среде Simulink Matlab

Для блока расчета скоростей была получена следующая поверхность отклика (рис. 6), обеспечивающая наглядную визуализацию зависимости требуемой скорости m -го колесного модуля от радиуса поворота и удаленности робота от предстоящего поворота.

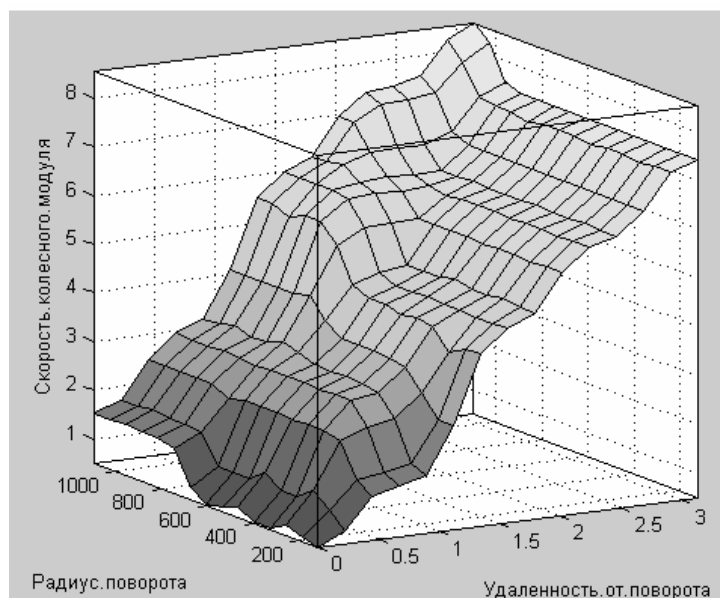


Рис. 6. Поверхность отклика для скорости m -го колесного модуля

Проверка адекватности продукционной модели $ММ_2$ подсистемы ситуационного уровня была проведена с использованием ряда типовых ситуаций, возникающих при движении робота в газопроводе. Адекватность продукционной модели доказана в результате сравнения значений, вычисленных с использованием разработанной Simulink-модели, со значениями, полученными от экспертов в результате проведения процедуры экспертного опроса. В таблице 1 представлены значения входных и выходных переменных в различных ситуациях. Ситуации разделены на три группы: О – прямолинейный участок; П – поворот, Т – тройник.

Таблица 1

Значения входных и выходных параметров в различных ситуациях

Ситуация		1 (О)	2 (П)	3 (П)	4 (П)	5 (П)	6 (Т)	7 (Т)	8 (Т)	9 (Т)	10 (Т)
Входные параметры	TS_s	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1
	N	–	–	–	–	–	1	2	3	4	5
	β_p	–	0,78	3,14	1,06	5,11	–	–	–	–	–
	β_1	–	–	–	–	–	0,39	2,06	1,06	5,01	–
	β_2	–	–	–	–	–	3,14	0,39	3,14	1,06	5,01
	γ	–	0	1,06	3,14	5,21	2,18	0	1,06	3,14	5,21
	R_p	–	130	280	520	800	130	280	520	610	800
Вых. параметр (модель)	V_1	9,00	4,79	7,43	1,38	3,31	1,16	3,68	5,99	1,30	9,00
	V_2	9,00	0,87	2,99	7,43	4,29	7,40	2,69	1,33	4,80	9,00
	V_3	9,00	6,01	3,01	3,36	7,40	2,85	7,21	4,86	6,01	9,00

Ситуация		1 (О)	2 (П)	3 (П)	4 (П)	5 (П)	6 (Т)	7 (Т)	8 (Т)	9 (Т)	10 (Т)
Вых. парам. (экспер-ты)	V_1	9,00	4,70	7,50	1,40	3,20	1,15	3,55	6,00	1,30	9,00
	V_2	9,00	0,85	3,00	7,30	4,50	7,50	2,70	1,30	5,00	9,00
	V_3	9,00	6,00	3,00	3,25	7,50	2,85	7,00	4,90	6,00	9,00

Таким образом, максимальная ошибка расчетов по модели по сравнению с решениями, предложенными экспертами, не превышает 5 %.

Заключение. Гибридная математическая модель, сочетающая в себе аналитическую модель (предназначенную для регулировки радиуса робота и силы прижатия его колес к стенкам газопровода) и интеллектуальную (продукционную модель расчета скоростей колесных модулей) обеспечивает успешное прохождение роботом сложных участков газопровода, таких как тройники, повороты, наклонные трубы и участки с изменяющимся внутренним сечением. Результаты моделирования построенной интеллектуальной модели и экспертная оценка полученных данных свидетельствуют о возможности ее применения для целей управления мобильным роботом при диагностике газопроводов с формой труб любого уровня сложности.

Продолжением работы, которое предполагается представить в последующей статье, будет создание системы управления роботом, основанной на полученной математической модели.

Список литературы

1. Арбузов Ю. А. Алгоритм расчета технологических параметров закрепления магистральных газопроводов на слабонесущих грунтах / Ю. А. Арбузов, С. А. Белов, И. Г. Воеводин, А. С. Миклуш, А. Н. Ридченко, П. А. Кузнецов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1. – С. 36–41.
2. Болотник Н. Н., Движение шагающего аппарата в тороидальной трубе / Н. Н. Болотник, Ф. Л. Черноусько // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 1998. – № 4. – С. 86–101.
3. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – Москва : Горячая линия–Телеком, 2012. – 284 с.
4. Босенко В. Н., Кравец А. Г. Методика прогнозирования основных показателей эффективности проекта строительства участка магистрального нефтепровода / В. Н. Босенко, А. Г. Кравец // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2013. – № 2. – С. 140–146.
5. Брумштейн Ю. М. Робототехнические системы: вопросы разработки / Ю. М. Брумштейн, М. Ильменский, И. Колесников // Интеллектуальная собственность. Авторское право и смежные права. – 2016. – № 4. – С. 49–64.
6. Воронников С. А. Система управления миниатюрным внутритрубным роботом / С. А. Воронников, Н. И. Никитин, М. Чекарелли // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 49–57.
7. Голубкин И. А. Использование мобильных роботов при дефектоскопии внутренней поверхности газопроводов / И. А. Голубкин // Наука + молодежь = успех : сборник статей молодых работников ООО «Газпром добыча Астрахань». – Астрахань, 2012. – С. 20–28.
8. Голубкин И. А., Исследование и моделирование процесса проведения дефектоскопии газопроводов мобильным колесным роботом / И. А. Голубкин, О. В. Антонов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2014. – № 1. – С. 18–28.
9. Градецкий В. Г. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям / В. Г. Градецкий, В. Б. Вешников, С. В. Калинин. – Москва : Наука, 2001. – 302 с.
10. Иванов А. А. Мобильные змеевидные роботы: теория и практика / А. А. Иванов, Д. А. Демидов, О. А. Шамаков // Машиностроение. Спецвыпуск: Специальная робототехника и мехатроника. – 2011. – С. 32–41.
11. Как транспортируют природный газ. Информаторий ОАО «Газпром». – Режим доступа: <http://www.gazprominfo.ru/articles/natural-gas-transportation> (дата обращения 05.02.2016).
12. Митрохин М. Ю. Внутритрубная диагностика труднодоступных участков линейной части МГ / М. Ю. Митрохин, В. А. Спирин, В. А. Александров // Газовая промышленность. – 2008. – № 6. – С. 72–74.
13. Чашухин В. Г. Моделирование динамики и определение управляющих параметров внутритрубного миниробота / В. Г. Чашухин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2008. – № 5. – С. 142–147.
14. Diolaiti N., Melchiorri C. Haptic teleoperation of a mobile robot / N. Diolaiti, C. Melchiorri // Proc. of the 7th IFAC symposium of robot control. – 2003. – P. 2798–2805.
15. Fjerdingen S. A. A snake-like robot for internal inspection of complex pipe structures / S. A. Fjerdingen, P. Liljebäck, A. A. Traneth // In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – Oct., 2009. – P. 5665–5671.
16. Golubkin I. System analysis of gas pipeline inspection by mobile robot / I. Golubkin, I. Shcherbatov // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. – 2012. – Vol. 4 Technical Sciences. – P. 91–92.

17. Harish P. Design and Motion Planning of Indoor Pipeline Inspection Robot / P. Harish, V. Venkateswarlu // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2013. – Vol. 3, issue 7. – P. 41–47.
18. Hayashi I. The running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe / I. Hayashi, N. Iwatsuki, S. Iwashina // Proc. in Micro Machine and Human Science, MHS '95. –October, 1995. – P. 225–228.
19. Kim J. H. Famer: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration / J. H. Kim, G. Sharma, S. S. Iyengar // Proc. in IEEE International Conference on Industrial Technology. – March, 2010. – P. 517–523.
20. Kim Y. Distributed kinematic motion control of multi-robot coordination subject to physical constraints / Y. Kim, M. A. Minor // International Journal of Robotics Research. – January, 2010. – Vol. 29, № 1. – P. 92–109.
21. Kostin G. V. Regular motions of a tube-crawling robot: simulation and optimization / G. V. Kostin, F. L. Chenousko, N. N. Bolonik, F. Pfeifer // Proc. in Robot Motion and Control. – 1999. – P. 45–50.
22. Kwon Y.-S. Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot / Y.-S. Kwon, J. Y. Byung // IEEE Transactions on Robotics. – June, 2012. – № 28 (3). – P. 681–696.
23. Maneewern T. Design of pipe crawling gaits for a snake robot / T. Maneewern, B. Maneechai // Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO–2008. – February, 2009. – P. 1–6.
24. Moghaddam M. Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC) / M. Moghaddam, A. Hadi // Proc. of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC. – Ferrara, Italy, 2005. – P. 1–5.
25. Nassiraei A. F. Concept and Design of A Fully Autonomous Sewer Pipe Inspection Mobile Robot “KAN-TARO” / A. F. Nassiraei, Y. Kawamura, A. Ahrari Y. M., Ishii // Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma. – Italy, April, 2007. – P. 136–145.
26. Nishikawa H. In-pipe wireless micro locomotive system / H. Nishikawa, T. Sasaya, T. Shibata, T. Kneko, N. Mitumoto, S. Kawakita, N. Kawahara // Proc. in International Symposium on Micromechatronics and Human Science. – 1999. – P. 141–147.
27. Oya T. Development of a steerable, wheel-type, in-pipe robot and its path planning / T. Oya, T. Okada // Advanced Robotics. – 2005. – Vol. 19, № 6. – P. 635–650.
28. Roh S. G. Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot / S. G. Roh, H. R. Choi // Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002). – 2002. – P. 2575–2580.
29. Roh S. G. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines / S. G. Roh, H. R. Choi // IEEE Transactions on Robotics. – 2005. – Vol. 21, № 1. – P. 1–17.
30. Roman H. T. Pipe crawling inspection robots: An overview / H. T. Roman, B. A. Pellegrino, W. R. Sigrist // IEEE Trans. Energy Convers. – 1993. – Vol. 8. – P. 576–583.
31. Ryew S. M. Inpipe Inspection Robot System with Active Steering Mechanism / S. M. Ryew, S. H. Baik, S. W. Ryu, Jung K. M., S. G. Roh, H. R. Choi // Proc. in IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS–2000). – 2000. – P. 1652–1657.
32. Zhang Y. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting / Y. Zhang, G. Yan // Mechanism and Machine Theory. – 2007. – № 42. – P. 1618–1631.

References

1. Arbuzov Ju. A., Belov S. A., Voevodin I. G., Miklush A. S., Ridchenko A. N., Kuznecov P. A. Algoritm rascheta tehnologicheskikh parametrov zakrepleniya magistral'nykh gazoprovodov na slabonesushhih gruntah [Algorithm of calculation of technological parameters for repairing main gas pipelines in non-cohesive soils]. *Prikladnyy zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, no. 1, pp. 36–41.
2. Bolotnik N. N., Chernous'ko F. L. Dvizhenie shagajushhego apparata v toroidal'noj trube [Movement of the walking device in a toroidal pipe] *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mehanika tverdogo tela* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of a solid body], 1998, no. 4, pp. 86–101.
3. Borisov V. V., Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Nechetkie modeli i seti* [Fuzzy models and networks], Moscow, Gorjachaja linija-Telekom Publ., 2012. 284 p.
4. Bosenko V. N., Kravec A. G. Metodika prognozirovaniya osnovnykh pokazatelej jeffektivnosti proekta stroitel'stva uchastka magistral'nogo nefteprovoda [Technique of forecasting of the basic indicators of efficiency of the civil-engineering design of a section of the main oil pipeline]. *Prikladnyy zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, no. 2, pp. 140–146.
5. Brumshteyn Yu. M., Il'menskij M., Kolesnikov I. Robotehnicheskie sistemy: voprosy razrabotki [Robotic systems: issues of development]. *Intellektual'naja sobstvennost'. Avtorskoe pravo i smezhnye prava* [Intellectual property. The copyright and the adjacent rights], 2016, no. 4, pp. 49–64.
6. Vorotnikov S. A., Nikitin N. I., Chekkarelli M. Sistema upravleniya miniaturnym vnutritrubnym robotom. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*, 2015, no. 8, pp. 49–57.
7. Golubkin I. A. Ispol'zovanie mobil'nykh robotov pri defektoskopii vnutrennej poverhnosti gazoprovodov [Application of mobile robots during defectoscopy of an gas pipelines internal surface]. *Nauka + molodezh' = uspeh : sbornik statej molodykh rabotnikov OOO «Gazprom dobycha Astrahan'»* [The science + youth = success. Proceedings of the young workers Ltd "Gazprom mining Astrakhan"], Astrakhan, 2012, pp. 20–28.

8. Golubkin I. A., Antonov O. V. Issledovanie i modelirovanie processa provedeniya defektoskopii gazoprovodov mobil'nyh kolesnym robotom [Research and modeling of gas pipeline inspection by mobile wheeled robot]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: management, computer science and informatics], 2014, no. 1, pp. 18–28.
9. Gradeckij V. G., Veshnikov V. B., Kalinichenko S. V. *Upravljajemoe dvizhenie mobil'nyh robotov po proizvol'no orientirovannym v prostranstve poverhnostjam* [Operated movement of mobile robots on surfaces any way focused in space], Moscow, Nauka Publ., 2001. 302 p.
10. Ivanov A. A., Demidov D. A., Shmakov O. A. Mobil'nye zmeevvidnye roboty: teorija i praktika [Mobile serpentine robots: the theory and practice]. *Mashinostroenie. Specvypusk: Special'naja robototekhnika i mehatronika* [Mechanical engineering. Special issue: the Special robotics and mechatronics], 2011, pp. 32–41.
11. Kak transportirujut prirodnyj gaz [Transport of natural gas]. *Informatorij OAO «Gazprom»*. Available at: <http://www.gazprominfo.ru/articles/natural-gas-transportation> (accessed: 05.02.2016).
12. Mitrohin M. Ju., Spirin V. A., Aleksandrov V. A. Vnutritrubnaja diagnostika trudnodostupnyh uchastkov linejnoy chasti MG [Intratubal diagnostics of remote parts of a linear part of MG]. *Gazovaja promyshlennost'* [The Gas industry], 2008, no. 6, pp. 72–74.
13. Chashhuhin V. G. Modelirovanie dinamiki i opredelenie upravljajushhih parametrov vnutritrubnogo mini-robota [Modelling of dynamics and definition of operating parameters of the intratrumpet minirobot]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The theory and control systems], 2008, no. 5, pp. 142–147.
14. Diolaiti N., Melchiorri C. Haptic teleoperation of a mobile robot. *Proc. of the 7th IFAC symposium of robot control*, 2003, pp. 2798–2805.
15. Fjerdingen S. A., Liljeback P., Transeth A. A. A snake-like robot for internal inspection of complex pipe structures. *In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Oct., 2009, pp. 5665–5671.
16. Golubkin I., Shcherbatov I. System analysis of gas pipeline inspection by mobile robot. *Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach*, 2012, vol. 4 Technical Sciences, pp. 91–92.
17. Harish P., Venkateswarlu V. Design and Motion Planning of Indoor Pipeline Inspection Robot. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2013, vol. 3, issue 7, pp. 41–47.
18. Hayashi I., Iwatsuki N., Iwashina S. The running characteristics of a screw-principle microrobot in a small bent pipe. *Proc. in Micro Machine and Human Science, MHS '95*, October, 1995, pp. 225–228.
19. Kim, J. H., Sharma G., Iyengar S. S. Famper: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration. *Proc. in IEEE International Conference on Industrial Technology*, March, 2010, pp. 517–523.
20. Kim Y., Minor M. A. Distributed kinematic motion control of multi-robot coordination subject to physical constraints. *International Journal of Robotics Research*, January, 2010, vol. 29, no. 1, pp. 92–109.
21. Kostin G. V., Chenousko F. L., Bolonik N. N., Pfeifer F. Regular motions of a tube-crawling robot: simulation and optimization. *Proc. in Robot Motion and Control*, 1999, pp. 45–50.
22. Kwon Y.-S., Byung J. Y. Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot. *Transactions on Robotics*, June, 2011, no. 28 (3), pp. 681–696.
23. Maneewern T., Maneechai B. Design of pipe crawling gaits for a snake robot. *Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO-2008*, February, 2009, pp. 1–6.
24. Moghaddam M., Hadi A. Control and Guidance of a Pipe Inspection Crawler (PIC). *Proc. of 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC*, Ferrara, Italy, 2005, pp. 1–5.
25. Nassiraei A. F., Kawamura Y., Ahrari A., Ishii Y. M. Concept and Design of A Fully Autonomous Sewer Pipe Inspection Mobile Robot “KANTARO”. *Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma*, Italy, April, 2007, pp. 13–145.
26. Nishikawa H., Sasaya T., Shibata T., Kneko T., Mitumoto N., Kawakita S., Kawahara N. In-pipe wireless micro locomotive system. *Proc. in International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, pp. 141–147.
27. Oya T., Okada T. Development of a steerable, wheel-type, in-pipe robot and its path planning. *Advanced Robotics*, 2005, vol. 19, no. 6, pp. 635–650.
28. Roh, S. G., Choi H. R. Strategy for Navigation Inside Pipelines with Differential-drive Inpipe Robot. *Proc. in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*, 2002, pp. 2575–2580.
29. Roh S. G., Choi H. R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 1–17.
30. Roman H. T., Pellegrino B. A., Sigrist W. R. Pipe crawling inspection robots: An overview. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 1993, vol. 9, pp. 576–583.
31. Ryew S. M., Baik S. H., Ryu S. W., Jung K. M., Roh S. G., Choi H. R. Inpipe Inspection Robot System with Active Steering Mechanism. *Proc. in IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS-2000)*, pp. 1652–1657.
32. Zhang Y., Yan G. In-pipe inspection robot with active pipe-diameter adaptability and automatic tractive force adjusting. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, no. 42, pp. 1618–1631.